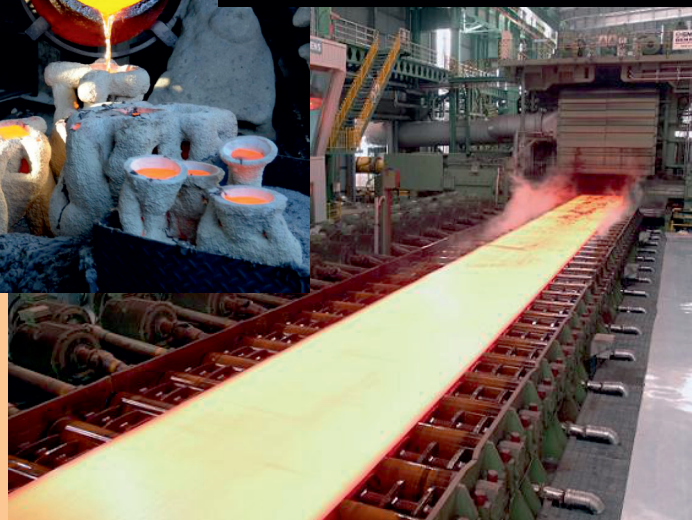
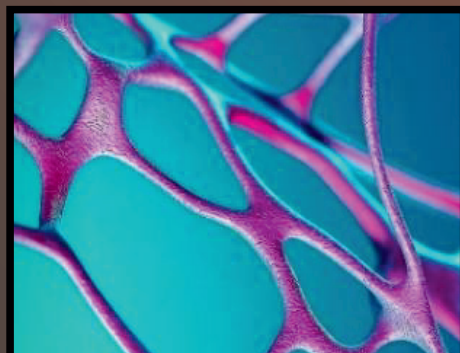
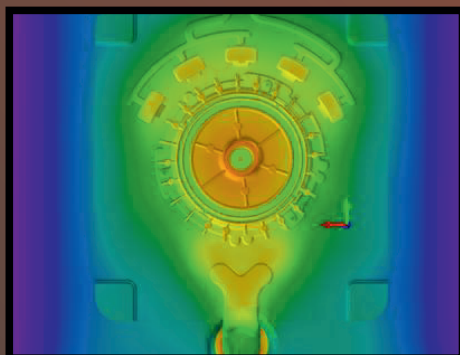
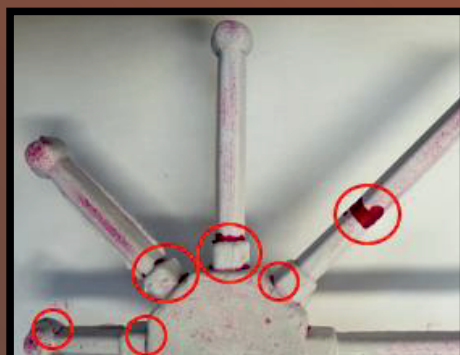
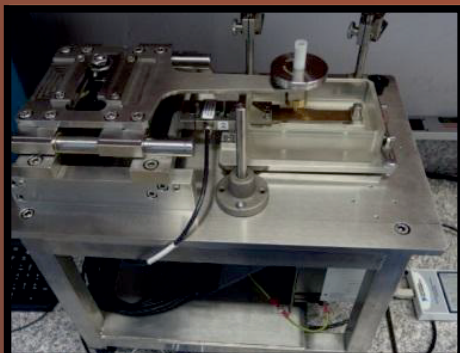




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Strojnícka  
fakulta

# TECHNOLÓG



# TECHNOLÓG

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

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

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

**Evidenčné číslo MK SR-2800/08, EV 10/22/EPP**

**ISSN 1337-8996, Online ISSN 2730-0501**

**Adresa redakcie:**

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

**Telefón: 041-513 2764**

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

**Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA**

**Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563**

**šéfredaktor - editor in chief:**

**výkonný redaktor - executive editor:**

**redaktor - redactor:**

**vedecký redaktor - scientific editor:**

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

Ing. Elena Kantoriková, PhD.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

**redakčná rada - editorial board:**

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

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

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

doc. Ing. Ľudmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

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

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD. (SK)

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

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

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)

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

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

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

## OBSAH

<b>ZOZNAM RECENZENTOV</b>	<b>5</b>
<b>EDITORIÁL</b>	<b>6</b>
<b>JOZEF ČABELKA</b>	<b>7</b>
<b>EDWARD BROWN</b>	<b>9</b>
<b>KOVÁČSKE VYHNE VO VIDIECKOM PROSTREDÍ</b>	<b>12</b>
<b>VPLYV GEOMETRIE REZNEJ HRANY NA TVORBU TRIESKY A ZLOŽKY REZNEJ SILY</b> <i>Anna Mičietová, Mária Čilliková</i>	<b>15</b>
<b>GIGA CASTING AKO TECHNOLOGICKÁ REVOLÚCIA VO VÝROBE AUTOMOBILOV</b> <i>Dana Bolibruchová</i>	<b>19</b>
<b>OPOTREBENIE STRIŽNÍKOV A ICH OSTRENIE</b> <i>Ján Moravec, Borislav Melo</i>	<b>24</b>
<b>ANALÝZA STAVU POVRCHU PO SHOT PEENOVANÍ DUPLEXNEJ OCELE AISi 318</b> <i>Miroslav Neslušán, Zuzana Florková</i>	<b>27</b>
<b>ULTRAZVUKOVÁ KONTROLA ZVAROV NA ŽELEZNÝCH MATERIÁLOCH S HRÚBKOU DO 8 mm</b> <i>Radoslav Koňár</i>	<b>31</b>
<b>ANALÝZA TRIBOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÉHO MATERIÁLU PA66+GF25</b> <i>Jozef Bronček, Mário Drbúl, Dávid Čuchor, Rudolf Madaj</i>	<b>35</b>
<b>VPLYV PRECIPITAČNÉHO VYTVRDZOVANIA NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI NEHRDZAVEJÚCICH OCELÍ</b> <i>Elena Kantoríková</i>	<b>39</b>
<b>ANALÝZA A VÝBER BATÉRIOVÝCH SYSTÉMOV PRE NEZÁVISLÚ ELEKTRICKÚ TRAKCIU V ŽELEZNIČNEJ DOPRAVE</b> <i>Vladimír Samaš, Martin Bučko, Matúš Adamkovič</i>	<b>43</b>
<b>KVANTITATÍVNE HODNOTENIE NÁCHYLNOSTI Al-Si-Cu-Mg ZLIATINY S PRÍDAVKOM TITÁNU NA VZNIK TRHLÍN ZA TEPLA</b> <i>Martina Sýkorová</i>	<b>48</b>
<b>NUMERICKÁ ŠTÚDIA VPLYVU TEPLoty JADRA NA TEPELNÉ ZAŤAŽENIE VYSOKOTLAKOVEJ FORMY PRI VÝROBE ODLIATKOV PRE EC MOTORY</b> <i>Marek Matejka, Radka Podprocká</i>	<b>54</b>
<b>RUČNÉ OBRÁBANIE KOVOV PILOVANÍM</b> <i>Ján Moravec</i>	<b>60</b>
<b>SPRACOVANIE TECHNICKÝCH MATERIÁLOV Z MATEMATICKÉHO HEADISKA</b> <i>Zuzana Malacká</i>	<b>63</b>

<b>OVERCASTING AKO INOVATÍVNA METÓDA SPÁJANIA KOVOVÝCH MATERIÁLOV</b>	<b>68</b>
<i>Martin Medňanský, Marek Brůna</i>	
<b>TVÁRNENIE PLECHU VEĽKOU UVOĽNENOU ENERGIU</b>	<b>72</b>
<i>Ján Moravec, Borislav Melo,</i>	
<b>KINEMATICKÁ ANALÝZA ROVINNÉHO PARALELNÉHO MECHANIZMU S TROMI VODIACIMI REŤAZCAMI S NEIDENTICKOU ŠTRUKTÚROU</b>	<b>77</b>
<i>Mária Michalková, Vladimír Guldan, Branislav Ftorek</i>	
<b>ANALYSIS OF THE EFFECTIVE USE OF WORK TOOLS</b>	<b>83</b>
<i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Martin Buzalka, Marta Kasajová</i>	
<b>STUDY OF LOCAL MECHANICAL PROPERTIES AND DEFORMATION MECHANISMS OF THE SOFT ZONE OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEELS</b>	<b>87</b>
<i>Jakub Harvanec, Miloš Mičian, Martin Frátrik</i>	
<b>PROGRESS IN ADVANCED INDUSTRIAL ENGINEERING</b>	<b>91</b>
<i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Marta Kasajová, Ján Zuzík</i>	
<b>RECENZIA</b>	<b>95</b>
<i>Ján Moravec</i>	

## ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD.  
Ing. Zdenka BOHUŠOVÁ, PhD.  
prof. Ing. Lubomír HUJO, PhD.  
doc. Ing. Petr KAWULOK, Ph.D.  
doc. Ing. Róbert LABUDA, PhD.  
Ing. Ivan LITVAJ, PhD.  
Ing. Augustín STAREČEK, PhD., Ing. Paed. IGIP  
prof. Ing. Augustín SLÁDEK, PhD.  
Ing. Roman STROKA, PhD.  
MUDr. Ing. Zuzana ŠTOFFKOVÁ, PhD.  
prof. Ing. Peter ZVOLENSKÝ, CSc.

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

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

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



## EDITORIÁL

Motto: *“Nenechám sa odradiť. Pretože každý zlý pokus, ktorý mám za sebou, je ďalším krokom vpred - krokom k úspechu.”*

Thomas A. Edison

Vážení autori, čitatelia a priaznivci, dovoľte mi, aby som vás v prvom rade pozdravil. Mnohí z vás sú prispievatelia do časopisu *Technológ*. V čísle 2/2025 časopisu *Technológ* sú zaradené príspevky zo širokého spektra vedy a výskumu. Publikované príspevky iste majú čo povedať záujemcom a odborníkom. Príspevky a potrebné informácie z publikovaných článkov vedeckého časopisu *Technológ* sa dajú ľahko vyhľadať v elektronickej verzii. Týmto sa veľmi uľahčil prístup k potrebným informáciám. *Technológ* sa takto zaradil medzi tie časopisy, kde je aplikované takéto riešenie. Publikované príspevky sú odborne skontrolované a recenzované anonymne dvomi recenzentmi. Do tohto čísla, ako je zvykom, sú v úvode zaradené príspevky o *Jozefovi Čabelkovi*, *Edwardovi Brownovi* a *vyhniach vo vidieckom prostredí*. Potom nasledujú vedecké príspevky, ktoré poskytujú mnoho zdrojov, poznatkov a poučení pre nasledujúce využitie.

Všetkým prajem veľa zdravia a úspechov.

*Ján Moravec*  
šéfredaktor a editor



## Jozef ČABELKA

(\*15. február 1910, *Holíč* –  
†6. júl 1987, *Bratislava*)

*Jozef Čabelka* (1910 – 1987) bol pôvodom zo *Záhoria (Holíč, okres Skalica)*, vedec a pedagóg, odbornou orientáciou mikrometalurg a zvarač. Jeho odbornosť dokladá plný zápis jeho mena aj s titulmi: *prof. Ing. ESSA. Dr.tech. Dr.h.c. Jozef Čabelka, Dr.Sc.* Základnú školu vychodil v rokoch 1916-1928 v *Holíči*, následne študoval na reálnom gymnáziu v *Hodoníne*. V rokoch 1928-1934 absolvoval *Vysoké učení technické v Brne (VUT)* – najprv odbor strojný inžinierstvo konštrukčného smeru na *Strojníckej fakulte*, neskôr elektrotechnický silnoprúdový odbor na *Elektrotechnickej fakulte* a v roku 1934 získal titul inžiniera. Po skončení štúdia ho tamojší profesori *Karel Ryska* a *František Píšek* odporučili do laboratória popredného svetového metalurga prof. *Portevina* v *Paríži*, aby si rozšíril vedomosti z oblasti metalografie a zvarovania. Po ročnej praxi nastúpil na *Vysokú školu zvaračskú – École supérieure de soudure autogène (ESSA)* v *Paríži* a po jej úspešnom absolvovaní získal diplom *Ing. ESSA* (inžinier – zvarač). Pred návratom do *Československa* ešte absolvoval krátku prax vo *francúzskej spoločnosti Air Liquid* a americkej *Babcock-Wilcox*. Jeho doktorská dizertačná práca sa zaoberala teóriou zvariteľnosti, kde demonštroval tzv. *Čabelkovu skúšku zvariteľnosti*. Prácu obhájil v r. 1947. Svoju profesúru získal na *Slovenskej vysokej škole technickej*, keď mal iba 36 rokov, a to v odbore mechanická technológia. V r. 1953 sa stal akademikom *Slovenskej akadémie vied* a v r. 1956 obhájil hodnosť doktora vied. Čestný doktorát mu udelili v *Magdeburskej Technische Hochschule für Schweissmaschinenbau* v r. 1960.

V roku 1937 založil elektródovňu vo *Vamberku*, kde bol vedúcim do roku 1943 (dnes *ESAB*). Počas zamestnania mu boli umožnené študijné pobyty v *ESABu* v *Göteborgu, Königshütte, Bismarckhütte* a v závodoch *Krupp*. Počas svojho pôsobenia vo *Vamberku* prišiel s vlastnou metodikou stanovenia zvariteľnosti uhlíkových ocelí. Táto problematika bola predmetom jeho dizertačnej práce, ktorú obhájil v roku 1945 a na jej základe získal doktorát technických vied. O dva roky neskôr získal za uvedený postup *Cenu Lincolnovej nadácie* na medzinárodnej súťaži v *Clevelandu (USA)*. Cenu mohol priviesť iba ako vybavenie pre zakladaný *Výskumný ústav zvaračský. J. Čabelka* vybudoval jeden z najmodernejších prevádzok na výrobu obalovaných elektród na svete.

V roku 1942 sa stal mimoriadnym profesorom *Slovenskej vysokej školy technickej (SVŠT)* a v roku 1946 bol menovaný profesorom na *Slovenskej vysokej škole technickej*, keď mal iba 36 rokov, a to v odbore mechanická technológia. V roku 1943 založil a bol vedúcim *Katedry fyzikálnej metalurgie na strojníckej fakulte SVŠT*, ktorá funguje dodnes. Do roku 1980 pôsobil na odbore Zvarovania a zlievania. Počas niekoľkých rokov bol i dekanom a prodekanom *Fakulty strojného a elektrotechnického inžinierstva SVŠT*. V roku 1949 založil prvé postgraduálne zvarovania, neskôr tvárnenia a napokon fyziky kovov v *Československu*. Bol spoluzakladateľom *SAV*. V roku 1952 sa stal člen korešpondent *ČSAV*, v r. 1953 akademikom *SAV* a až do 1959 bol podpredsedom *SAV*. Jeho obrovskou zásluhou bolo i založenie *Ústavu fyziky kovov SAV* (dnes *Ústav materiálov a mechaniky strojov*).

Čestný doktorát mu udelili v *Magdeburskej Technische Hochschule für Schweissmaschinenbau* v r. 1960.

Ďalšou obrovskou zásluhou akademika *Čabelku* bolo založenie *Výskumného ústavu zvaračského (VÚZ)* v roku 1949. *Čabelka* dokonca financoval jeho prvú stavbu. Prostriedky získal objavom tzv. „krehkého lomu“ – zistil, prečo sa námorné lode poškodzovali v blízkosti zvaru a inicioval súčasnú technológiu žihania oslabeného okolia. Riaditeľom *VÚZ* bol v období rokov 1949-1961. Koncom tohto obdobia *VÚZ* navštívili prvý tajomník *ÚV KSSZ N. Chruščov* a *N. Bulganin*, ktorí videli, že ústav je na vyššej úrovni ako v *ZSSR*, bol profesor *Čabelka*

na pokyn z Prahy do niekoľkých týždňov prepustený a musel do hodiny opustiť priestory ústavu. Následne nesmel byť prijatý v žiadnom strojárskom podniku v Česko-Slovensku. Na základe príhovoru A. Dubčeka mu bolo umožnené ostať na SVŠT.

Čabelka je pôvodcom vedy o zvariteľnosti. Napísal 57 pôvodných vedeckých štúdií, vyše 100 odborných článkov, z toho mnohé publikované aj v zahraničí, a 14 monografií. Bol držiteľom 28 patentov a bol aj nominovaný na Nobelovu cenu za fyziku.

Jeho smrť v roku 1987 oznámili len raz asi 30 sekundovou správou. Je po ňom pomenovaná križovatka pri Výskumnom ústave zvaračskom v Bratislave aj Stredná odborná škola Jozefa Čabelku v Holíči.

## DIELA

*Zvariteľnosť kovov, vybrané state*, VEDA vyd. SAV Bratislava 1977, 445 s.

*Metalurgická zvariteľnosť mäkkých konštrukčných ocelí*, SAVU Bratislava, 1948, 190 s.

*La soudabilité des aciers*, VUS Bratislava 1956, 32 s.

*Essais de soudabilité metaurgique*, La soudure électrique Bruxelles, 1959, 12 s.

*Die metallurgische Schweissbarkeit der Baustähle*, Schweisstechnik, 1954, 42 s.

## VEDECKÉ VYNÁLEZY A PRÁCE

- Čabelkov test zvariteľnosti
- Zváranie pod vodou – objav tzv. „krehkého lomu“
- Technológia žihania zvarov

## OCENENIA

- Nominácia na Nobelovu cenu za fyziku,
- 1947 Medzinárodná cena J. F. Lincoln Arc-Welding Foundation USA I. stupňa v roku za vyriešenie zvariteľnosti mäkkých konštrukčných uhlíkových ocelí,
- Bola mu dvakrát udelená Štátna cena v ČSR,
- 1980 - Oborová plaketa F. Křížika za zásluhy v technických vedách,
- V roku 1996 mu prezident Michal Kováč prepožičal štátne vyznamenanie rad Ludovíta Štúra I. triedy, in memoriam.

## LITERATÚRA

[1] TURŇA, Milan. 100 rokov od narodenia Jozefa Čabelku. *Spektrum : Periodikum Slovenskej technickej univerzity v Bratislave* (Bratislava: Vydavateľstvo STU), február 2010, roč. XVI. /XLVIII./, č. 6, s. 11 – 13. Dostupné online [cit. 2019-10-29].

[2] CIFRA, Štefan. Jozef Čabelka (\* 12. 2. 1910 Holíč – † 6. 7. 1987 Bratislava). *Literárny týždenník* (Bratislava: Spolok slovenských spisovateľov), 2017. Dostupné online [cit. 2019-10-29]. Archivované 2019-09-03 z originálu.

## EDWARD BROWN

*Ján Moravec*

Bol najstarším synom sira *Thomasa Browna* a narodil sa v *Norwichi* v roku 1644. Vzdelanie získal na *Norwich School* a na *Trinity College v Cambridge*. Štúdium lekárstva absolvoval a titul *MB* získal v *Cambridge* v roku 1663 a potom sa vrátil do *Norwichu*. Zachoval sa denník ktorý poskytuje zábavný obraz o jeho aktivitách a živote v *Norwichi*. Zaznamenáva, že často chodil na tance do vojvodovho paláca, obdivoval tam zachované drahokamy. Takmer každý deň pitval, študoval botaniku, čítal medicínu, literatúru a teológiu v knižnici svojho otca a videl aspoň jedného pacienta. "16. februára. Pani *Anne Wardová* mi dala môj prvý honorár, desať šilingov."

Týždeň po tejto významnej udalosti odišiel *Browne* do *Londýna*. Navštevoval prednášky *Dr. Ch. Terna*, lekára nemocnice *sv. Bartolomeja*. V roku 1672 sa oženil s *Terneovou* dcérou *Henrietou*. Jeho poznámky o prednáškach *Dr. Temeho* sa zachovali a sú v rukopise v *Britskom múzeu*. Po skončení prednášok sa *Brown* sa vrátil do *Norwichu* a čoskoro potom začal cestovať po Európe. Študoval hovorovú *gréčtinu* a priniesol listy preložené z *gréčtiny* do *angličtiny* *Dr. Pearsonovi*, biskupovi z *Chesteru*, a *Dr. I. Barrowovi*, majstrovi *Trinity*.

Kamkoľvek prišiel, pozoroval všetky prírodné a historické predmety, ako aj všetko, čo súviselo s jeho profesiou. V roku 1667 bol *Browne* zvolený za *FRS* a v roku 1675 bol prijatý za člena *College of Physicans*. Žil v *Salisbury Court, Fleet Street* a stal sa lekárom kráľa *Karola II*. 7. septembra 1682 bol zvolený za lekára nemocnice *sv. Bartolomeja*, v rokoch 1694 - 1704 bol pokladníkom *Kolégia lekárov* a v rokoch 1704 až 1708 prezidentom tohto kolégia. Mal veľkú prax a tešil sa z priateľstva mnohých vplyvných mužov. *Brownov* profesionálny úspech bol podmienený jeho všeobecnými schopnosťami. Jeho zápisníky ukazujú, že vo svojej profesii tvrdo pracoval a že vďaka dobrým vedomostiam sa čoskoro stal známym lekárom, chirurgom a lekárnikom. V roku 1673 sa už pri konzultácii stretol s trinástimi lekármi a desiatimi chirurgmi. Medzi zachovanými dokumentmi možno nájsť veľké množstvo listov a poznámok v rukopise. Medzi nimi je najstaršia známa kópia '*Pharmacopœia*' nemocnice *sv. Bartolomeja*. Práca bola vydaná v roku 1670 a niektoré z jeho predpisov boli predmetom korešpondencie medzi *Brownom* a jeho otcom.

V polovici 17. storočia zavítal do *stredoslovenských* bankských miest *anglický* cestovateľ *Edward Brown*. Neskôr sa stal riaditeľom *londýnskej* nemocnice svätého *Bertalana*. *E. Brown* bol cestovateľ, ktorý z poverenia *Kráľovskej učenej spoločnosti v Londýne* putoval po *Európe* a podával o tom hlásenia domov. Súviselo to s nárastom záujmu *Angličanov* o nerastné bohatstvo na starom kontinente. *Edward Brown* sa cez *Holandsko, Nemecko a Viedeň* dostal až na *Slovensko*, hoci *Slovensko* ako štátny útvar v tom čase neexistovalo. O tejto časti svojej cesty napísal knihu s názvom *Cesta z Komárna do bankských miest v Uhorsku a odtiaľ do Viedne*. Kapitoly týkajúce sa dnešného *Slovenska* vyšli aj po *slovensky*. *Edwarda Browna* zaujímali predovšetkým tunajšie bane na meď, striebro a zlato, ktoré boli strategicky dôležité pre celú *Európu* aj *Turkov*. Keďže nadobudnuté poznatky si zapisoval, dnes vieme napríklad o jeho postrehoch týkajúcich sa *Španej Doliny*, ktorá sa podľa *Edwarda* mala volať skôr *Medvedí pozemok*. O návšteve jeho návšteve *slovenských* bankských miest bol natočený aj film *Cesty Edwarda Browna*.

Jeho cesta viedla aj dolu *Dunajom* do *Európskych* oblastí *tureckej ríše*. V *Budíne* sa dostal do kontaktu s orientálnym svetom a v *Larisse* videl a študoval *grécke* ruiny a vo fantázii nasledoval *Hippokratovu prax*.

*Brown* sa na cesty vydal v polovici roku 1668 a vrátil sa začiatkom roku 1673. Svoje zážitky a pozorovania z tejto dlhej takmer päťročnej cesty uverejnil *E. Brown* v známom cestopise ktorého prvý zväzok vyšiel v *Londýne* pod názvom: *A brief account of some travels in Hungaria, sdervia, Bulgaria, etc*. A druhý zväzok pod názvom *A account of several travel trough a great parts of Germany, Londýn* 1677. Ešte počas cesty uverejnil *Brown* v orgáne *anglickej Kráľovskej spoločnosti Philosophical transaction* rozpravu o medených baniach v *Španej doline* a niektorých horúcich prameňoch na *Slovensku*. Neskôr v roku 1680 vyšla v orgáne *francúzskej* akadémie vied jeho rozprava o škodlivých plynch v *stredoslovenských* baniach. Pretože v *Brownovom* cestopise ide hlavne o *Slovensko* popri povestnom nerastnom bohatstve, baníctve a hutníctve všima si *Brown* najmä horúce a minerálne pramene, ktorými predstihuje táto oblasť podľa vyjadrenia všetky ostatné krajiny *Európy*. Baníctvo, hutníctvo a horúce pramene prípadne kúpele tvoria hlavný predmet jeho záujmu počas jeho pôsobenia na *Slovensku*. Z dost nejasnej chronológie jeho cesty sa dá usudzovať že juhozápadné oblasti *Slovenska* navštívil z *Viedne* cez *Bratislavu* už v roku 1670, no cestu do bankských miest cez *Komárno, Leopoldov* podnikol až na jar nasledujúceho roku. Do *Banskej Štiavnice* prišiel koncom marca 1672 a opúšťa ju až 13 júna. Krátky čas sa zdržal v *Kremnici*, v *Banskej Bystrici*, *Španej doline*. Potom zamieril cez *Hornú Nitru, Bojnice, Trenčín*, dolu *Považím* na *Trnavu* do *Bratislavy* a *Viedne*. Vďaka priazni komorného grófa *Joanelliho* mal možnosť dôkladne sa oboznámiť s baňami a hutami v tejto oblasti. Sfáral do baní na *Windšachte*, v *Kremnici*, *Španej doline*, a tak popri informáciách o *slovenskom* baníctve vo svojom cestopise mohol zužitkovať všetky svoje osobné zážitky

a pozorovania. Z osôb s ktorými sa počas svojej návštevy v banských mestách stretol okrem komorného grófa spomína *štiavnického* lekárnik *Jakuba Schwibodu*, ktorý vlastnil bohatú mineralogickú zbierku a banského úradníka *Mateja Dollingera*, o ktorom uvádza, že skonštruoval nový typ stúp. Vedecký záujem *E. Browna* aj keď bol prevažne venovaný prírodovedne mal v podstate polyhistorický charakter. Nebol špecialistom ani v baníctve ani hutníctve a aj jeho údaje o súdobom slovenskom baníctve majú všeobecný charakter. *Brown* si všímal všetko, : zloženie minerálov, bohatstvo žíl, šachty a štôlne, techniku ich budovania, dopravu ľudí a rudy v baniach, vetranie stroj na čerpanie banských vôd, úpravu rúd, hámre atď. Je celkom pochopiteľné, že tieto údaje zhrnuté do jednej, aj keď pomerne rozsiahlej kapitoly, sú v celku neúplné, úplné náhodné a pokiaľ ide o technickú úroveň baníctva a hutníctva na *Slovensku* známe poznatky podstatne nerozširujú. Kamkoľvek prišiel, pozoroval všetky prírodné a historické predmety, ako aj všetko, čo ho zaujímal. Kreslil veľmi presne čo videl a niektoré jeho kresby sú zachované v *Britskom múzeu*.

Napriek tomu však vyzdvihuje niektoré špecifické prvky v banskej technike a hutníckej technológii na *Slovensku* v tomto období. Vyzdvihuje vytrvalosť baníkov na *Slovensku* pri hľadaní a odkrývaní nových žíl, pričom vraj vôbec nepoužívajú povestný prútik, ale riadia sa predovšetkým skúsenosťami. Vo všetkých baniach, ktoré navštívil, si vlastný spôsob razenia šacht a štôlní. Pri návšteve *Kremnice* si všíma, že baníci pri práci používajú kompas. K tomu dodáva, že tento sa nedelí na 32°, ako je to pri námorných kompasoch, ale len na 24°, ktoré takisto, ako sa tu robí s dennými nočnými hodinami, delia po 2×12. V *Španej doline* zas obdivuje dôkladnú banskú mapu tohto banského diela, ktoré označuje za celé podzemné mesto. Mnoho priestoru venuje opisu prepravy rudy v bani a na povrchu, najmä takzvanému *uhorskému* huntu, ktorý mal kolesá vzadu väčšie ako vpredu a vysunutý železný jazyk zapustený do dreveného jarku umožňoval v štôlni i chlapcovi s veľkou rýchlosťou a dokonca aj potme prepravu 300 až 400 funtov (funt = 0,45 kg). Banské vozíky na povrchu mali osem kolies alebo štyri kolesá a štyri valce, nemali jazyk, ale pohybovali sa po dráhe z jedľového alebo borovicového dreva. Pokiaľ ide o otázku banských strojov na čerpanie banskej vody, jeho pozornosť pri návšteve *Windšachty* upútalo ohromné koleso hlboko v bani, ktoré pohybovala zhora padajúca banská voda, a ktoré poháňalo pumpu čerpajúcu vodu z nižších obzorov. Voda poháňajúca kolesá ako aj čerpaná otekali zvláštnou štôlnou na povrch. V bani vraj bolo ešte jedno čerpadlo, ktoré obsluhovalo dvanásť koní. Pri otázke úpravy rúd a hutníctva odkazuje *Brown* čitateľa na klasické diela *G. Agricolu* a *L. Erckera*. Výslovne podotýka, že sa tu pracuje spôsobmi, ktoré sa udomácnili už v dobe cisára *Rudolfa II.*, hoci na druhej strane sa tu mnoho zlepšilo. Jeho pozornosť bližšie upútala *amalgamácia*, ktorá sa v tejto dobe bežne používala v *Kremnici* a skreslené správy zdá sa dostali sa až k *I. Newtonovi*. *Brown* veľmi podrobne opisuje túto *kremnickú amalgamačnú* metódu. Okrem *amalgamácie* si bližšie všímal dva pramene s *vitriolovou* vodou v *špaňodolinských* baniach. Hoci on sám je ešte stúpencom tradičného názoru, že tu ide o transmutáciu nižšieho kovu na vyšší, železa na meď, podotýka, že niektorí učenci už tento výklad zamietli, kloniac sa skôr k presvedčeniu, že pramene sú roztokom síranu meďnatého (*Vitriolium kupfer*), ktorého časti sa vylučujú vo forme medi na vloženom železe. Tieto názory aspoň hypoteticky vystihujú chemickú podstatu tohto cementačného procesu. Údajmi o amalgamáci v *Kremnici* a o vitriolových prameňoch v *Španej doline* dal *E. Brown* aspoň z časti odpoveď aj na otázky, ktoré dal *I. Newton* svojho času *Cambrigeanovi Astonovi*, pokiaľ ide o *slovenské* baníctvo a hutníctvo. Okrem stredoslovenských baní *Edward Brown* počas svojho pobytu na *Slovensku* venoval veľkú pozornosť horúcim prameňom, o ktorých napísal monografiu a jeho súčasník *R. Boyle*. Podrobne opísal predovšetkým *Sklené, Štubnianske (Turčianske) Teplice, Vyhne* a *Bojnice*. *Brown* bol vynikajúcim kresliarom. V *nemeckom* vydaní jeho cestopisu je jedna medirytina, ktorá komplexne znázorňuje bane a hutu na strednom *Slovensku*.



*Slovenské baníctvo a hutníctvo. Ilustrácia z Brownových Ciest*

V roku 1669 sa vrátil do *Anglicka* a v roku 1673 uskutočnil ešte jednu cestu v spoločnosti sira *J. Williamsona*, sira *L. Jenkinsa* a *Ch. Mordaunta*. Navštívil *Kolín nad Rýnom*, *Aix-la-Chapelle*, *Liege*, *Louvain*, *Gent*, *Bruggy* a ďalšie mestá v *Holandsku*.

V roku 1685 vyšla zbierka všetkých jeho ciest v jednom zväzku. V roku 1672 vydal preklad „*Histórie*“ kozákov a napísal životy *Themistokla* a *Sertoria* v *Drydenovom* „*Plutarchovi*“ vydanom v roku 1700.

*E. Brown* zomrel v *Northfleet* v *Kente* 28. augusta 1708 a zanechal po sebe syna a dcéru. Je pochovaný v *Northfleet*.

## HLAVNÉ PRÁCE

*Edward Brown* (1673). *A brief account of some travels in Hungaria, sdervia, Bulgaria, etc.* London.

*Edward Brown* (1677). *A account of several travel trough a great parts of Germany*, London.

## LITERATÚRA

[1] *TIBENSKÝ, J.* (1966) : *Príspevok k poznaniu záujmu učenej európskej verejnosti o slovenské baníctvo v období feudalizmu*. Z dejín vedy a techniky na Slovensku IV. vyd. SAV, Bratislava s. 172-176.

[2] *BROWN, E.* (1980): *Cesta z Komárna do banských miest v Uhorsku a odtiaľ do Viedne*. Osveta, Bratislava, 52 s.



Titulný list nemeckého vydania *Brownových Ciest*

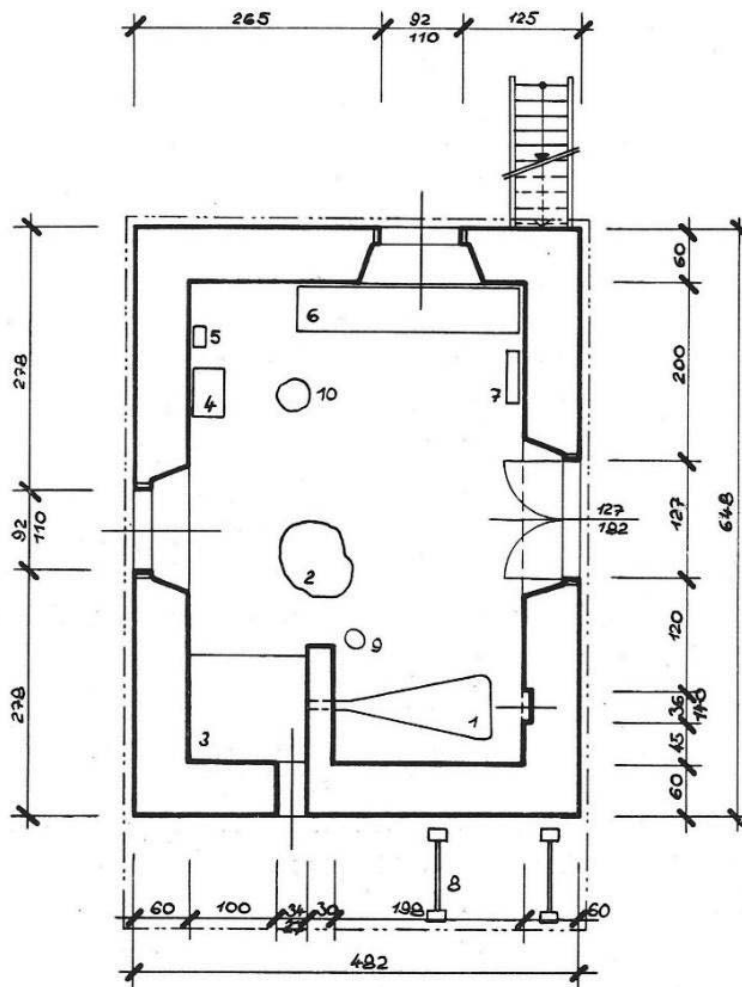


Frontispice *Brownových Ciest*

## KOVÁČSKE VYHNE VO VIDIECKOM PROSTREDÍ

Ján Moravec

Kováčske remeslo je jedným z najstarších ľudských činností, ktoré sa dajú zdokladovať. Ide o zdokumentovanie jednako archeologických nálezov, či už nástrojov alebo výrobkov. V úzkom ponímaní sa dajú aj kováčske nástroje považovať za výrobky kováča, pretože si ich vyrábala sám. Takisto sa dá toto remeslo relatívne dobre nájsť v dokumentoch z raného aj neskoršieho stredoveku. Samotné kováčske remeslo je možné datovať do tretieho tisícročia pred n. l. Prvé železné výrobky z *meteoritického* železa aj z pozemského sa objavujú v *Mezopotámii*, *Sýrii* a *Egypte*. Tento nový kov bol pôvodne taký vzácny, že ho spolu so zlatými šperkmi a predmetmi ukladali do hrobiek vladárov. Najstarším archeologickým nálezom na *Slovensku* je bezpochyby predmet z lokality *Gánovce* pod *Tatrami*, kde sa našiel zlomok najstaršieho železného kosáka. Je to predmet, ktorý nemá paralelu v strednej, západnej ani severnej *Európe*. Datovaný je do doby bronzovej, kedy sa sporadicky objavujú aj železné predmety. Ide o časový horizont okolo roku 2300 pred n. l. Neuvádzam ďalšie predmety nájdené pri archeologickom výskume, pretože to nie je zámerom tohto článku. Čitateľa odkazujem v tejto záležitosti na moje práce [1-7].



Obr. 1. Pôdorys vyhne. 1- kováčsky mech, 2-klát s nákovou, 3-vyhňa, 4- ručná vrtačka, 5- skrinka na vrtáky, 6- pracovný stôl, 7- skrinka na písomnosti, 8- záprava na podkúvanie dobytku, 9- vedro na vodu, 10- klát na ohýbanie ráfikov kolies

V minulosti bol život na dedine nepredstaviteľný bez kováča, najmä v poľnohospodárskych oblastiach. Z tohto tvrdenia je možné uzavrieť, že vyhne boli budované takmer v každej dedine. Vyhňa bola umiestnená vždy pri ceste. Bolo to z dôvodu povozníctva, teda aby dopravcovia mali možnosť bez problémov dať podkuť kone. Vyhne boli budované hlavne z kameňov. Takisto je známe, že okrem týchto profesionálnych stavieb boli budované aj malé vyhne na odľahlých gazdovstvách. Boli to súkromné vyhne, aby si gazdovia mohli sami vykonať najbežnejšie kováčske práce. Išlo najmä o ostrenie sekery alebo motyky, zvarenie kováčskym zvaráním napr. reťaze na voz. Takisto si tam robili drobné práce súvisiace s podkúvačstvom.



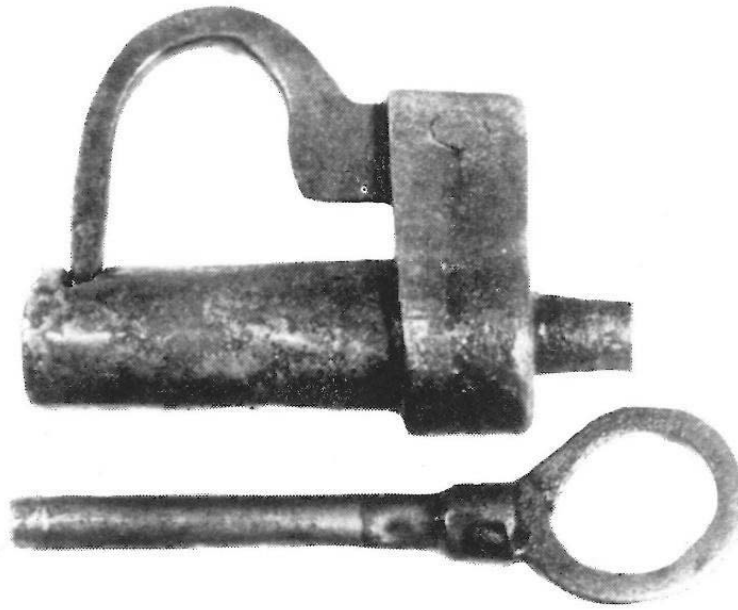
Obr. 2. Kováča dielňa

Kováči vyrábali obrovský sortiment nielen výrobkov požadovaných od širokého okolia, vrátane vrchnosti, ale sami si vyrábali všetky svoje pracovné nástroje. V tejto technológii sú potrebné rozličné kliešte, kladivá, priebojníky, pracovné doska na výrobu klinec a iných potrebných vecí, bez ktorých sa nedalo toto remeslo vykonávať. Na obr. 3 sú zachytené kliešte a kladivá potrebné k práci dedinského kováča.



Obr. 3. Kovácke náčinie a nákov s ohniakom

Pokiaľ ide o sortiment výrobkov, tak sa dajú uviesť z tohto spektra napr. výroba kovaní na výrobky kolárov, teda všetky typy vozov a jednoduché zámky. Kováč vyrábala reťaze, rozličné druhy motýk, sekier, vrátane toporov, škrabky na kôru, otky na pluh. Takisto vyrábala dláta, tešly, nožiky do hoblíkov, nástroje pre šindliarov. Zručný kováč dokázal vyrobiť jednoduchý zámok bez kľúča, takisto zámok s kľúčom, resp. truhlicové zámky [8-10].



Obr. 4. Jednoduchý zámok s kľúčom

## ZÁVER

Príspevok opisoval problematiku kováčstva najmä s ohľadom na relatívne nedávnu epochu, teda prvú polovicu uplynulého storočia. Na tomto mieste možno dodať nasledujúce: železo bolo v uplynulých dobách cenným materiálom a každý kúsok sa schovával pre ďalšie spracovanie. Kováč pri výrobe podkovy nepoužil k tomuto účelu nový materiál, ale ohýbal a zváral staré opotrebované podkovy na tzv. zložky z ktorých potom vykulo novú podkovu. Napokon aj starý zvyk a povera, že nájdená podkova prináša šťastie, sa traduje z dôb, kedy sa za cenu železa nájdenej podkovy sa mohol človek najesť.

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2010): *Prehľad vývoja kovania od jeho počiatkov do začiatku novoveku*. EDIS vyd. UNIZA, 98 strán, ISBN 978-80-8070-554-0.
- [2] MORAVEC, J. (2010): *Počiatky metalurgie na území Slobodnej Germánie*. EDIS vyd., UNIZA 72 str., ISBN 978-80-554-0238-8.
- [3] MORAVEC, J. (2010): *Postavenie kováča v rámci spoločnosti a vývin jeho pracovného náradia*. Technológ roč. II., č.1/2010, str.50-68, ISSN 1337-8996
- [4] MORAVEC, J. (2011): *Príspevok k historickým počiatkom metalurgie a kováčstva*. Ročenka KTI č. 4, EDIS vyd. UNIZA, s. 66-71, ISBN 978-80- 554-0335-9.
- [5] MORAVEC, J. (2012): *Vývoj kováčskeho náradia*. Technológ roč. IV., 2/2012, str. 41-44, ISSN 1337-8996.
- [6] MORAVEC, J. (2013): *Hutníctvo a kovácke remeslo v ranom stredoveku*. Ročenka KTI č. 6, EDIS vyd. UNIZA, s. 47-50, ISBN 978-80- 554-0647-3.
- [7] MORAVEC, J. (2014): *Východiská zvýšenia produkcie železných výrobkov v stredoveku*. Ročenka KTI č. 7, EDIS vyd. UNIZA, s. 46-50, ISBN 978-80- 554-0842-2.
- [8] KYSILKA, K. - RAJMAN, J. - VÍTEK, Z. (2006): *Podkovárství*. Grada Praha, ISBN 80-247-1592-9.
- [9] FROLEC, I. (2003): *Kovářství*. Grada Praha, ISBN 80-247-0611-3.
- [10] SEMERÁK, G. - BOHMANN, K. (1979): *Umělecké kovářství a zámečnictví*. SNTL Praha.



Tento článok sa zaoberá práve vyššie uvedenou problematikou a jeho cieľom je poukázať na vplyv geometrie nástroja na tvorenie triesky, ich tvar, ako aj na silové pôsobenie v zóne rezania pri sústružení.

## 1 PODMIENKY EXPERIMENTOV

Experimenty boli realizované na oceli 14 220 na tyči s priemerom 75 mm s použitím 2 rezných platničiek, ako ich ukazuje obr. 2.



a) P 15 (TNMA 220432-KR 3225)



b) IC 20 (TNMA 220408)

### Obr. 2. Rezné platničky použité pri sústružení

Platnička P15 mala TiN povlak a vytvorený utvárač triesky SF, platnička IC 20 bola bez povlaku a bez utvárača. Pracovný uhol čela  $\gamma_n$  pre P15 bol  $3^\circ$  a pre IC20 -  $4^\circ$ . Pre vybrané rezné podmienky boli zachytené triesky a ich hrúbka  $h_c$  bola meraná v 5 miestach prostredníctvom posuvného meradla. Hrúbka nedeformovaného kovu  $h$  odpovedá veľkosti posuvu a potom stlačenie triesky  $K$  je možné vypočítať ako:

$$K = \frac{h_c}{h} \quad (1)$$

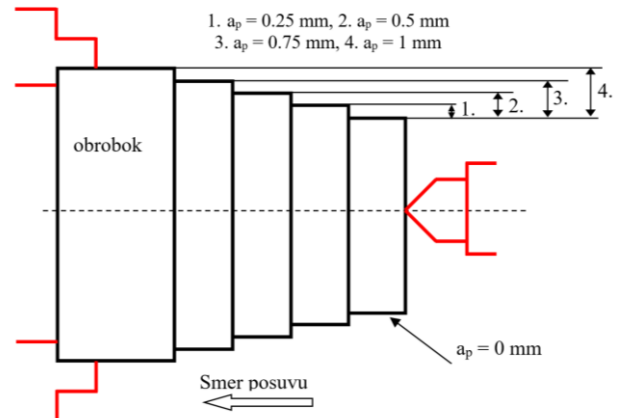
Uhol primárnej plastickej deformácie  $\Phi$  je potom:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\cos \gamma_n}{K - \sin \gamma_n} \quad (2)$$

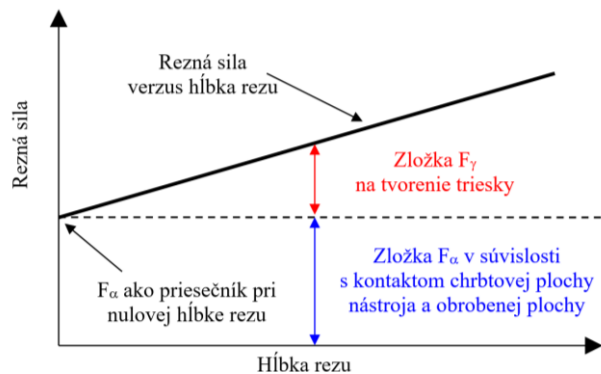
rýchlosť triesky je:

$$v_{ch} = v_c \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma_n)} \quad (3)$$

Sústruženie sa realizovalo na sústruhu SUI 40 za nasledovných rezných podmienok:  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,09$  až  $0,225$  mm a  $v_c = 50$  až  $150$  m·min<sup>-1</sup>. Zložky reznej sily  $F_c$  a  $F_p$  sa merali prostredníctvom dynamometra Kistler, pričom na separovanie zložiek  $F_\gamma$  a  $F_\alpha$  bola použitá metodika stupňovitého hriadeľa, ako ju ukazuje obr. 3. [4].



Obr. 3. Stupňovitý obrobok pre meranie zložiek reznej sily



Obr. 4. Určenie veľkosti zložiek pripadajúcich na vytvorenie nového povrchu a zložiek pripadajúcich na tvorbu triesky

Z nameraných hodnôt  $F_c$  a  $F_p$  je možné prostredníctvom obr. 4 4 určiť veľkosť  $F_{atm}$ , ako aj  $F_\alpha$ , pričom veľkosť zostávajúcich zložiek sa vypočíta podľa rovníc 4 a 5:

$$F_{\square p} = F_p - F_{\square tm} \quad (4)$$

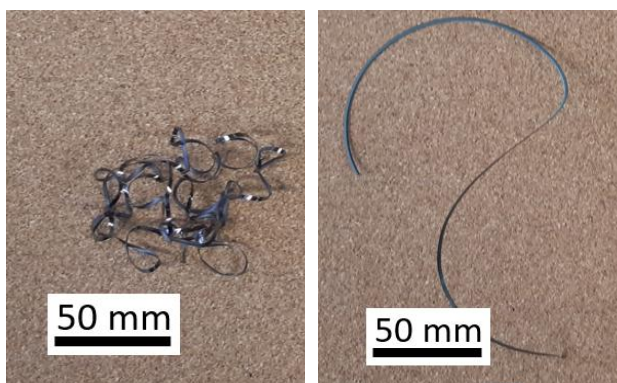
$$F_{\square c} = F_c - F_{\square t} \quad (5)$$

## 2 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

Obrázok 5 ukazuje, že použitie tvarovača triesok SF na reznú platničku P15 zabezpečí vhodný tvar triesok, kedy je trieska rozdelená na segmenty, čo je vhodnejšie pre ich automatizované spracovanie v ďalšom postupe. Naopak, v prípade platničky IC20 vzniká dlhá trieska, ktorá má tendenciu sa namotávať na obrobok ako aj na nástroj.

Hrúbka triesok  $h_c$  pri použití nástroja bez utvárača (IC20) je výrazne vyššia (obr. 6), čo korešponduje aj s vyššou hodnotou  $K$  (obr. 7) a menším  $\Phi$  (obr. 8). Výsledkom je potom aj vyššie  $v_{ch}$  (obr. 9). Podobne sú vyššie hodnoty  $F_c$  a  $F_p$  pre IC20 (obr. 10 a obr. 11).

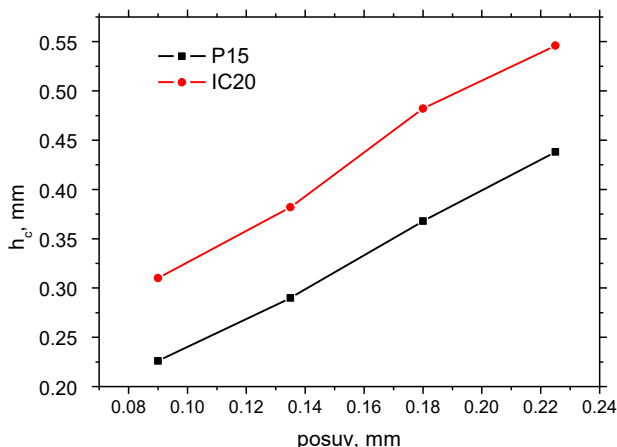
Veľkosť zložiek  $F_\alpha$  a  $F_\gamma$  je následne pre P15 taktiež menšia, ako v prípade IC20 (tab. 1, obr. 12 a obr. 13).



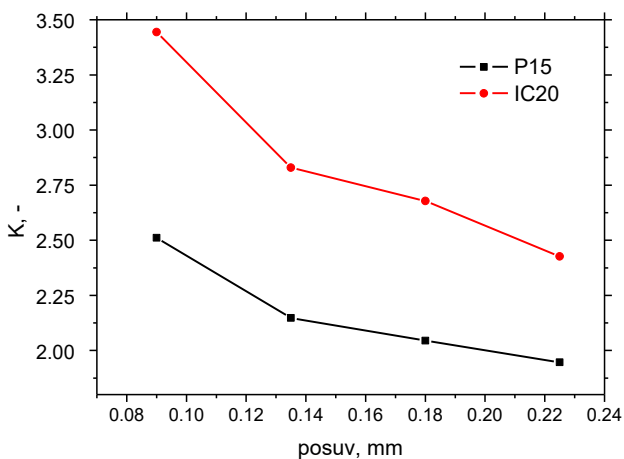
a) P15

b) IC20

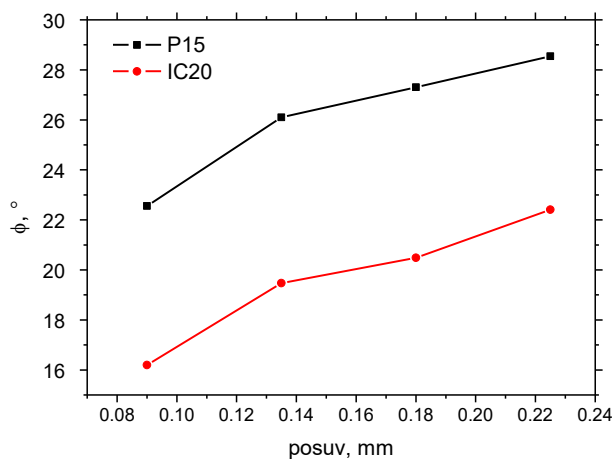
Obr. 5. Triesky pre P15 a IC20,  $f = 0,35$  mm,  $a_p = 1$  mm a  $v_c = 150$  m·min<sup>-1</sup>



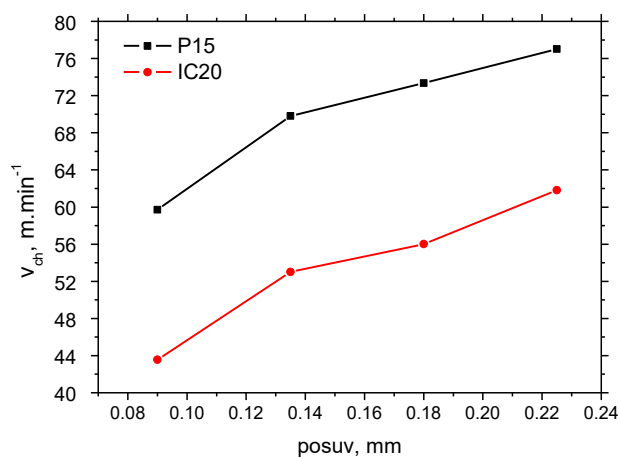
Obr. 6. Hrúbka triesky  $h_c$  ako funkcia posuvu,  $a_p = 1$  mm,  $v_c = 100$  m·min<sup>-1</sup>



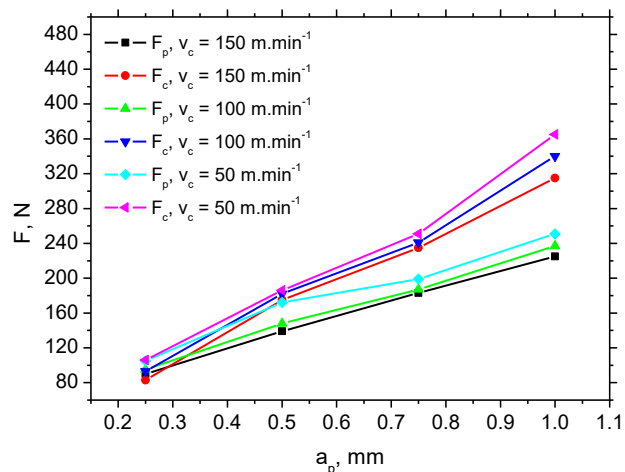
Obr. 7. Stlačenie triesky  $K$  ako funkcia posuvu,  $a_p = 1$  mm,  $v_c = 100$  m·min<sup>-1</sup>



Obr. 8. Uhol primárnej plastickej deformácie  $\Phi$  ako funkcia posuvu,  $a_p = 1$  mm,  $v_c = 100$  m·min<sup>-1</sup>

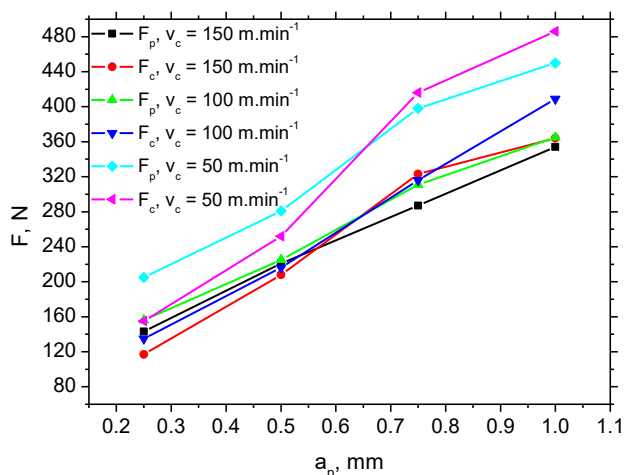


Obr. 9. Rýchlosť odchádzajúcej triesky  $v_{ch}$  ako funkcia posuvu,  $a_p = 1$  mm,  $v_c = 100$  m·min<sup>-1</sup>

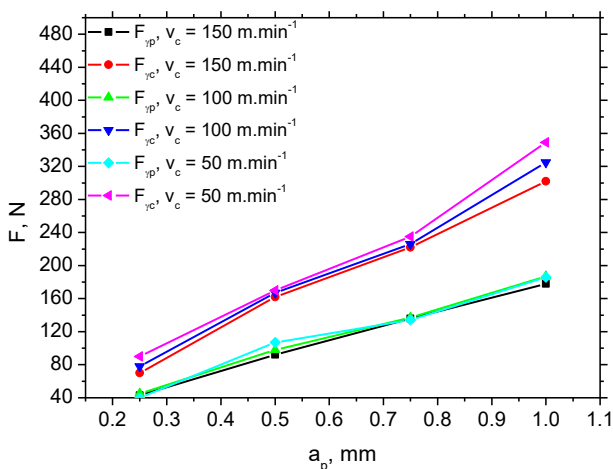


Obr. 10.  $F_c$  a  $F_p$  ako funkcia  $a_p$  pre P15

Výsledky ukazujú, že využitím vhodného utvárača triesok sa znižuje množstvo energie spotrebovanej pri plastickej deformácii triesky, čo je vyjadrené vo vyšších hodnotách  $K$ , hoci energia spotrebovaná na jej tvarovanie je energia väčšia, ako to ukazuje obr. 5.



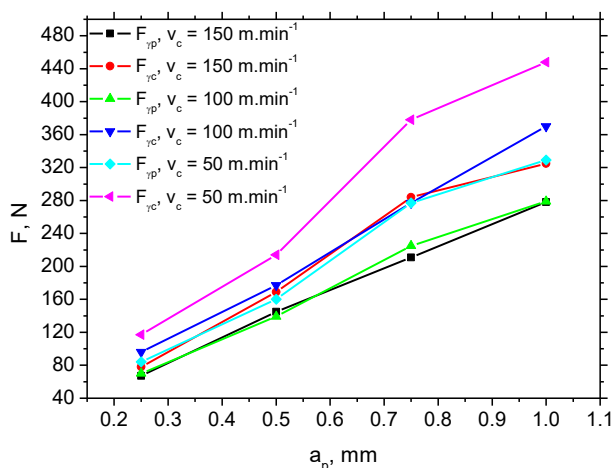
Obr. 11.  $F_c$  a  $F_p$  ako funkcia  $a_p$  pre IC20



Obr. 12.  $F_{\gamma_c}$  a  $F_{\gamma_p}$  ako funkcia  $a_p$  pre P15

Tab. 1.  $F_{\square_{tm}}$  a  $F_{\square_r}$  [N] pre P15 a IC20

	50 m·min <sup>-1</sup>	100 m·min <sup>-1</sup>	150 m·min <sup>-1</sup>
P15 - $F_{\square_{tm}}$	65	50	47
IC20 - $F_{\square_r}$	121	86	76
P15 - $F_{\square_{tm}}$	16	15	13
IC20 - $F_{\square_r}$	39	39	38



Obr. 13.  $F_{\gamma_c}$  a  $F_{\gamma_p}$  ako funkcia  $a_p$  pre IC20

Zložky reznej sily vzhľadom na novovytvorený povrch  $F_{am}$  a  $F_{at}$  zostávajú s veľkosťou hĺbky rezu konštantné. Rastúca veľkosť  $F_c$  a  $F_p$  s hĺbkou rezu  $a_p$  preto ovplyvňuje predovšetkým to, koľko energie sa spotrebuje na tvorenie triesky a s tým spojené hodnoty  $F_{\gamma_c}$  a  $F_{\gamma_p}$ . Zníženie spotreby energie pri tvorení triesky s vhodným utváračom potvrdzuje, že veľkosť zložiek reznej sily na čele  $F_{\gamma_p}$  a  $F_{\gamma_c}$  je väčšia pri aplikácii platničky IC20. Rovnako je veľkosť  $F_{am}$  a  $F_{at}$  vyššia v prípade IC20, ako ukazuje tab. 1, a preto aj potenciálne zmeny napätového a štruktúrneho stavu povrchov budú intenzívnejšie.

## ZÁVER

Geometria reznej hrany ovplyvňuje rezný proces veľmi komplexne. Okrem utvárania triesky má vplyv aj na integritu povrchu, stabilitu procesu rezania, tvorbu tepla, tepelné zaťaženie nástroja i vytvoreného povrchu. Z tohto hľadiska je potrebné proces posudzovať komplexne. Polomer zaoblenia reznej hrany, povlak na reznej hrane, typ utvárača a s ním súvisiaci diagram utvárania triesok limitujú oblasť využiteľných rezných podmienok. Tieto charakteristiky sa taktiež menia v súvislosti s opotrebovaním reznej hrany, čo by malo byť predmetom ďalšieho výskumu.

## Pod'akovanie

Táto štúdia vznikla s finančnou podporou KEGA projektu č. 005 ŽU-4/2025 a VEGA projektu č. 1/0008/25.

## LITERATÚRA

- [1] ČILLIKOVÁ, M. - MIČIETOVÁ, A. - NESLUŠAN, M. (2014): *Trieskové obrábanie*, EDIS – vydavateľstvo ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-0497-4.
- [2] NESLUŠAN, M. et al. (2020): *Decomposition of cutting forces with respect to chip segmentation and white layer thickness when hard turning 100Cr6*. In: *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 50, pp. 475-484.
- [3] ČILLÍKOVÁ, M. et al. (2022): *Analysis of Surface State after Turning of High Tempered Bearing Steel*. In: *Materials*, Vol. 15, No. 5, 1718.

# Giga casting ako technologická revolúcia vo výrobe automobilov

**Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.\***

Katedra technologického inžinierstva Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 01026 Žilina.

E-mail: [danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk](mailto:danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2772

## Giga casting as a technological revolution in automobile production

**Abstract:** *Giga casting* is referred to as a technological revolution in automobile manufacturing. Large *aluminium* castings are increasingly used for the production of automotive vehicles, especially for electric vehicles with low weight and to reduce production costs. Since most of them are structural components loaded quasi-statically, dynamically and cyclically, the quality and quantifiable performance of extremely large *aluminium* castings is crucial for their production. This article briefly analyses the current state of the art in the field of giga castings, some examples of their use in the automotive industry, their benefits and advantages.

**Keywords:** automotive innovation, future of manufacturing, giga casting, aluminium alloys, electric vehicles.

## ÚVOD

*Giga casting* umožňuje pomocou zariadení giga press výrobu obrovských dielcov automobilových súčastí, karosérií a pod. Ide o tlakové liatie *hliníkových* zliatin, ktorým sa vyrábajú rozmerovo veľké odliatky (napr. predná aj zadná časť skeletu karosérie prepojená tzv. integrálnou batériou, vane na batérie a pod.). Termín „*giga*“ odráža tradíciu *Tesly* nazývať svoje výrobné závody „*Gigafactories*“. Iní výrobcovia automobilov opisujú podobné technológie ako megaprocesy s megapressmi. Vo vedeckej literatúre sa hovorí ako o odlievaní ultra veľkých odliatkov.

Cieľom výroby ultra veľkých *hliníkových* odliatkov sú požiadavky automobilového priemyslu na zníženie hmotnosti automobilu, na zlepšenie palivovej účinnosti spaľovacích motorov a hlavne spotrebu energie batérií v elektrických vozidlách [1].

Používanie *hliníkových* zliatin v automobilovom sektore podľa [2] zaznamenalo za posledné štyri desaťročia obrovský rast s minimálne 3,5 % ročnou mierou rastu. Hmotnostný podiel *hliníkových* odliatkov v automobile výrazne narastá. Ako elektrifikácia vozidla napreduje, zrýchľuje sa dopyt najmä *hliníkových* tvarovo komplikovaných odliatkov. Tento trend je poháňaný potrebou kompenzácie hmotnosti, napr. veľkých akumulátorov/batérií s cieľom predĺžiť jazdu rozsah vozidiel. V priebehu ostatných rokov sa *hliníkové* tvarové odliatky používali hlavne v hnacom ústrojenstve motora ako sú bloky motorov, hlavy valcov na komponenty prevodovky, puzdrá atď. V

súčasnosti dochádza k prechodu na karosérie a podvozky vozidla, najmä na vane batérií elektrických vozidiel, s cieľom znížiť aj výrobné náklady [2].

Cieľom článku je poskytnúť kritickú analýzu kľúčových faktorov, ktoré ovplyvňujú kvalitu, mikroštruktúru a vlastnosti takto vyrobených odliatkov, načrtnúť príležitosti a výzvy danej technológie.

## 1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

Výhodami a benefitmi technológie *giga castingu* sú:

- Zjednodušená výroba:** umožňuje vytváranie veľkých integrálnych dielov, ktoré nahrádzajú viacero menších komponentov, čo zjednodušuje proces montáže. Toto *skraca* výrobný čas, *minimalizuje zložitost' dodávateľského reťazca* a *znižuje náklady na pracovnú silu*, vďaka čomu je výrobný proces efektívnejší. Udáva sa zníženie počtu dielov (o 60+), ktoré sa predtým museli jednotlivito lisovať, vytláčať, odlievať apod. a zostavovať do subsystému karosérie t. j. *giga* odliatky umožňujú znížiť hmotnosť karosérie, vozidiel, zjednodušiť výrobu nahradením veľkého množstva dielov a pod. [3, 4].
- Zlepšená štruktúrna integrita odliatku:** jednotlivé komponenty majú zvýšenú tuhosť a tým aj odolnosť a vyššiu bezpečnosť vozidla.
- Zníženie hmotnosti:** znížením počtu dielov a zvarov znižuje technológia aj celkovú hmotnosť vozidla. To je výhodné najmä pre elektrické

vozidlá, pretože ľahšie autá majú väčší dojazd a vyššiu energetickú účinnosť.

- d) *Zníženie nákladov do investícií nástrojov:* udáva sa cca 40 %.
- e) *Flexibilita inovatívneho dizajnu:* umožňuje vytvárať jedinečné štrukturálne tvary, ktoré je ťažké alebo nemožné dosiahnuť tradičnými metódami [3, 4].

Možnosti využitia *ultra veľkých hliníkových odliatkov.*

Príekopníkom v *giga castoch* bola automobilka *Tesla*, ktorá cca pred 3 rokmi začala používať *giga casty* na predné a zadné časti automobilu v modeli *Y* (obr. 1) [5].



Obr. 1. *Tesla*, model *Y* s *giga* odliatkami [5]

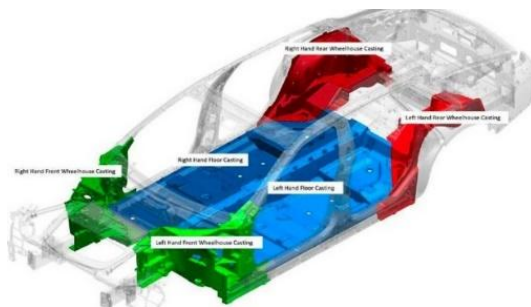
Tieto dva odliatky nahradili 171 dielov (väčšinou plechové výlisky spolu s niektorými menšími odliatkami), eliminovalo 1600 zvarov, a odstránilo sa 300 robotov. Oba diely sú vyrábané technológiou *HDPC* s 6000 t uzamykacou silou [6].

*General Motors* použil šesť *hliníkových* ultra veľkých odliatkov na vytvorenie jedného celku spodnej konštrukcie karosérie pre vozidlo *Cadillac Celestiq* [7] (obr. 2). Každý *giga* odliatok nahradil viac než 30 jednotlivých dielov. Tieto komponenty tvoria prednú a zadnú konštrukciu spolu s dvoma odliatkami dlhými 2,5 metra, ktoré sú zlepené a bodovo zvarené, aby vytvorili jednotnú podlahovú dosku (obr. 2 b). Tento konštrukčný model umožňuje použiť pri opravách už dnes osvedčené postupy. Podobne uvažuje aj *Toyota*, ktorá zvažuje použitie *giga* liatia, ale spôsobom, ktorý by nepredražoval a nekomplikoval opravy. Karoséria by sa tak skladala z väčšieho počtu odliatkov, ako je to pri *Tesle*.

Automobilka *Mercedes Benz* na odľahčenie *giga* odliatkov začala používať aj bionický dizajn materiálu, ktorý tvorí jadro *giga* odliatkov (obr. 3 a obr. 4).

V rámci informácie je tiež nutné dodať, že sa na *Slovensku* začala sa výstavba novej továrne *Volvo*, ktorá bude využívať technológiu *giga* press s uzamykacou silou 9000 t. Ultra veľké odliatky by sa mali vyrábať pre elektrické vozidlá *Volvo*.

Dostupnosť konkrétnych informácií o *giga* odliatkoch je veľmi strohá, množstvo informácií je utajených.



a) [1]



b) [3]

Obr. 2. *Cadillac Celestiq* s *giga* odliatkami, ktoré tvoria spodnú konštrukciu karosérie, rám podvozku.



Obr. 3 Mercedes Benz s príkladom *giga* odliatku [3]



Obr. 4 Príklad bionického dizajnu materiálu [3]

### 1.1 Výzvy s ultra veľkými hliníkovými odliatkami

Výzvy sú spojené s mimoriadne veľkými *hliníkovými* odliatkami napriek príležitostiam a niektorým výhodám, ako už bolo v predchádzajúcom spomenuté. Výzvy súvisia hlavne s kvalitou týchto odliatkov.

Proces výroby kvalitného ultra veľkého *hliníkového* tvaru odliatku je mimoriadne náročný nielen kvôli veľkosti *giga* odliatku (~1 ÷ 2 m × 1,5 ÷ 2 m × 0,5 m), ale súvisí aj s obrovskou maticou/formou na jeho

výrobu. Napríklad vysoká uzatváracia sila *giga* pressu (plocha odliatku viac ako 1,5 m<sup>2</sup>), obrovské prídavné zariadenia roboty/žeriavy atď. Veľkosť matrice a najmä teplotný režim formy sú veľkou výzvou.

Taktiež problematickým sa ukazuje *proces tuhnutia giga* odliatkov. Počas procesu odlievania hrubšie časti odliatkov prirodzene vychladnú a stuhnú oveľa pomalšie ako tenšie časti. Výsledkom je väčšie zmrašťovanie, vznik pórovitosti a iných zlievarenských chýb. Okrem toho, obrovské veľkosti *giga* odliatkov vedú k dlhšej vzdialenosti toku kovu. Uvedený fakt má za následok taktiež viac chýb odliatkov, ako napr. je zachytený vzduch, oxidy a pod. Komplikovanosť odliatkov so zložitými geometriami, integrovanými výstupkami, hlbokými rebrami, rôznymi hrúbkami stien, dlhou dĺžkou toku na vyplnenie celej dutiny *giga* odliatku vytvára podmienky na vznik veľkého množstva tepelných uzlov, studených spojov, externe stuhnutých kryštálov a pod. Množstvo kovu vtlačaného *giga* *pressmi* do dutiny formy sa pohybuje turbulentne, čo výrazným spôsobom zvyšuje reoxidačné procesy a tým aj tvorbu oxidov.

Mnoho ďalších aspektov procesu (napr. vákuum, mazanie formy, tepelný manažment formy, vyhadzovanie dielov atď.) je oveľa komplikovanejšie pri *giga* odliatkoch. Preto je mimoriadne náročné vyrobiť napr. celú prednú/zadnú časť, spodok karosérie alebo vane na batérie ako jeden obrovský vysokokvalitný odliatok. Miera vratného materiálu vzhľadom na zdravosť odliatkov môže byť veľmi vysoká [1].

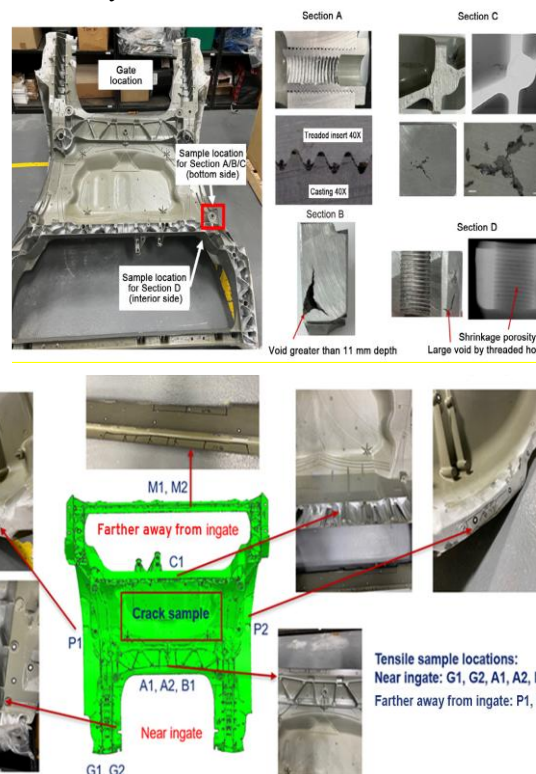
Z uvedených skutočností je možné konštatovať, že proces výroby *giga* odliatkov je náchylný na vznik množstva chýb. A preto najväčšími výzvami sú predikcia kvality odliatkov.

## 2 PRÍKLADY HODNOTENIA GIGA ODLIATKOV

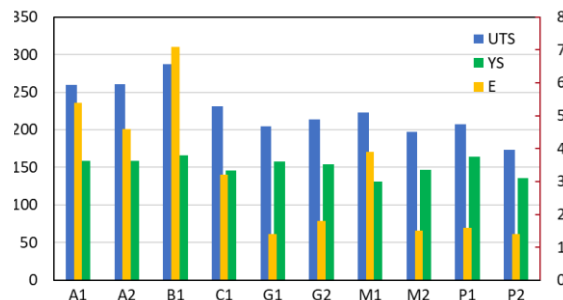
Keďže je veľmi málo publikovaných literárnych zdrojov s analýzou chýb a hodnotením reálnych problémov, prezentujem iba jeden *giga* odliatok (obr. 5) s popisom chýb v rôznych častiach. Identifikované boli stiahnutiny, pórovitosť a zahľtený plyn.

Dosiahnutie rovnakých, resp. podobných vlastností v hodnotených častiach *giga* odliatku napr. mechanických vlastností, bude veľmi náročné ako ukazuje obr. 6. Ako je možné vidieť, mechanické vlastnosti sa výrazne líšia v rôznych hodnotených miestach. Medza pevnosti v ťahu (UTS) sa pohybuje od 175 do 280 MPa, ťažnosť (E) od cca 1 % do 8 %, čo sú veľmi veľké rozdiely v mechanických charakteristikách. Medza klzu (YS) má relatívne stabilné hodnoty. Tieto veľké zmeny mechanických vlastností (zvlášť nízka pevnosť a ťažnosť) sa

pripisujú zlej kvalite odliatku, najmä prítomnosťou množstva chýb odliatkov.



Obr. 5. Analýza chýb v rôznych častiach *giga* hliníkového odliatku [1].



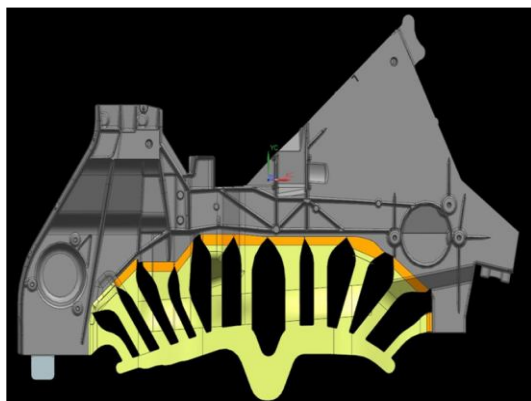
Obr. 6. Mechanické charakteristiky v rôznych miestach *giga* odliatku [1].

### 2.1 Návrh vtokovej sústavy pre *giga* odliatky - jednoduchá prípadová štúdia

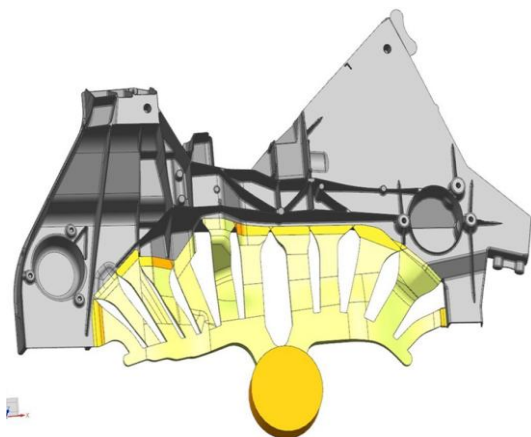
Návrh vtokového systému je veľmi dôležitý. Ako je všeobecne známe, optimálny dizajn vtokovej sústavy môže výrazne znížiť turbulentné prúdenie roztaveného kovu, čím sa minimalizuje množstvo plynu a *reoxidačných* spodín. Pre výrobu kvalitných hliníkových odliatkov, sa musí použiť návrh pretlakového vtokového systému. Vo všeobecnosti, rýchlosť taveniny počas plnenia formy by sa mala udržiavať pod kritickou rýchlosťou 0,5 m·s<sup>-1</sup> [8], aby sa zabránilo turbulenciám taveniny a strhávaniu oxidického filmu.

Malé zmeny napr. v zaústení vtokovej sústavy, hrúbky zárezov a pod. medzi príkladmi a) = 1 na grafe 7c a b) = 2 môže viesť napr. k odlišnému množstvu unášaného vzduchu počas plnenia formy, ako je

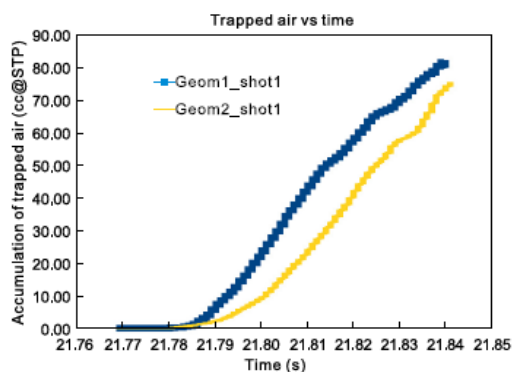
znázornené na obr. 7c. Návrh 2 pravdepodobne znižuje zachytený vzduch počas fáz plnenia pomocou napr. použitím širších zárezov.



a)



b)



c)

Obr. 7. Návrh 2 typov zaústení vtokových sústav pre *giga* odliatky a), b), c) integrálne porovnanie zachyteného vzduchu medzi dvoma konštrukčnými typmi vtokových sústav [1]

Pre *HPDC* je však potrebné dokončiť plnenie formy v priebehu krátkeho času. Minimálna rýchlosť taveniny v prítokoch sa zvyčajne riadi okolo  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , čo je 80-krát viac ako kritická rýchlosť. Obrázok 7 zobrazuje príklad dvoch návrhov vtokových sústav pre odliatky.

## 2.2. Teplota formy

Kvôli zložitosti geometrie *giga* odliatkov a meniacej sa hrúbky steny v odliatku, ideálna teplota formy by nemala byť rovnaká v celej dutine formy. Na dosiahnutie

ideálneho rozloženia teploty formy je odporúčaný systém ohrevu a chladenia t.j. lokálny teplotný manažment.

## 2.3 Teplota liatia

Na dosiahnutie optimálnej kvality odliatku a požadovaných mechanických vlastností sa odporúča cca o  $50^\circ\text{C}$  až  $100^\circ\text{C}$  vyššia ako teplota tavenia zliatiny. Súvisí to s oveľa dlhšou vzdialenosťou toku kovu v porovnaní s bežnými odliatkami. Stanovenie optimálnej teploty liatia je veľmi dôležité nielen pre kvalitu odliatkov, ale aj pre životnosť formy.

Rýchlosť a čas liatia, spôsob ochrany formy, lineárne zmráztenie a zmeny rozmerov *giga* odliatkov, ale aj ďalšie technologické parametre sú veľmi dôležité k odlievaniu zhodných a kvalitných odliatkov, ale v článku nebudú rozoberané.

## 2.4 Uhlíková stopa a udržateľnosť

Na výrobu *giga* odliatkov sa odporúča používanie primárnych zliatin, bez vratného materiálu čo robí z výroby proces vysokou uhlíkovou stopou. Preto je snahou zvýšiť podiel vratného materiálu vo vsádzke. Napr. Volvo uvádza, že jeho projekt *giga casting* by chcel výrobu udržateľnosti uhlíkovej neutrality dosiahnuť do roku 2040 [9].

Taktiež opravy *giga* odliatkov automobilov by boli veľmi nákladné a časovo náročné. Na rozdiel od opravy vozidla bez *giga* odliatkov môže mechanik jednoducho odstrániť a vymeniť poškodenú časť [4, 10]. Na vyriešenie tejto výzvy je potrebné navrhnuť *giga* odliatok „na opravu“. Napríklad *General Motors* navrhli dizajn ultra veľkého jednodielneho odliatku s jednoduchou opravou zahŕňajúcou aspoň jednu vopred definovanú vymeniteľnú časť integrálne odliateho hlavného telesa [8, 11]. Poškodená vymeniteľná časť by sa z hlavného telesa vyrezala. Vyrezané poškodené vymeniteľné diely môžu byť nahradené náhradným dielom, ktorý má rovnakú geometriu, rozmery a mechanické vlastnosti ako nepoškodená vymeniteľná časť. Náhradná časť môže byť pripojená k hlavnej časti napr. skrutkovaním alebo zvaráním.

Udržateľnosť súvisí so znížením hmotnosti vozidiel a tým môže pomôcť znížiť emisie  $\text{CO}_2$  počas jeho prevádzkového životného cyklu. Tento prístup však môže výrazne zvýšiť skleníkové plyny zvýšením výroby primárnej hliníkových zliatin pre *giga* odliatky. Použitie recyklovaných hliníkových zliatin namiesto primárnych môže viesť k cca 90 % zníženiu emisií  $\text{CO}_2$ .

## 3 SÚHRN POZNATKOV

Niektoré fakty o *giga castingu*:

- výroba odliatku zvyčajne trvá približne dve minúty,

- výrobca vozidiel, ktorého cieľom je ročná produkcia 500-tisíc batériových elektrických vozidiel, ktoré zahŕňajú diely pre zadnú časť auta, by potreboval štyri až päť *giga* lisov,
- ročná produkcia týchto komponentov môže predstavovať približne 120-tisíc dielov v závislosti od veľkosti závodov,
- dizajnové aspekty tlakového liatia: hrúbka steny: 2 mm ÷ 5 mm, čo umožňuje optimálne stuhnutie a pevnosť,
- výber zliatin pre *giga* odliatky s dôrazom na proces bez tepelného spracovania,
- mechanické vlastnosti:  $R_m = 200$  MPa,  $R_{p0.2} = 135$  MPa,  $A = 8$  %,
- manažment vyrovnávania mega odliatkov,
- možnosti merania a pod.

## ZÁVER

Ultra veľké hliníkové odliatky poskytli nové trendy v automobilovom priemysle, a môžu spôsobiť revolúciu v návrhoch a výrobe konštrukcie karosérie vozidiel. V súčasnosti sa tieto odliatky používajú hlavne na odliatky spodnej konštrukcie karosérie. Nahradia desiatky a stovky malých súčiastok vyrábaných lisovaním, odlievaním a pod. Odstránia sa procesy zvarovania, čo zjednoduší výrobu; zníži sa hmotnosť ultra veľkých odliatkov oproti štrukturálnym odliatkom a predpokladá sa úspora nákladov.

Napriek mnohým lákavým výhodám, aplikácia ultra veľkých odliatkov predstavuje určité problémy, ako napr. dosiahnutie kvality odliatkov a rozmerových tolerancií v celom odliatku, použiteľnosť a udržateľnosť materiálov. Opraviteľnosťou možno zlepšiť udržateľnosť ultra veľkých hliníkových odliatkov prostredníctvom prijatia návrhu koncepcie opravy a použitia udržateľných (recyklovaných) hliníkových zliatin. Kvalitu týchto odliatkov a mechanické vlastnosti možno pozitívne upraviť optimálnou konštrukciou vtokového systému a optimalizáciou procesu odlievania pomocou nástrojov virtuálneho odlievania [1].

Napriek týmto pokrokom, niektorí kritici vyjadrujú obavy z možných problémov s kvalitou a flexibilitou súvisiacimi s touto metódou. Keďže však priemysel zápasí s udržaním ziskovosti pri rastúcich nákladoch na suroviny, čoraz viac sa spolieha na takéto inovatívne riešenia [2].

Záverom možno konštatovať, že *giga casting* je viac než len výrobná metóda, predstavuje transformačný prístup, ktorý rieši viacero výziev v automobilovom priemysle. Umožňuje spoločnostiam vyrábať vozidlá, ktoré sú nielen štrukturálne lepšie a ľahšie, ale aj esteticky odlišnejšie a šetrnejšie k životnému prostrediu. S neustálym vývojom tejto technológie bude hrať kľúčovú úlohu pri formovaní budúcnosti automobilového dizajnu a výroby.

## Pod'akovanie

Tento článok bol vytvorený s podporou projektu KEGA 003ŽU-4/2024.

## LITERATÚRA

- [1] WANG, Q.-G. - WANG, A. - CORYELL, J. (2024): *Advanced Materials Technology & Virtualization*. GM Global Technical Center, Warren, MI USA, China Foundry, N.5, s. 397-408.
- [2] DUCKER FRONTIER (2020): *North America light vehicle aluminum content and outlook*. In: Final Report Summary: July.
- [3] FARSHID HESAMI: <https://www.linkedin.com/pulse/giga-casting-presses-automotive-industry-farshid-hesami-jmumf/>
- [4] HARTLIEB, A - HARTLIEB, M. (2023): *The impact of giga-castings on car manufacturing and aluminum content*. <https://www.lightmetallage.com/news/industry-news/automotive/the-impact-of-giga-castings-on-car-manufacturing-and-aluminum-content>, July 10.
- [5] HARDIGREE, M. (2023): *How Tesla made 'gigacasting', the most important word in the car industry*. <https://www.theautopian.com/how-tesla-made-gigacasting-the-most-important-word-in-the-car-industry>, Sept. 14.
- [6] ABRAHAM, A. K. (2023): *Automotive materials in an evolving landscape*. Ducker Carlisle, January 24.
- [7] MIHALASCU, D.(2022): *Cadillac takes a page from Tesla's book, uses mega castings on Celestiq*. <https://insideevs.com/news/617108/cadillactakes-page-from-tesla-book-uses-mega-castings-on-celestiq>, October 18.
- [8] GAO, Y. - LIAO, H. - SUO, X. (2019): *Prediction of fluidity of casting aluminum alloys using artificial neural network*. In: Proceedings of Materials Science & Technology (MS&T 2019), Sept. 29-Oct. 3, Portland USA.
- [9] ZHAN, H. - ZENG, G. - WANG, Q. et al. (2023): *Unified cast (UniCast) aluminum alloy - Resolving sustainability paradox material solution for vehicle lightweighting*. In: Journal of Materials Science & Technology, Vol. 154, pp. 251-268.
- [10] SCHUH, G. - BERGWELER, G. - DWOROG, L. et al. (2022): *Opportunities and risks of megacasting in automotive production – The aluminum die-cast body in white*. Düsseldorf: VDI Fachmedien, [www.researchgate.net/publication/363880399](http://www.researchgate.net/publication/363880399), September.
- [11] WILSON, D. J. - WANG, L. - WANG, Q. et al. (2023): *Repair ultra-large casting*. US Patent Application, No.: 20230356293.

# Opotrebenie strižníkov a ich ostrenie

**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

**Borislav Melo, Ing., PhD.**

Viena International, spol. s r. o.  
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin  
E-mail: melo@viena.sk

## Wear and tear of shears and their sharpening

**Abstract:** The paper focuses on the issue of shear wear. Theoretical foundations are presented and an analysis of the issue of sharpening the active parts of the shear tool is also described. Sharpening the shears themselves is an important part of repairing shear tools and their required starting position before setting them on the press.

**Keywords:** shear, forming tool, wear, sharpening.

## ÚVOD

Kvalitu strižnej plochy ovplyvňuje okrem miery otupenia takisto vôľa medzi činnými dielmi – nožmi nožníc, strižníkom a strižnicou. Vždy pri strihaní plechov sa vytvárajú dve nové plochy, čiže pôvodná plocha sa zväčší o 100 %. V nasledovnom texte je poukázané na problematiku nesprávneho vyhotovenia strižného nástroja a problematiku ostrenia činných dielov.

## 1 TEORETICKÉ POZNATKY

Optimálna strižná medzera je nosným meradlom kvality strižného nástroja a rozhodujúco vplýva na trvanlivosť strižnej hrany a na celkovú životnosť činných dielov nástroja. Pri určení strižnej medzery sa vychádza zo strižnej vôle. Strižná vôľa je rozdiel rozmerov strižnice a strižníka v zodpovedajúcom mieste prierezu, čiže je to v podstate vzdialenosť strižníka od hrany strižnice pri jeho zasunutí v ľubovoľnom mieste. Optimálna strižná medzera je rovnaká po celom obvode strižníka (strižnice) a podľa obr. 1 sa rovná polovici strižnej vôle. Veľkosť strižnej medzery závisí najmä od hrúbky strihaného materiálu a jeho mechanických vlastností. Za optimálnu strižnú medzeru sa môže považovať medzera, ktorá je rovnomerná po celej dĺžke krivky strihu a docieli sa pri nej požadovaná kvalita strižnej plochy pri vynaložení minimálnej sily a práce.

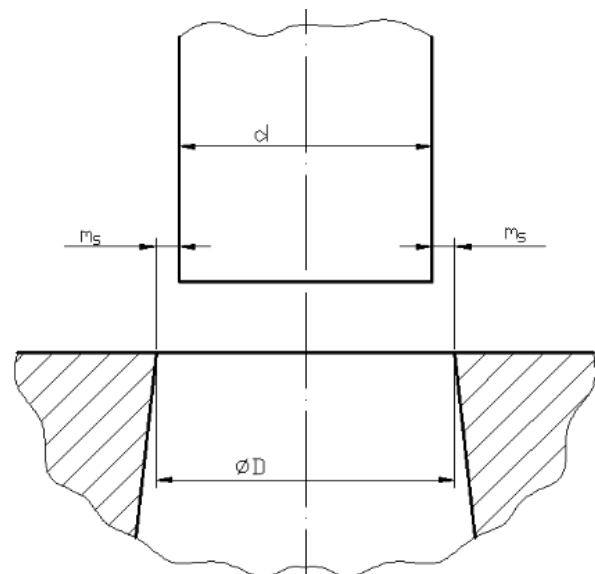
Zmenšovaním strižnej medzery sa zväčšuje strižná sila a strižná práca, pričom prírastok sily nie je veľký, ale prírastok práce môže dosiahnuť až plus 40 %.

Veľkosť strižnej medzery sa dá stanoviť podľa vzťahov overených a získaných experimentálne:

$$m_s = (t - h_v) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

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

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

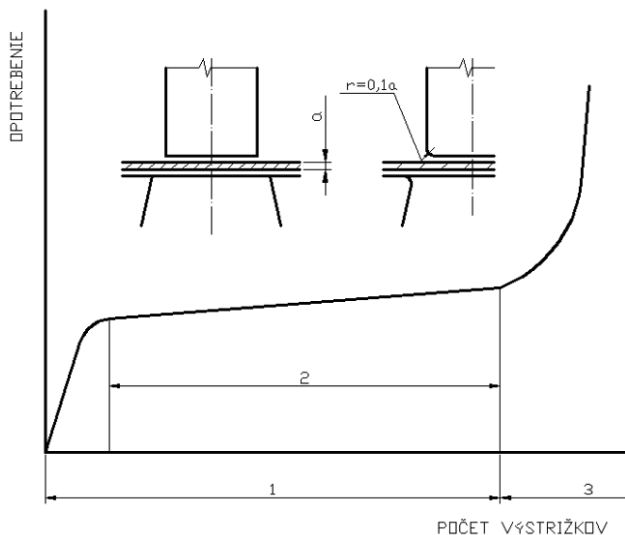


Obr. 1 Strižná medzera a strižná vôľa

## 2 PROBLÉM A JEHO RIEŠENIE

V technologickej praxi sa vyskytujú rôzne chyby strižných nástrojov. Môže ísť o deformácie činných

dielov po tepelnom spracovaní, nerovnakú tvrdosť strižných hrán, nerovnaký úkos v strižnici. Ďalšia skupina sa týka vôle - nerovnaká strižná vôľa, voľne zalícované vodidlo (vedenie vo vodiacej doske), veľká vôľa medzi vodiacou doskou a strižnicou - materiál sa pri práci deformuje, nadmerne veľká vôľa vo vodiacej doske a strižnici. Nedostatky a chyby na strižných nástrojoch môžu byť spôsobené nesprávnym spôsobom výroby, zlým zoradením, zlou kvalitou strihaného materiálu, opotrebovaním nástroja a zlým stavom tvárniaceho stroja. Predpokladom je, že konštrukčné riešenie nástroja je správne. Faktom je, že napriek tomu, že nástroj je správne zoradený a kvalitne vyrobený prejaví sa po istom čase a počte strihov vplyv otupenia strižných hrán. Za tupé sa strižné nástroje považujú vtedy ak sú tupé ich strižné hrany. Otupenie sa zjednodušene predstavuje ako zaoblenie strižnej hrany, t.j.  $r \geq 0,1 \cdot t$ . V prevažnej miere ide v tomto prípade o opotrebovanie adhéziou.



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

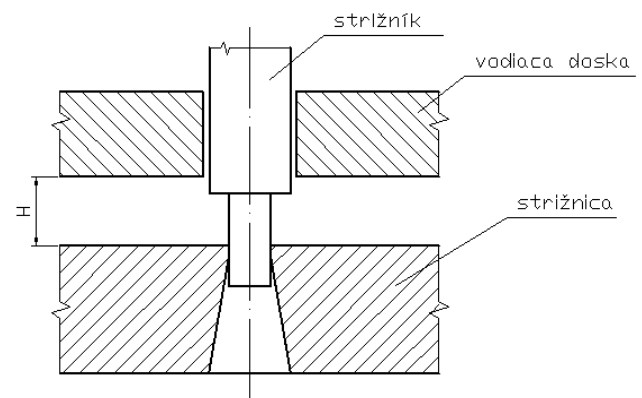
### 3 ANALÝZA

Príčinou zlého stavu činného dielu nástroja môže byť:

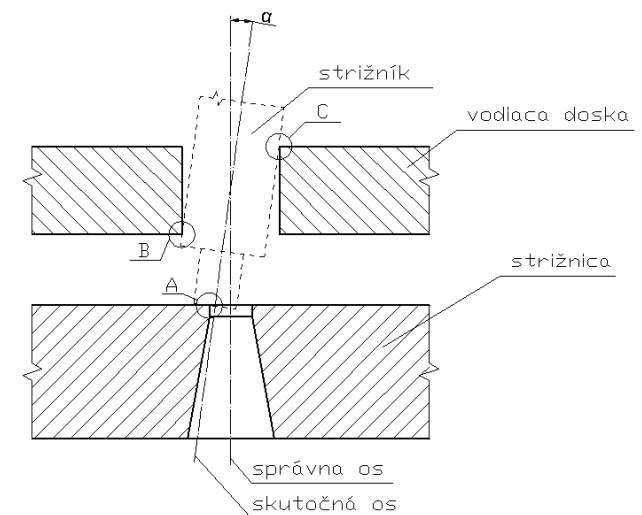
- nesprávne zoradenie na lise,
- nerovnomerné rozdelenie strižnej vôle po obvode strižníka (strižná medzera),
- nesprávna montáž nástroja po naoštrení.

V konkrétnom prípade, [7] ale nešlo ani o jednu z týchto príčin. Po detailnom skúmaní sa zistilo pri meraní dielov strihacieho nástroja, že vedenie pre driek strižníka vo vodiacej doske je síce zhotovené presne z hľadiska rozmeru, ale z hľadiska jeho umiestnenia voči ostatným otvorom je posunutú v x-ovej osi o 0,067 mm. Vodiaca doska sa vyvločkovala a opätovne sa zhotovila diera pre vedenie strižníka.

So strižníkom bolo zhotovených 2900 výstrižkov. Hrana bola opotrebovaná rovnomernejšie. Určenie chyby, jej analyzovanie a odstránenie spolu s úpravou bolo urobené správne. Obrázok 3 schematicky zachytáva optimálny stav nástroja a obr. 4 nevhodné pracovné podmienky procesu strihania.



Obr. 3. Optimálny stav - strižník je v osi vodiacej dosky aj otvoru strižnice, H - vedenie materiálu/pásov plechu)



Obr. 4. Schéma mechanizmu vzniku prídavných napätí a nadmerného jednostranného opotrebovania strižníka následkom nezhodnosti osí činných dielov, A - oblasť nadmerného opotrebovania strižnej hrany, α - uhol vychýlenia skutočnej osi od správnej osi, B, C - miesta nadmerného namáhania tela strižníka, vznik prídavných napätí

#### 3.1 Geometrické parametre strižníkov a strižníc

Nástroj - v tomto prípade strižník je potrebné chápať ako geometrické teleso v pokoji. Činná časť (časti) je tá časť, ktorá umožňuje proces strihania. Tvoria ju podľa obr. 5 - strižná hrana, os nástroja, základná plocha.

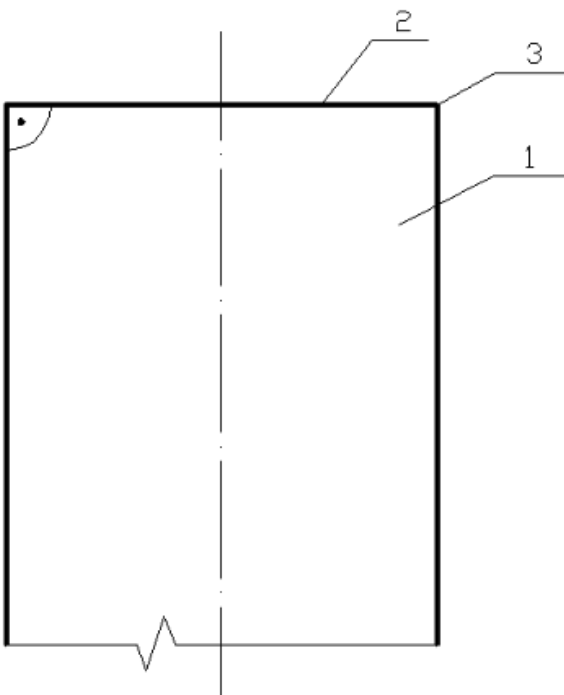
Oštrenie nástrojov je obrábanie brúsnym kotúčom, ktorého brúsne zrná majú definovanú veľkosť, ale nie sú orientované. Technologické charakteristiky takéhoto rezného nástroja (brúsneho kotúča) majú náhodný charakter. Výsledkom obrábania je obrobený povrch ako sústava rovnobežných stôp po jednotlivých zrnách. Zrná režu z povrchu brúsenej

plochy materiál vo forme triesok. Brúsiace zrná majú záporné uhly čela a rezná rýchlosť je vysoká. Následkom je vznik intenzívnej plastickej deformácie a vyvíja sa značne vysoké množstvo tepla v zóne rezania. Pri nepriaznivej orientácii brúsiacich zrn sa trieska taví, čo svedčí o vysokých teplotách v oblasti rezania. Teplota rezania je dôležitou charakteristikou procesu ostrenia nástrojov. Jej veľkosť je závislá od rezných podmienok, druhu brusiva a chladiaceho média. Nástroje z rýchlorezných ocelí sa nachádzajú pri ostrení v metastabilnom stave, preto teplota v mieste styku s brúsiacim kotúčom môže ovplyvniť ich štruktúru. Odbruši sa len hrúbka max. 0,3 mm. Zdôvodnenie je v [2] na strane 107. Pokiaľ ide o ostrenie strižníkov z praktických poznatkov autora z prevádzky je potvrdené, že optimom je odbrusenie iba 0,2 mm. Výdatné chladenie je nevyhnutné a tiež v prípade odstupňovaných strižníkov sa nesmie zabudnúť na to, že z každého strižníka sa musí odbrušiť rovnaký rozmer. Platí zásada - viac ostrení je výhodnejšie ako odbrusenie veľkej triesky na jeden raz. Pri väčšom počte ostrení sa skôr zachytí chyba nástroja ako vtedy, keď je značné opotrebovanie strižnej hrany.

vyhotovenia nástroja ako v ilustrovanom prípade sa nedá nastaviť optimálnu strižnú medzeru.

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2018): *Analýza nadmerného opotrebovania strižníkov*. 7 strán.
- [2] VASILKO, K. - MICHEL, D.- HRUBEC, J. (1984): *Brúsenie a ostrenie kovových materiálov*. ALFA Bratislava. Bratislava
- [3] KOS, F. - KRŇÁK, R. - JONÁŠ, M. (1985): *Kvalifikační příručka nástrojaře*. Práce Praha, s. 86-88.
- [4] MORAVEC, J. (2000): *Strihanie technických materiálov*. EDIS-vydavateľstvo ŽU v Žiline, Žilinská univerzita v Žiline
- [5] DOBROVOLNÝ, B. (1965): *Nástrojář pro výrobu a opravu lisovacích nástrojů a přípravků*. SNTL Praha, s. 37-65
- [6] DOBROVOLNÝ, B. (1975): *Nástrojářství*. SNTL Praha, 83 strán.



Obr. 5. Schéma strižníka, 1 - os nástroja, 2 - základná plocha, 3- strižná hrana

## ZÁVER

Príspevok sa zaoberal problematikou strihacích nástrojov. Nedá sa podceňovať správne zoradenie nástroja a jeho nastavenie. Dôležité je strihací nástroj sledovať a zaznačovať jeho vonkajšie prejavy, t. j. rovnomernosť rozdelenia opotrebovania strižných hrán, sledovať jeho výkonnosť teda počet vyrobených výstrižkov do opotrebovania. V prípade nesprávneho

---

# Analýza stavu povrchu po shot peenovaní duplexnej ocele AISi 318

---

**Miroslav Neslušan, 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

**Zuzana Florková, Ing., PhD.**

Výskumné centrum,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: zuzana.florkova@uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 7632

## Analysis of surface state after shot peening duplex steel AISi 318

**Abstract:** This paper deals with surface integrity and the corresponding stress state as well as surface topography after shot peening of duplex steel AISi 318 under the variable shot-peening conditions such as number of passes and applied air pressure. It was found that the energy of shot impacts is consumed mainly by austenitic phase whereas the ferritic one is less affected. High magnitude of residual stresses is developed under the higher number of cycles as well as for the higher media pressure. Amplitude of compressive residual stresses in austenite is more as that for ferrite one. Surface roughness is decreasing along with the number of shot peening cycles and the typical crater-like surface is produced.

**Keywords:** duplex steel, residual stress, shot peening

---

## ÚVOD

*Shot - peening (SP)* je proces, kedy je povrch bombardovaný obvykle oceľovými guľôčkami, ktorých vysoká kinetická energia sa premieňa na deformačný proces v povrchu, ktorý je vystavený tomuto procesu. Energia, ktorá sa spotrebováva v takomto povrchu výrazne závisí od jeho mechanických vlastností, ako je medza klzu, medza pevnosti, ťažnosť a podobne. Veľkosť tejto energie je možné orientačne určiť z údajov získaných počas jednoduchého ťahu, avšak pri SP je napätový stav oveľa komplikovanejší, a preto skutočná energia spotrebovaná počas SP je reálne vyššia. Tento proces výrazne zvyšuje dislokačnú hustotu v povrchu, s tým súvisiacu jeho mikrotvrdosť, odolnosť voči cyklickému zaťažovaniu alebo koróznou odolnosť [1, 2]. V prípade dynamického guľôčkovania je taktiež charakteristickým javom u niektorých duplexných oceľí aj premena austenitickej zložky na deformačný martenzit, ako aj výrazná zmena dislokačnej hustoty v oboch fázach [3]. Rozsah týchto zmien je primárne riadený energiou (ako to už bolo vyššie uvedené), ktorá je vložená do povrchu počas dynamického guľôčkovania. Táto energia je predovšetkým funkciou času, počas ktorého je povrch vystavený účinku guľôčok a tlaku média.

Okrem toho dochádza k výraznej zmene stavu povrchu s ohľadom na veľkosť zvyškových napätí. Pre SP je charakteristické, že napätia sú tlakové a zasahujú do relatívne veľkej hĺbky (cca 0,2 mm) v závislosti od podmienok SP, čo má priaznivý vplyv na odolnosť povrchovej vrstvy, keď je tento vystavený dynamickému zaťaženiu [2, 4] alebo korózii [5]. Na druhej strane je pre proces SP charakteristický kráterovitý povrch ako výsledok impaktov guľôčok [6]. Preto sa obvykle zhoršuje drsnosť povrchov, čo sa môže negatívne prejaviť na funkčnosti povrchu.

Podmienky SP je potrebné optimalizovať, pretože intenzita plastickej deformácie v lokalizovaných oblastiach impaktov je veľmi vysoká a s narastajúcou energiou vloženou do povrchu môže dôjsť k delaminácii povrchu a inicializácii mikrotrhlín v povrchovej a aj podpovrchovej vrstve, ktoré môžu inicializovať predčasné poškodenie komponentov počas záťaže [7]. Tento článok sa preto zaoberá práve touto problematikou a poukazuje na výrazný vplyv podmienok dynamického guľôčkovania, na stav povrchu vyjadrenom v jeho topografii, napätovom stave ako aj dislokačnej hustote. Stav povrchu v tejto štúdii je analyzovaný ako funkcia tlaku média a aj počtu SP cyklov.

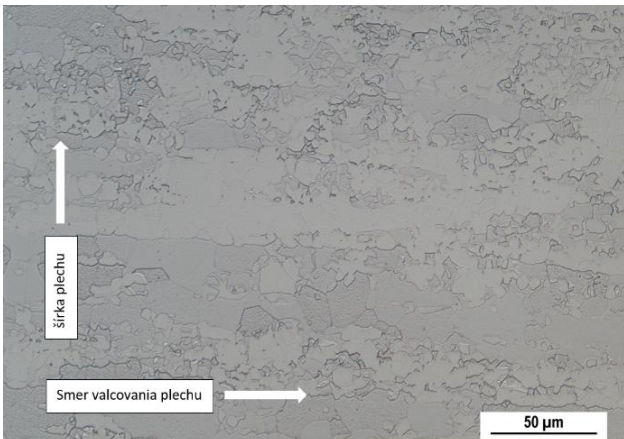
## 2 PODMIENKY EXPERIMENTOV

Experimenty boli realizované na duplexnej oceli *AISI* 318, ktorá bola dodaná vo forme plechu o hrúbke 3 mm. Z tohto plechu boli narezané vzorky o dĺžke 60 mm a šírke 20 mm. Dlhšia strana bola rezaná v smere valcovania plechu. Matrica po valcovaní vykazuje silnú štruktúrnú anizotropiu v smere valcovania ako to ukazujú obrázky 1 a 2.

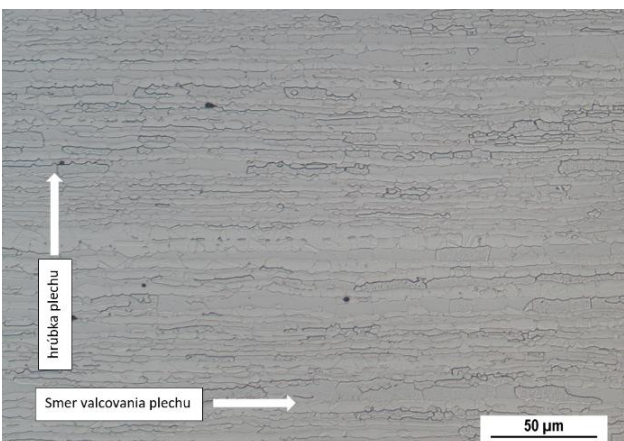
Dynamické guľôčkovanie bolo realizované na špeciálnom zariadení vyvinutom práve na tento účel. Podmienky guľôčkovania boli nasledovné:

- počet cyklov 1 až 10,
- guľôčky *S170* (stredný priemer 0,43 mm),
- lineárna rýchlosť posuvu  $23 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- vzdialenosť od povrchu 70 mm,
- tlak vzduchu 1,5 až 7 barov.

Po guľôčkovaní bola meraná jeho *Almen* intenzita a to prostredníctvom *Almen* pásov o hrúbke 1,295 mm, ktorá kontinuálne rástla s počtom cyklov ako aj tlakom média. Veľkosť *Almenov* sa menila a to od 0.32 mm až do 1.5 mm pre počet cyklov 1 a meniaci sa tlak od 1.5 až do 7 barov. V prípade 10 cyklov sa *Almen* menil od 0.84 mm po 1 cykle až do 2.24 mm po 10 cykloch.



Obr. 1. Preferenčne usmernená matrica *AISI* 318 v smere po dĺžke plechu



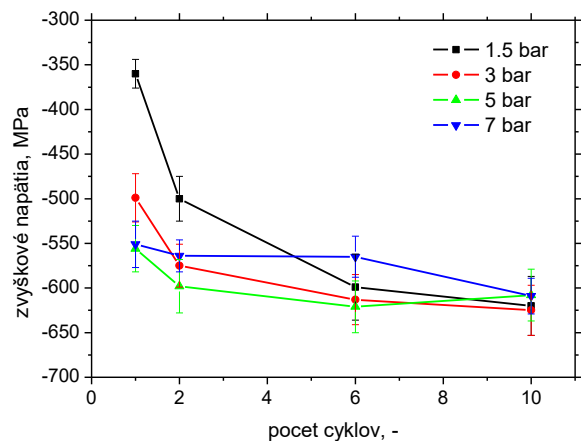
Obr. 2. Mikroštruktúra *AISI* 318 v priečnom reze

*XRD* technika bola použitá na analýzu amplitúdy zvyškových napätí, ako aj dislokačnej hustoty oboch fáz a vyjadrená v parametri *FWHM* (*austenit* aj *ferit*). Zvyškové napätia vo ferite boli analyzované *X-ray diffraction* (*XRD*) technikou (*Proto iXRD Combo diffraktometer*,  $K_{\alpha 1}$  a  $K_{\alpha 2}$  v  $\{211\}$  roviny, *CrKa*, *Winholtz* a *Cohen* metóda,  $\frac{1}{2}S_2 = 5,75 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $S_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ ). Zvyškové napätia v *austenite* boli merané s použitím  $K_{\alpha 1}$  a  $K_{\alpha 2}$  v  $\{311\}$  roviny, *MnKa*, *Winholtz* a *Cohen* metóda,  $\frac{1}{2}S_2 = 7.8 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $S_1 = -1,2 \text{ TPa}^{-1}$ ). Informácia ohľadne napätia a *FWHM* je z hĺbky cca 5  $\mu\text{m}$ .

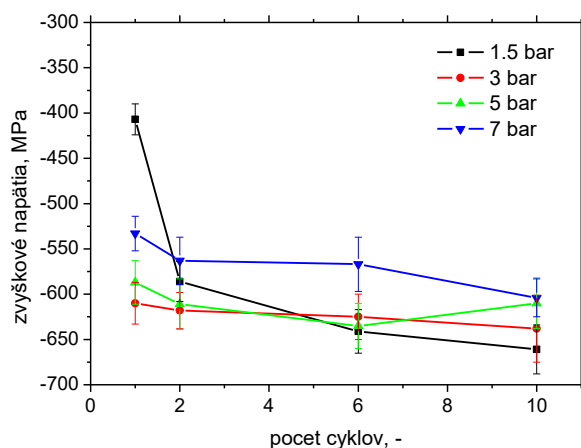
3D topografia povrchu bola analyzovaná prostredníctvom konfokálnej mikroskopie s použitím zariadenia *LSM 700* s vlnovou dĺžkou lasera 405 nm, v prostredí *Zen black software*, s použitím *Z stack* funkcie. Meraný profil získaný pri skenovaní bol následne filtrovaný, s cieľom odlišiť primárny profil povrchu od drsnosti a vlnitosti.

## 3 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

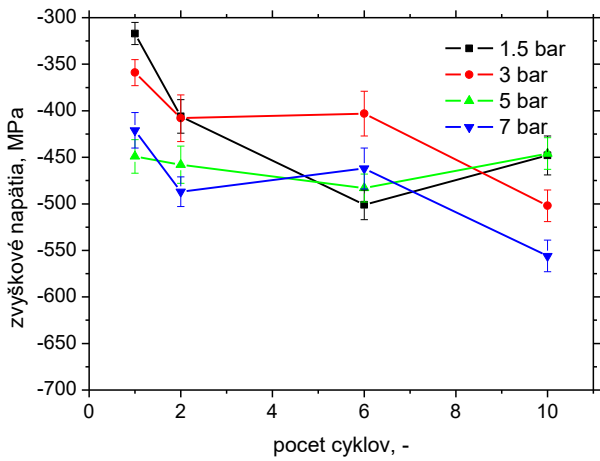
Obrázky 3 až 6 ukazujú, že amplitúda tlakových napätí rastie s veľkosťou tlaku, predovšetkým pre menší počet cyklov a postupne dochádza k saturácii, resp. tento pokles je menší.



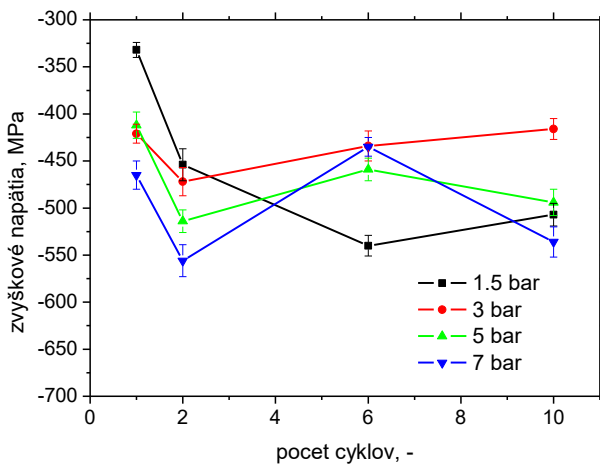
Obr. 3. Zvyškové napätia ako funkcia počtu *SP* cyklov a tlaku média v smere valcovania plechu - *austenit*



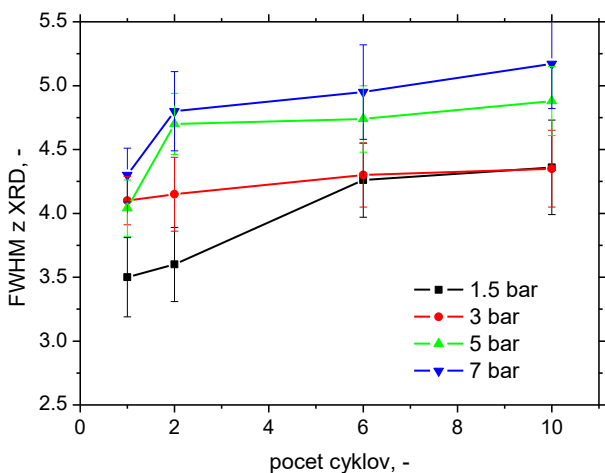
Obr. 4. Zvyškové napätia ako funkcia počtu *SP* cyklov a tlaku média v smere kolmom na smer valcovania plechu - *austenit*



Obr. 5. Zvyškové napätia ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere valcovania plechu - ferit



Obr. 6. Zvyškové napätia ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere kolmom na smer valcovania plechu - ferit.

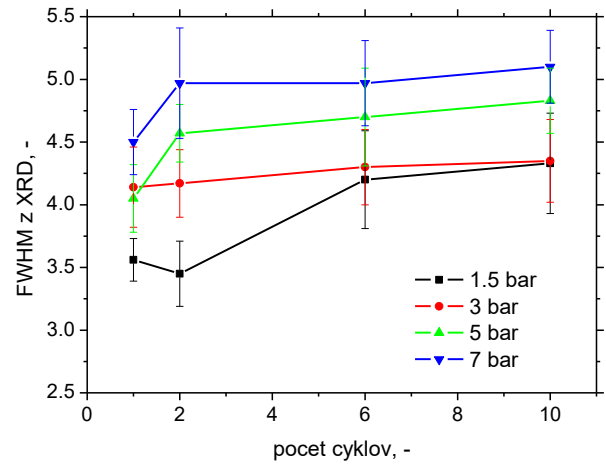


Obr. 7. FWHM z XRD ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere valcovania plechu - austenit

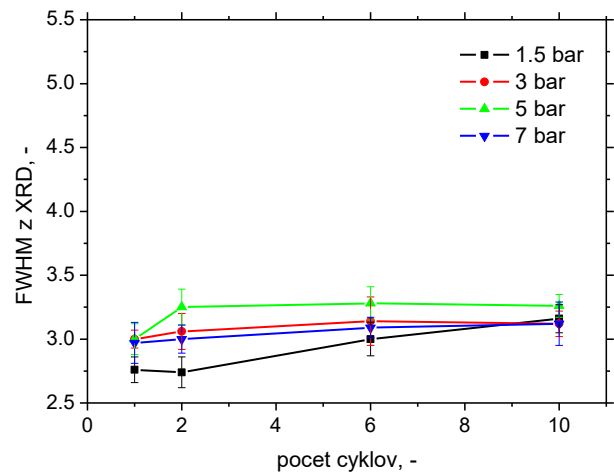
Veľkosť tlakových napätí v austenite je väčšia ako vo ferite čo indikuje, že energia impaktov je spotrebovaná predovšetkým v austenitickej fáze. Tento aspekt potvrdzuje aj *FWHM* z XRD ako ich ukazujú obr. 7 až 10. *FWHM* v austenite a s tým súvisiaca dislokačná hustota sa zvyšuje predovšetkým ako funkcia tlaku média, pričom počet SP cyklov má

menší vplyv. *FWHM* vo ferite je menšie a hodnoty sú veľmi porovnateľné pre oba smery. S počtom cyklov, ako aj tlakom média sa už výraznejšie *FWHM* nemení.

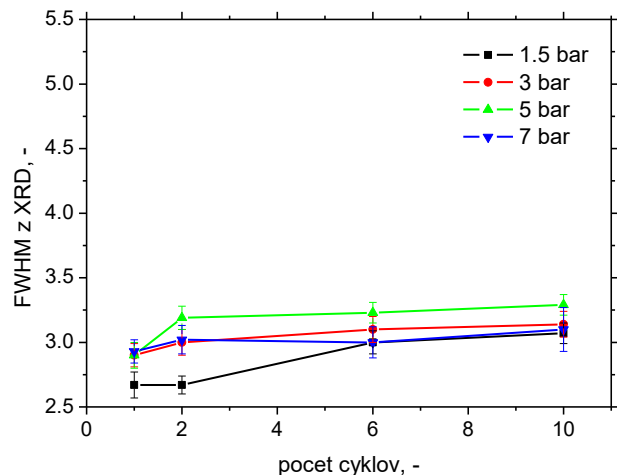
Drsnosť povrchu sa pre tlak 1,5 barov v podstate nemení a klesá až pre tlaky 3 bary a viac (obr. 11 a 12).



Obr. 8. *FWHM* z XRD ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere kolmom na smer valcovania plechu - austenit.



Obr. 9. *FWHM* z XRD ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere valcovania plechu - ferit.



Obr. 10. *FWHM* z XRD ako funkcia počtu SP cyklov a tlaku média v smere kolmom na smer valcovania plechu - ferit.

proces delaminácie povrchu, ktorá sa lokalizuje do oblastí rozhrania fáz.

## ZÁVER

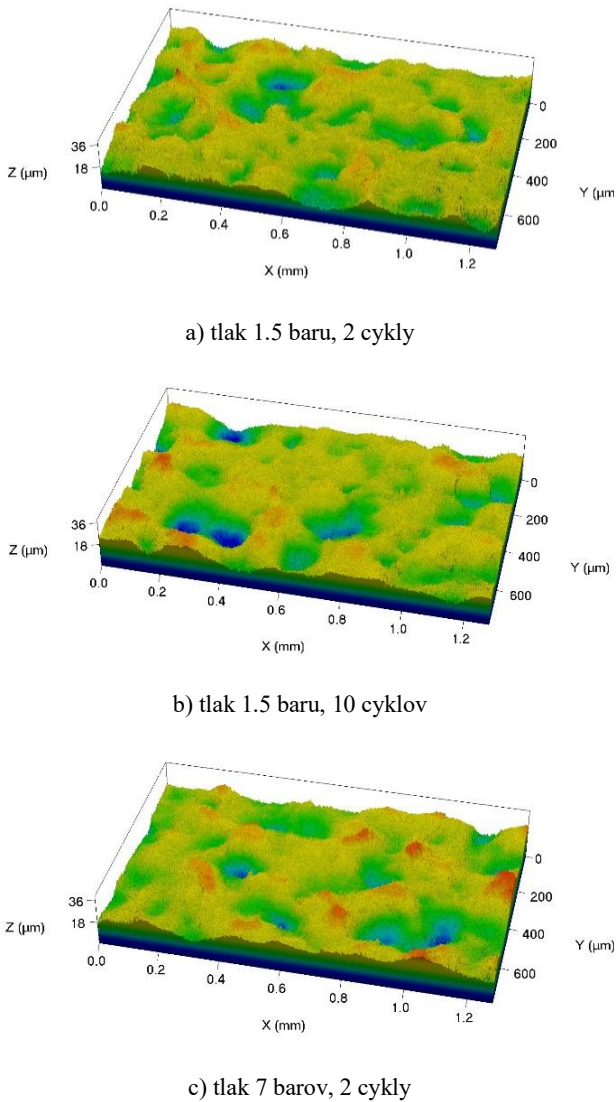
Dynamické guľôčkovanie v prípade duplexných ocelí je potenciálne dôležitou technologickou operáciou, vzhľadom na to, že na rozhraní fáz ferit/austenit sa môžu počas technologických procesov, alebo počas dlhodobého používania komponentov vyrobených z týchto materiálov inicializovať mikrotrhliny. Dynamické guľôčkovanie by potenciálne mohlo viesť k uzavretiu týchto trhlín a zlepšiť odolnosť povrchu predovšetkým voči cyklickému zaťažovaniu v reálnej praxi.

## Pod'akovanie

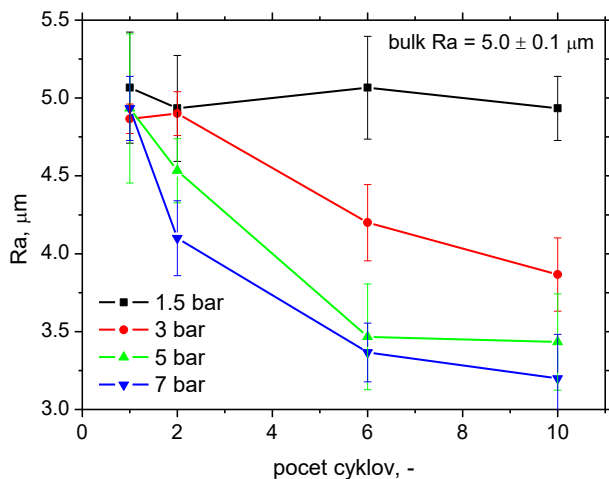
*This work was financially funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V04-00313.*

## LITERATÚRA

- [1] 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.* In: Surf. Coat. Technol., Vol. 340, p. 25-35.
- [2] 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.* In: J. Mater. Eng. Perform., Vol. 26, p. 2784-2797.
- [3] CHEN, M. et al. (2018): *Evaluation of the residual stress and microstructure character in SAF 2507 duplex stainless steel after multiple shot peening process.* In: Surf. Coat. Technol., Vol. 344, p. 132-140.
- [4] NESLUŠAN, M. et al. (2018): *Non-destructive evaluation of steel surface after severe plastic deformation via Barkhausen noise technique.* In: Met., Vol. 8, 1029.
- [5] PEYRE, P. et al. (2000): *Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance.* In: Mater. Sci. Eng., A, Vol. 280, p. 294-302.
- [6] UNAL, O. - VAROL, R. (2015): *Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and re-peening.* In: Appl. Surface Sci., Vol. 351, p. 289-295.
- [7] NESLUSAN, M. et al. (2022): *Barkhausen noise emission of AISI 304 stainless steel originating from strain induced martensite by shot peening.* In: J. Mater. Res. Technol., Vol. 20, p. 748-762.



Obr. 11. Kráterový charakter povrchu po SP.



Obr. 12. Zmena Ra s počtom cyklov guľôčkovania a tlakom.

Obrázok 11 taktiež ukazuje, že povrch po SP má typický kráterový charakter, kedy materiál matrice v mieste impaktu je extrudovaný do strán procesom intenzívnej plastickej deformácie. S rastúcim počtom cyklov, ako aj tlakom sa postupne zintenzívňuje

# Ultrazvuková kontrola zvarov na železných materiáloch s hrúbkou do 8 mm

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](mailto:radoslav.konar@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2799

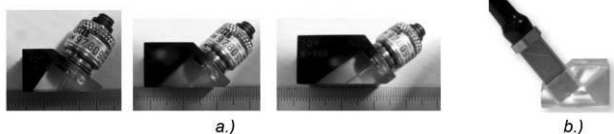
## Ultrasonic inspection of welds on ferrous materials with a material thickness of up to 8 mm

**Abstract:** The paper deals with the possibilities of inspecting butt welds on steel materials with a wall thickness of up to 8 mm using phased array ultrasonic technology. The possibility of using ultrasonic technology also for materials with a wall thickness of up to 8 mm will allow in practice the extension of ultrasonic inspections to welds that are currently inspected only by the x-ray method. Ultrasonic inspection could fully replace the x-ray test, thereby increasing the efficiency and flexibility of *NDT* inspections in the construction of steel structures.

**Keywords:** ultrasonic testing, butt weld, thickness up to 8 mm, phased array

### ÚVOD

Úloha nedeštruktívneho skúšania v strojárskom priemysle je rýchlo a spoľahlivo identifikovať vnútorné a vonkajšie defekty zvarov a materiálov s možnosťou opakovateľnosti kontroly. Táto podmienka sa vzťahuje aj na objemové skúšanie ultrazvukom. Pri konvenčnej ultrazvukovej kontrole tupých zvarov s hrúbkou základného materiálu pod 8 mm je ultrazvuková kontrola obmedzená najmä z pohľadu spoľahlivosti metódy, kedy z dôvodu konštrukcie sondy nie je možné skontrolovať celý objem zvaru (najmä oblasť koreňa). Jednou z možností je použiť miniatúrne konvenčné uhlové jednomeničové sondy, ktorých spoľahlivosť je tiež obmedzená hlavne z dôvodu šírenia ultrazvukového lúča iba pod jedným uhlom. Táto vlastnosť jednomeničovej sondy môže spôsobiť prehliadnutie určitých typov plošných chýb, ktoré majú vo zvere nevhodnú orientáciu spôsobujúcu odraz energie mimo sondy. Riešením tohto problému je použitie miniatúrnych uhlových *phased array* sond pri aplikácii ručného alebo automatizovaného skúšania materiálov a rúr s hrúbkou pod 8 mm.



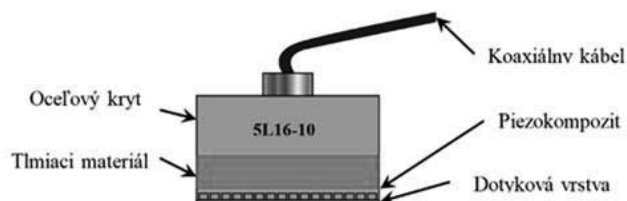
Obr. 1. Ultrazvukové sondy:

- a) miniatúrne jednomeničové sondy,
- b) miniatúrna PA sonda

### 1 TECHNIKA PHASED ARRAY (PA)

Ultrazvuková sonda PA je prijímačom a zároveň aj vysielateľom ultrazvukových vln. Súčasné ultrazvukové sondy PA sa môžu skladať až z 256 takýchto elementov. Usporiadanie elementov môže byť rôzne, ale čím je viac zložitejšie, tým je náročnejšie na výrobu a cena ultrazvukovej sondy rastie. Najčastejšie sa vyrábajú sondy s lineárnym usporiadaním elementov [1-3].

Všetky elementy sú uložené najčastejšie v polymérovej matrici, resp. ide o piezokompozitné materiály, ktoré sú typické pre ultrazvukové sondy PA. Elektrické impulzy sú k jednotlivým elementom sondy privádzané koaxiálnym káblom. Piezokompozitný menič a tlmiace teliesko sú uložené v oceľovom kryte.

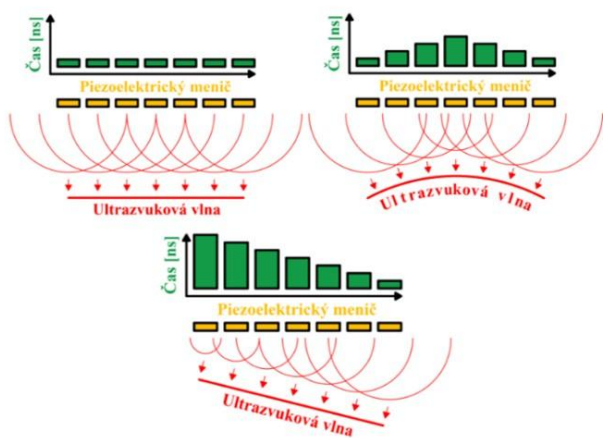


Obr. 2. Ultrazvuková sonda *Phased Array*

Piezokompozit je z vrchnej časti pokovený a zo spodnej časti ho chráni pred mechanickým poškodením dotyková vrstva (obr. 2). Vyrábané sú rôzne typy ultrazvukových PA sond, rôznych tvarov a rozmerov, ktoré závisia od geometrie a počtu jednotlivých elementov [7, 8].

Prevažná väčšina ultrazvukových sond, rovnako ako aj *PA sondy* sú konštruované pre použitie spolu s plexisklovým nadstavcom. Úlohou plexisklového nadstavca je dosiahnuť požadovaný uhol lomu ultrazvukového lúča, chrániť sondu pred mechanickým poškodením a „absorbovať“ jej mŕtve pásmo. Plexisklové nadstavce sú vyrábané v rôznych tvaroch a rozmeroch pre pozdĺžne alebo priečne ultrazvukové vlny. Vyrábajú sa aj špeciálne plexisklové nadstavce so zakrivenými povrchmi pre kontrolu valcových alebo guľových plôch.

Jednotlivé piezoelektrické meniče, resp. elementy *ultrazvukovej PA sondy* sú budené elektrickými impulzmi s rôznym časovým oneskorením (časovým zákonom), čím získavame sondu s variabilným zväzkom ultrazvukových vln (obr. 3).



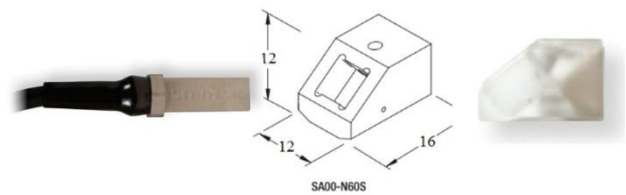
Obr. 3. Princíp elektronického riadenia ultrazvukového zväzku [4]

Z jednotlivých elementov *ultrazvukovej PA sondy* sa šíri elementárna guľová vlna. Celková plocha týchto elementárnych vln tvorí výslednú vlnoplochu a každý bod vlnoplochy sa stáva bodovým zdrojom vlnenia, ktoré sa potom do okolia šíri všetkými smermi. Tento mechanizmus je využívaný pri modifikácii zväzku ultrazvukových vln. Pri súčasnom buzení všetkých meničov sondy sa generuje výsledná vlna smerujúca v priamom smere ako pri konvenčnej priamej sonde. Riadeným časovým oneskorením príchodu elektrických impulzov do jednotlivých elementov dokážeme modifikovať tvar a smer šíriaceho sa zväzku ultrazvukových vln, a tým simulovať pohyb sondy [3, 4].

## 2 MOŽNOSTI SKÚŠANIA TUPÝCH ZVAROV POD 8 MM TECHNIKOU PA

Jednou s možností ako skúšať ultrazvukom tupé zvary na potrubíach s hrúbkou základného materiálu pod 8 mm je použitie miniatúrnych *PA sond* s vyššími frekvenciami a úzkou predšádkou (obr. 4). Pre názornosť ako aj pre simuláciu šírenia ultrazvuku bola vybraná sonda *Olympus 10L16 SA00* s predšádkovým klinom *SA00 N60S*. Sonda má frekvenciu 10 MHz a

16 elementov s aktívnou apertúrou 5 mm. Rozmery sondy sú 8×8×23 mm. Predšádka *SA00 N60S* je určená pre generovanie sektorového *S-skenu* s priečnymi vlnami v rozmedzí od 45° ÷ 75° s natívnym uhlom 60° s rozmermi 21×14×13 mm [4].

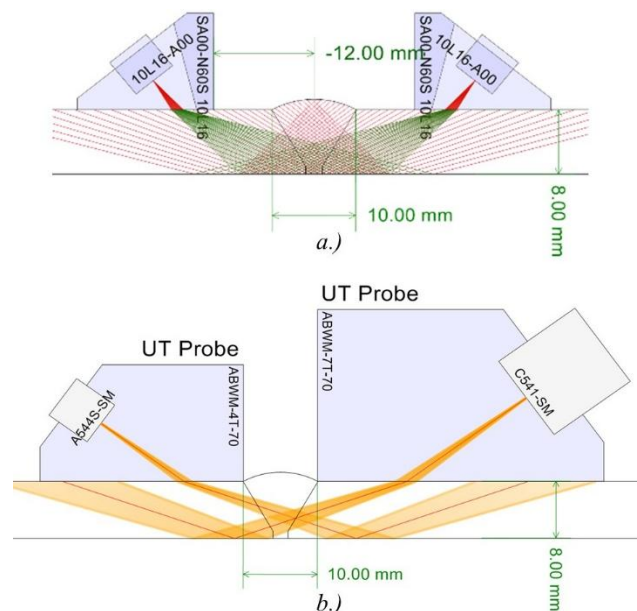


Obr. 4. Miniatúrna *PA* sonda 10L16-A00 s predšádkou [1]

Simulácia šírenia ultrazvuku v tupých zvaroch pri použití konvenčných sond a sondy *PA* bola vykonaná v programe *ES Beam Tool*. Ide o softvér umožňujúci simulovať šírenie ultrazvuku v materiáli. Program uvažuje pri výpočte aj s parametrami sondy ako priemer meniča, frekvencia a tiež s uhlom lomu a odrazu ultrazvuku v materiáli. Pre názornosť boli použité hrúbky základného materiálu 4, 6 a 8 mm.

Ako konvenčná ultrazvuková sonda s jedným meničom bola vybraná *C541-SM* (10 MHz, priemer meniča 10 mm) s bežne používanou predšádkou *ABWT-7T-70* a sonda *A544S-SM* s miniatúrnou predšádkou *ABWM-4T*.

Ako prvá bola vykonaná simulácia na tupom zvare s uhlom rozvetvenia 60° s hrúbkou základného materiálu 8 mm. Pre porovnanie bola vykonaná simulácia s použitím *PA* sondy, ako aj s konvenčnými uhlovými sondami s uhlom lomu 70° (obr. 5).

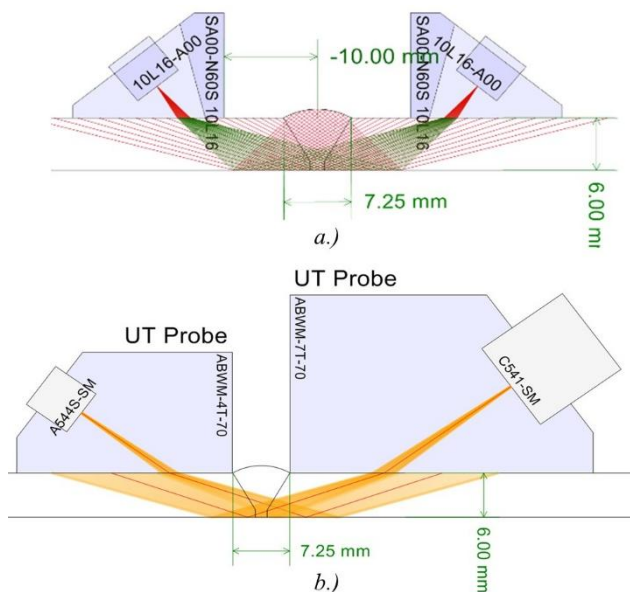


Obr. 5. Simulácia šírenia ultrazvuku pre tupý zvar s hrúbkou základného materiálu 8 mm: a.) pre sondu *PA*, b.) pre konvenčné ultrazvukové sondy

V tomto prípade nebol problém preskúšať celý objem zvaru sondou *PA* a tiež konvenčnými sondami. Kontrolu technikou *PA* je možné vykonať v jednej

pozícií sondy z oboch strán zvaru vo vzdialenosti 12 mm od osi zvaru. Dôležitým faktorom pre možnosť skúšania je najmä šírka prevýšenia zvaru, ktorá bola v tomto prípade 10 mm. Čím bude šírka prevýšenia väčšia, tým sa minimálna vzdialenosť čela sondy od osi zvaru bude zvyšovať až do vzdialenosti, kedy priamy ultrazukový lúč nebude dopadať do oblasti koreňa zvaru a teda nebude možné odskúšať celý jeho objem. Táto maximálna šírka prevýšenia zvaru s ohľadom na „prezvučanie“ koreňa pre predsádku *ABWM-7T-70* je 18 mm, pre predsádku *ABWM-4T-70* je 25 mm a pre sondu *PA* s predsádkou *SA00-N60S* je to 30 mm, kedy koreň zvaru bude kontrolovaný ultrazukovým zväzkom s uhlom lomu v materiáli okolo  $70^\circ$  [4-6].

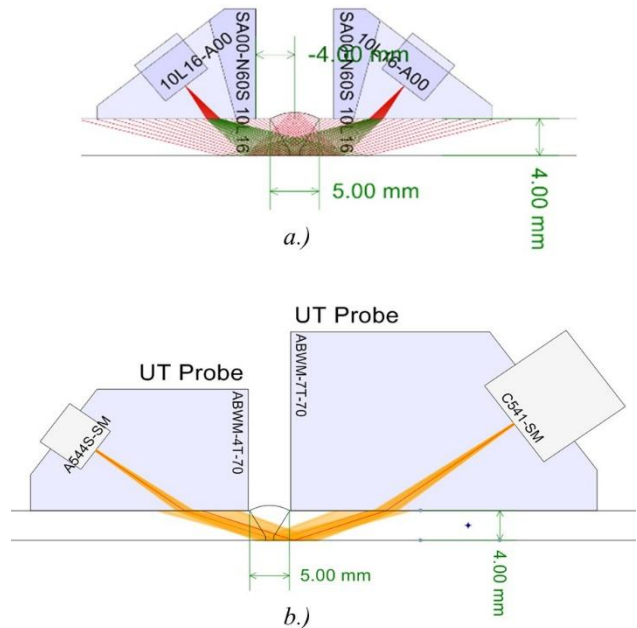
Ako druhá bola vykonaná simulácia ultrazukového skúšania tupého zvaru s hrúbkou materiálu 6 mm. Uhol rozvretia bol opäť  $60^\circ$ . V tomto prípade je šírka v prevýšení zvaru 7,25 mm (obr. 6).



**Obr. 6. Simulácia šírenia ultrazvuku pre tupý zvar s hrúbkou základného materiálu 6 mm:**  
a) pre sondu *PA*, b) pre konvenčné ultrazukové sondy

Kontrola konvenčnou sondou s predsádkou *ABWM-7T-70* je v tomto prípade už na hranici skúšania, pretože pri opretí čela sondy o prevýšenie ultrazukový lúč smeruje presne do koreňa zvaru. Miniaturná predsádka *ABWM-4T-70* je pre skúšanie zvaru s hrúbkou 6 mm vhodná, avšak pri veľkom zväzšení šírky prevýšenia by táto sonda už nebola použiteľná. Pri simulácii so sondou *PA* má táto technika, čo sa týka šírky prevýšenia, ešte dostatočnú rezervu, šírka prevýšenia by v tomto prípade mohla byť max. 20 mm.

Poslednou simuláciou v programe *ES Beam Tool 5* je simulácia šírenia ultrazvuku vo zvarovom spoji s hrúbkou základného materiálu 4 mm (obr. 7).



**Obr. 7. Simulácia šírenia ultrazvuku pre tupý zvar s hrúbkou základného materiálu 4 mm:**  
a) pre sondu *PA*, b) pre konvenčné ultrazukové sondy

Kontrola bežnou predsádkou *ABWM-7T-70* pri hrúbke materiálu 4 mm a šírke prevýšenia 5 mm už nie je možná, pretože nedokážeme preskúšať oblasť koreňa zvaru. Predsádka *ABWM-4T-70* sa nachádza v hraničnej pozícii, kedy ultrazukový lúč smeruje priamo do koreňa zvaru. Pri väčšej šírke prevýšenia by už skúšanie nebolo možné vykonať. Vychádzajúc zo simulácie je skúšanie *PA* sondou možné bez akýchkoľvek prekážok. Sonda má aj v tomto prípade dostatočnú rezervu, čo sa týka šírky prevýšenia zvaru. Maximálna šírka prevýšenia by mohla dosahovať v tomto prípade až 8 mm [4].

## ZÁVER

Z vykonaných simulácií možno vyvodit' závery, že pre skúšanie materiálov s hrúbkami menej ako 8 mm je možné použiť miniaturne uhlové konvenčné sondy s jedným meničom a to len do hrúbky 6 mm. Pre hrúbky materiálov menej ako 6 mm je optimálnym riešením použitie miniaturných *PA* sond, ktoré sú svojou variabilitou predurčené prispôsobiť sa zložitým geometrickým konfiguráciám zvarového spoja. Pri voľbe optimálnej metódy, ako aj stanovení správnej polohy sondy pri skúšaní je vhodné použiť program umožňujúci simuláciu šírenia ultrazukového zväzku a tak si potvrdiť správnosť návrhu a spoľahlivosť zvolenej metódy a postupu skúšania. Správnym postupom skúšania je teda možné kontrolovať tupé zvary na materiáloch s hrúbkou nad 4 mm.

## Pod'akovanie

Článok vznikol v rámci riešenia projektu *KEGA-018ŽU-4/2025* a *VEGA-1/0044/22* podporeného

## LITERATÚRA

[1] OLYMPUS (2025): Phased Array Tutorial. [online]. 2025, [cit. 2025-05-20]. Dostupné na internete: <<http://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/phased-array>>.

[2] OLYMPUS (2025): OmniScan SX. [online]. 2025, [cit. 2025-05-20]. Dostupné na internete: <[http://cache.olympus-ims.com/downloads/storage/276825452/OmniScan\\_SX\\_EN\\_LTR\\_201306.pdf?\\_gda\\_=1383820232\\_dd0d2d3ecb1298a7c408b7371a32b361](http://cache.olympus-ims.com/downloads/storage/276825452/OmniScan_SX_EN_LTR_201306.pdf?_gda_=1383820232_dd0d2d3ecb1298a7c408b7371a32b361)>.

[3] KONAR, R. et al. (2021): *Numerical simulation of a temperature field during multi-beads surface welding*. In: Journal of Applied Mathematics and Computation Mechanics. Vol. 20, Iss. 1, 49-59 p. ISSN 2299-9965.

[4] GUO, W. et al. (2017): *Research on Phased Array Ultrasonic Technique for Testing Tube to Tube-Sheet Welds of Heat Exchanger*. In: Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference. Vol. 5, ISBN 978-0-7918-5041-1.

[5] STN EN ISO 17 640 (2019): *Nedeštruktívne skúšanie zvarov*. Skúšanie zvarových spojov ultrazvukom. 2019

[6] STN EN ISO 11 666 (2018): *Nedeštruktívne skúšanie zvarov*. Skúšanie zvarových spojov ultrazvukom. Úrovne prípustnosti. 2018

---

# Analýza tribologických vlastností kompozitného materiálu PA66+GF25

---

## Jozef Bronček, doc. Ing. PhD.\*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [jozef.broncek@fstroj.uniza.sk](mailto:jozef.broncek@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 41 513 2929

## Mário Drbúl, doc. Ing. PhD.

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [mario.drbul@fstroj.uniza.sk](mailto:mario.drbul@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 0041 513 2754

## Dávid Čuchor, Ing.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [mario.drbul@fstroj.uniza.sk](mailto:mario.drbul@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 0041 513 2929

## Rudolf Madaj, Ing. PhD.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [rudolf.madaj@fstroj.uniza.sk](mailto:rudolf.madaj@fstroj.uniza.sk), Tel.: +421 0041 513 2925

## Analysis of Tribological Properties of Composite Material PA66+GF25

**Abstract:** The aim of experiments was to acquire the knowledge that can be used in designing materials for bearing cages. The current trend is that leading bearing manufacturers are replacing metal cages in bearing construction with glass fiber (GF) reinforced polyamide (PA) cages. Experimental measurements were realized on the experimental device linear microtribometer working on the principle of method ball on plane. This method according to the standard ISO 7148-2 is standard method for tribological properties testing. The structure analysis of experimental samples was performed because of understanding of potential structure influence on material properties.

**Keywords:** tribology, coefficient of friction, bearing cage.

---

## ÚVOD

Valivé ložiská sú dôležitou súčasťou konštrukcií mechanizmov, kde plnia viacero úloh spojených s uložením rotujúcich hriadel'ov. Jednou z úloh, ktoré plnia ložiská, je i zaistenie polohy pohybujúcich sa dielov pri prenose pohybu a síl pri minimálnej hodnote trenia. Riešenie problematiky opotrebenia povrchu ložiskových materiálov si vyžaduje znalosti o samotnom opotrebení a o spôsobe merania a hodnotenia opotrebenia. Rast poznatkov v tejto oblasti nám môže pomôcť k riešeniu celého radu teoretických ako aj praktických problémov, s ktorými sa stretnú vývojári a výpočtári valivých uložení. Neustály vývoj nových materiálov a povlakov, ktoré sa používajú pre krúžky, valivé telesá a klietky, si

vyžaduje ich skúšanie na experimentálnych zariadeniach s cieľom hodnotenia a merania ich fyzikálnych tak aj mechanických vlastností. Na druhej strane je porovnávanie týchto vlastností s inými materiálmi rovnako dôležité. Klietky ktoré sú súčasťou konštrukcie ložiska, sú všeobecne zaťažované iba malými silami, ale pri vyšších otáčkach alebo pri narušenom odvaľovaní teliesok môže sila pôsobiaca na klietku podstatne vzrásť. Pre tieto prípady sa pre vyššiu elasticitu uprednostňuje klietka z materiálu plast [1, 2]. Pri plastových klietkach na zabezpečenie trvalej funkčnej schopnosti treba zohľadňovať iné materiálové vlastnosti a iné konštrukčné požiadavky, ako sa uplatňujú pri klietkach z klasických materiálov (ocel', mosadz). Ide

o nasledujúce vlastnosti: pružnosť a pevnosť materiálu v rozpätí prevádzkových teplôt, odolnosť materiálu voči únavovému zaťaženiu, znášanlivosť s predpokladaným mazadlom, tribotechnicky vhodný tvar klietky a iné. Plastové klietky sú charakteristické nízkou hmotnosťou, veľkou pružnosťou a veľmi dobrými klznými vlastnosťami. Pre malé a stredne veľké ložiská sa používajú celistvé plastové klietky vyrábané vstrekaním z polyamidu *PA66+GR30*, ktorý býva tiež vystužený sklenenými vláknami, resp. uhlíkovými vláknami. Klietky z polyamidu *PA 6.6* sa používajú pre prevádzkové teploty do 100°C, alebo krátkodobo do 120°C. Pre správnu prevádzku je dôležitý aj typ použitého maziva, pri zohľadnení agresivity voči materiálu klietky. Pre veľké ložiská sa hlavne z výrobných dôvodov používajú plastové segmentové klietky z *PEEK* polyméru s vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami a výbornou chemickou odolnosťou voči organickým i anorganickým látkam pri vysokých teplotách. *PEEK* materiál sa používa sa pre prevádzkové teploty do 250°C.

## 1 EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL

Vzorky v tvare platničky (obr. 1) sa vyrobili z kompozitného materiálu polyamidu *PA66 GF25* vystuženého sklenenými vláknami.



Obr. 1. Pohľad na skúšobné vzorky

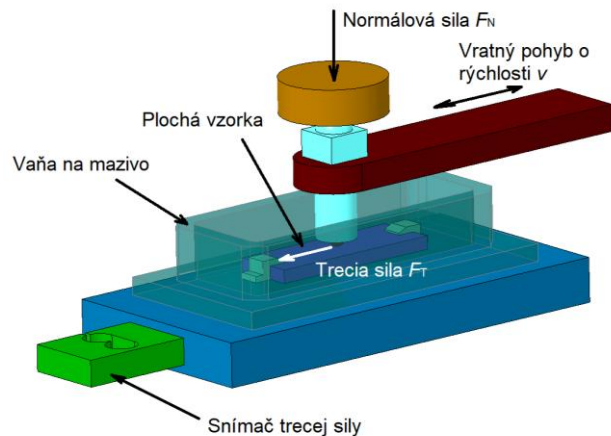
Na obr. 2 je zobrazená makroštruktúra povrchu materiálu v pozdĺžnom reze vzorky.



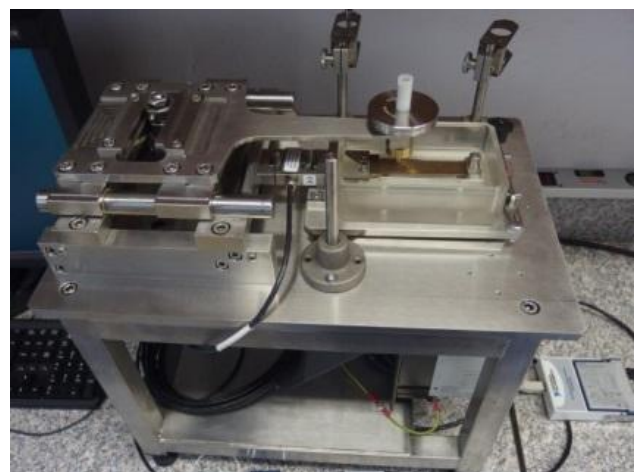
Obr. 2. Makroštruktúra povrchu materiálu pozdĺž vzorky kompozitu so sklenenými vláknami

## 2 METODIKA EXPERIMENTU

Pre hodnotenie tribologických vlastností materiálu sa použilo skúšobný lineárny mikrotribometer, ktorý sa nachádza v tribologickom laboratóriu katedry *KKČS*. Vlastná skúška je založená na metóde *Ball-on-Plate*, ktorá je štandardnou metódou skúšania tribologických vlastností plastických materiálov (*ISO 7148-2*). Hlavnou časťou mikrotribometra je tribologický uzol, ktorý sa skladá z guľôčky a plochej vzorky v tvare platničky. Druhý člen dvojice tvorila s guľôčka s priemerom  $d = 4$  mm z ložiskovej ocele *100Cr6*. Pohyb guľôčky je priamočiary, nerovnomerný a vratný. Pohybujúca sa guľôčka sa váhou závažia pritláča na vzorku, ktorá je upevnená v miske. Miska je pripnutá na voľne uloženej platni, ktorá je podporená v troch bodoch a je fixovaná k tenzometrickému snímaču. Hodnota trecej sily  $F_T$  sa určuje tenzometrickým meraním polohy guľôčky na vzorke. Zo snímaných dnôt  $F_T$  a  $F_N$  sa vypočítajú hodnoty koeficienta trenia [1, 2].



Obr. 3. Zjednodušené zobrazenie princípu skúšobného lineárneho mikrotribometra



Obr. 4. Pohľad na reálne skúšobné zariadenie

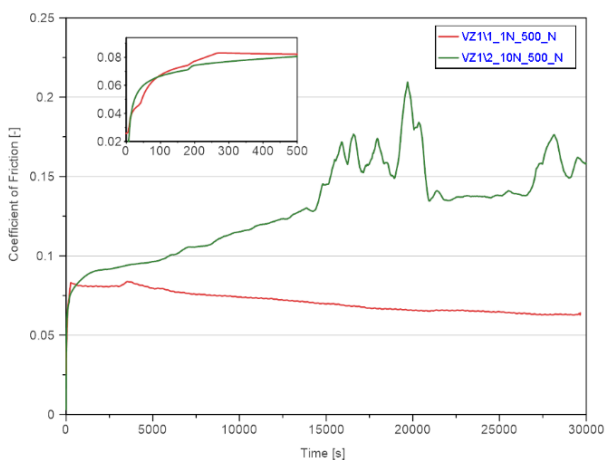
Metodika skúšky bola volená tak, aby sa zistila závislosť súčiniteľa trenia  $f$  pre rôzne hodnoty zaťaženia pri zvolenej rýchlosti  $v$ . Doba trvania jednotlivej experimentálnej skúšky bola 30000 s pri rýchlosti  $v = 0$  až  $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pre hodnoty zaťaženia

$F_N = 1$  a  $10$  N. Pri každej skúške dosiahla celková dĺžka trajektórie tribologickej stopy hodnotu  $500$  m. Skúška sa realizovala atmosférickom prostredí, a to v podmienkach bez mazania a s mazaním. Ako mazivo sa použilo plastické mazivo *Kluberplex BEM 41-141*.

### 3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Priebehy zistených hodnôt súčiniteľa trenia pre kompozitný materiál v tvare platničky so sklenými vláknami (vzorka  $Vz1$  a  $Vz2$ ) pri skúškach v dvoch režimoch, bez mazania ( $N$ ) a s mazaním ( $M$ ), pri zaťažení  $F_N = 1$  a  $10$  N a s telieskom z oceleovej guľôčky sú zobrazené v diagramoch na obr. 5 až 8.

V diagrame na obr. 5 sú zobrazené krivky zistených priebehov hodnôt súčiniteľa trenia nemazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 1$  N a  $10$  N.



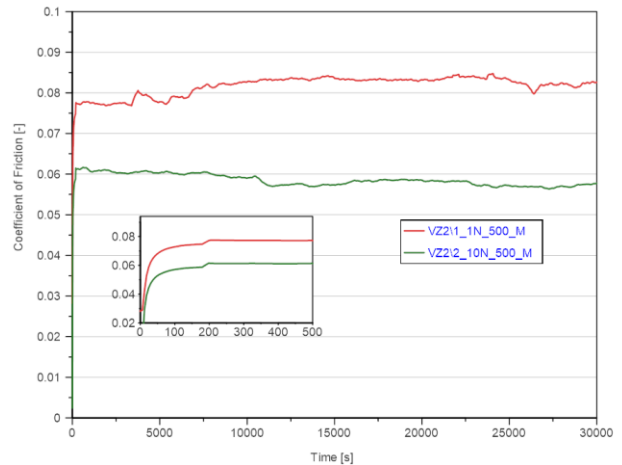
**Obr. 5.** Zobrazené priebehy hodnôt súčiniteľa trenia nemazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 1$  N a  $10$  N

Zaznamenané hodnoty súčiniteľov trenia pri posudzovaných materiáloch tribologických dvojíc v podmienkach bez mazania vykazovali od začiatku skúšky výrazne rozdielny priebeh. Vzorka  $VZ1/2$  vykazovala po fáze nábehu neustály rast hodnoty koeficientu trenia a priebeh počas celej doby skúšky nebol stabilný. Záverečná hodnota koeficientu trenia bola  $f = 0,158$ . Vzorka  $VZ1/1$  vykazovala pokojný priebeh s klesajúcim trendom hodnoty koeficientu trenia. Záverečná hodnota koeficientu trenia bola  $f = 0,064$ .

V diagrame na obr. 6 sú zobrazené krivky zistených priebehov hodnôt súčiniteľa trenia mazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 1$  N a  $10$ .

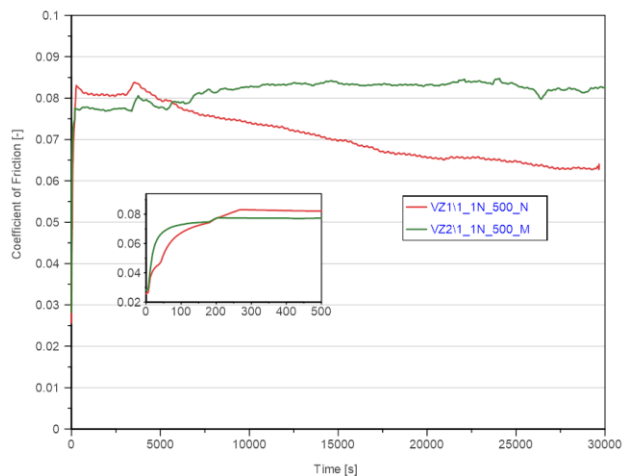
Zaznamenané hodnoty súčiniteľov trenia pri hodnotených materiáloch tribologických dvojíc v podmienkach s mazaním vykazovali od začiatku skúšky až po koniec skúšky stabilný priebeh. Hodnoty koeficienta trenia pri vzorke  $VZ2/2$  mali postupne klesajúci priebeh a záverečná hodnota koeficientu trenia bola  $f = 0,058$ . Vzorka  $VZ2/2$  vykazovala počas

celého priebehu skúšky nižšie hodnoty koeficienta trenia ako vzorka  $VZ2/1$ . Zaznamenané hodnoty koeficientu trenia pri vzorke  $VZ2/1$  mali postupne vzrastajúci trend a priebeh krivky bol počas celej skúšky stabilný bez výrazných výkyvov. Výsledná hodnota koeficientu trenia vzorky  $VZ2/1$  bola  $f = 0,084$ .



**Obr. 6.** Zobrazené priebehy hodnôt súčiniteľa trenia mazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 1$  N a  $10$  N

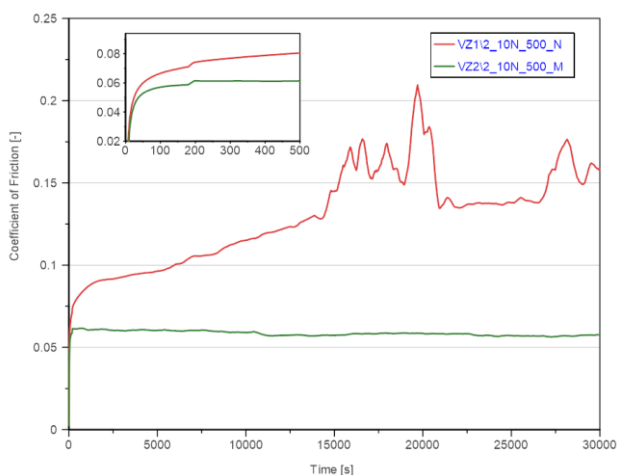
V diagrame na obr. 7 sú zobrazené krivky zistených hodnôt súčiniteľa trenia nemazanej ( $VZ1/1$ ) a mazanej vzorky ( $VZ2/1$ ) pri zaťažení  $F_N = 1$  N.



**Obr. 7.** Zobrazené krivky zistených priebehov hodnôt súčiniteľa trenia nemazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 1$  N

Z porovnania priebehov kriviek, je zrejmé že vzorka  $VZ1/1$  po zábehu skúšky dosiahla vyššie hodnoty koeficientu trenia ako mazaná vzorka  $VZ2/1$ . Z porovnania ďalšieho priebehu skúšky vidieť, že v čase okolo  $6000$  s dosiahli hodnoty koeficientu trenia vzorky  $VZ1/1$  (nemazanej vzorky) nižších hodnôt ako u mazanej vzorky  $VZ2/1$ . Mazaná vzorka  $VZ2/1$  vykazovala ustálený priebeh koeficientu trenia a oscillovala okolo hodnoty  $f = 0,084$ . Nemazaná vzorka  $VZ1/1$  vykazovala postupný klesajúci priebeh koeficientu trenia a oscillovala okolo hodnoty  $f = 0,064$ .

V diagrame na obr. 8 sú zobrazené krivky zistených priebehov hodnôt súčiniteľa trenia nemazanej (VZ1/2) a mazanej vzorky (VZ2/2) pri zaťažení  $F_N = 10$  N.



**Obr. 8.** Zobrazené priebehov hodnôt súčiniteľa trenia mazaných vzoriek pri zaťažení  $F_N = 10$  N

Z porovnania priebehov kriviek, je zrejmé že pri zaťažení  $F_N = 10$  N, vzorka VZ1/2 po zábehu skúšky dosiahla vyššie hodnoty koeficientu trenia ako mazaná vzorka VZ2/2.

Mazaná vzorka VZ2/2 vykazovala ustálený priebeh koeficientu trenia a v závere skúšky dosiahla hodnotu koeficienta trenia 0,058. Vzorka VZ1/2 vykazovala po fáze nábehu neustály rast hodnoty koeficientu trenia a priebeh počas celej doby skúšky nebol stabilný. Záverečná hodnota koeficientu trenia bola  $f = 0,158$ . Dá sa uzavrieť, že pri hodnote normálového zaťaženia  $F_N = 10$  N, pri pohybe odpor maziva sa podieľal minimálne na zložku trecej sily  $F_T$ .

## ZÁVER

Príspevok práca sa zaoberal tribologickými vlastnosťami kompozitného materiálu a jeho vhodnosťou na použitie pri výrobe klieťok valivých ložísk. Porovnanie experimentálnych výsledkov tribologických vlastností pri rôznom zaťažení  $F_N = 1$  N a 10 N a v rôznom prostredí s mazaním a bez mazania umožnilo sledovanie účinku vplyvu zaťaženia a vplyvu mazania na hodnotený materiál.

Z dosiahnutých výsledkov vyplývajú nasledovné závery:

- hodnota súčiniteľa trenia sa výrazne menila s charakterom prostredia a s veľkosťou zaťažovacej sily,
- z porovnania priebehov súčiniteľov trenia pri podmienkach bez mazania a pre rôzne hodnoty zaťaženia (obr. 5) možno konštatovať, že priebehy súčiniteľov trenia vykazovali od začiatku skúšky až po koniec skúšky výrazne rozdielny priebeh. Priebeh súčiniteľa trenia pri zaťažení 1 N vykazoval nižšie hodnoty, ako pri zaťažení 10 N,

- z porovnania priebehov súčiniteľov trenia za podmienok s mazaním (obr. 6) možno konštatovať, že priebeh súčiniteľa trenia pri zaťažení 1 N vykazoval vyššie hodnoty, ako pri zaťažení 10 N,
- z porovnania priebehov súčiniteľov trenia za podmienok s mazaním a bez mazania pri zaťažení 1 N (obr. 7) vidieť, že priebeh súčiniteľa v podmienkach bez mazania vykazoval nižšie hodnoty, ako v podmienkach s mazaním. Dá sa domnievať, že pri malej hodnote normálového zaťaženia predstavoval odpor maziva počas pohybu významnú zložku trecej sily  $F_T$ , čím sa dosiahla aj vyššia hodnota koeficienta trenia.
- z analýzy priebehov súčiniteľov trenia za podmienok s mazaním a bez mazania pri zaťažení 10 N (obr. 8) možno konštatovať, že nemazaná vzorka dosiahla vyšších hodnôt koeficienta trenia ako mazaná vzorka. Zrejme výrazný nárast hodnoty koeficienta trenia bol zapríčinený degradáciou kontaktnej plochy v dôsledku jej opotrebovania. V mieste opotrebovania sa prejavil účinok sklenených vlákien v miestach kontaktu trecej dvojice.

## PodĎakovanie

Tento článok bol vypracovaný v rámci riešenia projektov KEGA 045ŽU-4/2025- Implementácia jazyka geometrickej špecifikácie do oblasti hodnotenia drsnosti povrchu, VEGA 1/0722/25 Výskum aditívnych technológií so zameraním na ich aplikáciu pri navrhovaní a konštruovaní rezných nástrojov, 09I05-03-V02-00080 DigiDent (Research on the Digitalization of Dental Implant Components for the Creation of Personalized 3D Models for the Manufacturing Process).

## LITERATÚRA

- BRONCEK, J. - BASTOVANSKY, R. - KONSTANTOVA, V. - STUPAVSKY (2019): *Analysis of Tribological Properties of Composite Materials for the Production Designing of Bearing Cage*. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 453-461.
- VICEN, M. - BRONCEK, J. - BOKUVKA, O. - NIKOLIC, R. - RADEK, N. (2021): *Tribological Behaviour Of The Sucaslide Diamond-Like Carbon Coating*. In: Transaction Of Fadena, Vol. 45, Issue 2, pp. 31-40.

# Vplyv precipitačného vytvrdzovania na mechanické vlastnosti nehrdzavejúcich ocelí

**Elena Kantoriková, Ing. PhD.**

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

## The effect of precipitation hardening on the mechanical properties of stainless steels

**Abstract:** The article aims to highlight the impact of heat treatment - precipitation hardening on stainless steels. Precipitation hardening allows to achieve very high mechanical properties (tensile strength and yield strength), often significantly higher than in classical austenitic or ferritic steels. The aim is to compare the theoretical conditions of heat treatment and thus increase awareness of its advantages.

**Keywords:** Heat treatment, precipitation hardening, mechanical properties.

## ÚVOD

Ocele odolné voči korózii predstavujú dôležitú triedu materiálov v priemysle, ktoré majú schopnosť odolávať agresívnemu prostrediu a zachovávať svoje mechanické vlastnosti aj pri dlhodobom kontakte s vlhkosťou a chemickými látkami.

Nehrdzavejúce ocele sa široko používajú vo väčšine priemyselných odvetví vrátane stavebníctva, námorníctva, leteckého a kozmického priemyslu, automobilového priemyslu a spotrebného tovaru. Tento materiál poskytuje vysokú pevnosť, trvanlivosť a odolnosť voči korózii, vďaka čomu je ideálny pre mnohé kozmetické komponenty a komponenty do otvoreného prostredia.

Nehrdzavejúca oceľ sa dodáva v triedach rozdelených podľa obsahu zliatiny. Trieda zvolená pre danú aplikáciu závisí od faktorov, ako je prostredie, v ktorom sa bude používať, požadovaná pevnosť a odolnosť a požadovaný estetický štandard. Nehrdzavejúca oceľ sa vyrába predovšetkým zo stredne a nízkouhlíkovej ocele. Na zmenu výsledných vlastností sa legujú rôznymi kovmi. Napríklad *chróm* a *nikel* dodávajú odolnosť proti korózii a tvrdosť.

Iné kovy zvyšujú kujnosť, húževnatosť, ťažnosť, pevnosť v ťahu a šmyku a ďalšie vlastnosti. Sú tiež odolné proti korózii, s výnimočnými vlastnosťami v konkrétnych prostrediach podľa triedy/typu zliatiny.

Okrem toho sú nehrdzavejúce ocele schopné pracovať pri vysokých a nízkych teplotách, od kryogénnych teplôt až po 2000°C, v závislosti od triedy [1].

## 1 OCELE

### 1.1 Austenitické ocele

Austenitické ocele sú nemagnetické nehrdzavejúce ocele, ktoré obsahujú vysoký obsah *chrómu* a *niklu* s nízkym obsahom *uhlíka*. Austenitické ocele sú najpoužívanejšou triedou nehrdzavejúcej ocele. Najbežnejšie zloženie je 18 % *Cr* a 8 % *Ni*. Všeobecne sa klasifikujú do dvoch skupín - typ *chróm-nikel* série AISI 300 a typ *chróm-nikel-mangán* série 200. Oceľ s lepšou odolnosťou proti korózii sa vytvára pridaním 2 až 3 % *molybdénu*, ktorá sa často nazýva „*kyselinovzdorná oceľ*“. Trieda 304 je najbežnejšou triedou tohto typu, ktorá zvyčajne obsahuje 18 % *Cr* a 8 % *Ni*. Dajú sa kaliť na vysokú úroveň pevnosti, pričom si zachovávajú užitočnú úroveň ťažnosti a húževnatosti. Triedy radu 300 majú aj podtriedy typu "L" a typu "H". Triedy typu L sú určené na zvýšenú odolnosť proti korózii. Písmeno L označuje nízky obsah *uhlíka* (ako v prípade 304L, 316L), ktorý je približne 0,03 %. Používajú sa výlučne na zvarovanie. Trieda "H" obsahuje minimálne 0,04 % *uhlíka* a maximálne 0,10 % *uhlíka*. Odporúča sa, keď sa materiál používa pri extrémnych teplotách. Typ 316 je najbežnejšia trieda po triede 304. Pozostáva zo 16 % až 18 % *Cr* a 11 % až 14 % *Ni*. Z hľadiska použitia pokrývajú triedy radu 300 rôzne oblasti, ako sú zariadenia v chemickom priemysle, potravinárskom priemysle, leteckom priemysle, výstavba závodov na spracovanie jadrovej energie, domáce spotrebiče atď.

## 1.2 Feritické ocele

*Feritické* nehrdzavejúce ocele sú magnetické, tepelne nespracovateľné ocele, ktoré obsahujú 11 až 30 % *chrómu*, minimum *Ni*, resp. 0 % *Ni*. Majú kryštálovú štruktúru s priestorovo centrovanou mriežkou (*FCC*). Zvyčajne sa používajú na nekonštrukčné aplikácie, kde sa vyžaduje dobrá všeobecná odolnosť proti korózii alebo dobrá odolnosť proti korózii pod napätím, ako napríklad pri styku s morskou vodou, a môžu byť užitočné na vnútorné a dekoratívne využitie, kde je hlavným hľadiskom estetika [1, 2]. *Feritické* nehrdzavejúce ocele majú dobrú tepelnú a koróznou odolnosť, najmä sú vysoko odolné voči *chloridovému* koróznemu praskaniu pod napätím, hoci ich mechanické vlastnosti, ako napríklad húževnatosť pri nízkych teplotách, sú vo všeobecnosti horšie ako u *austenitických* nehrdzavejúcich ocelí. Korózne vlastnosti sú tiež horšie ako pri *austenitických* nehrdzavejúcich ocelí. Horšie sa zvarujú s väčším rizikom senzibilizácie zvarov, pokiaľ nie sú stabilizované prídavkami zliatiny. S maximálnym obsahom *niklu* 0,5 % sú výrazne lacnejšie ako *austenitické* nehrdzavejúce ocele [2].

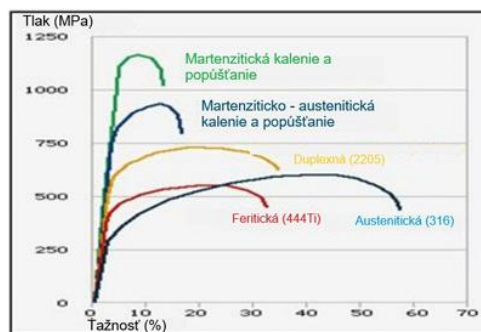
## 1.3 Martenzitické ocele

*Martenzitické* nehrdzavejúce ocele sú podobné nízkolegovaným alebo *uhlíkovým* oceliam a majú podobnú štruktúru ako *feritické* ocele. Vďaka prídavku *uhlíka* ich však možno tepelným spracovaním vytvrdiť a spevniť podobne ako *uhlíkové* ocele. Hlavným legujúcim prvkom je *chróm*, zvyčajne 12 až 15 %, *molybdén* (0,2 až 1 %), žiadny *nikel*, s výnimkou dvoch tried, a 0,1 až 1,2 % *uhlíka*. Ich štruktúra je "telocentrická tetragonálna" (*BCT*) a zaraďujú sa medzi "tvrdé" *feromagnetické* skupiny. V žíhanom stave majú medze klzu v ťahu približne 275 MPa, a preto sa v tomto stave zvyčajne obrábajú, tvárnia za studena alebo spracúvajú za studena. Pevnosť získaná tepelným spracovaním závisí od obsahu *uhlíka* v zliatine. Zvyšovaním obsahu *uhlíka* sa zvyšuje pevnosť a tvrdosť, ale znižuje sa ťažnosť a húževnatosť. Triedy s vyšším obsahom *uhlíka* je možné tepelne spracovať na tvrdosť 60 HRC. Optimálna odolnosť proti korózii sa dosahuje v tepelne spracovanom, t. j. kalenom a popúšťanom stave. V porovnaní s *austenitickými* a *feritickými* druhmi nehrdzavejúcich ocelí sú *martenzitické* nehrdzavejúce ocele menej odolné voči korózii. *Martenzitické* triedy nehrdzavejúcich ocelí sa môžu vyvíjať s prídavkami *dusíka* a *niklu*, ale s nižším obsahom *uhlíka* ako tradičné triedy [2, 3].

## 1.4 Duplexné ocele

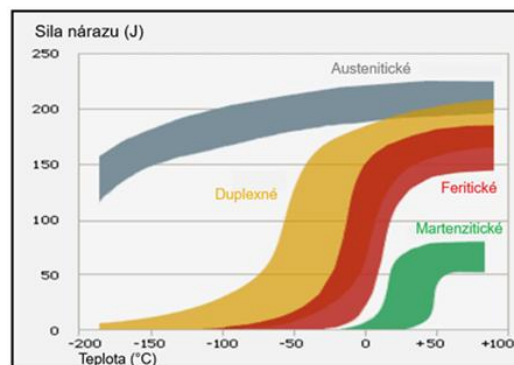
*Duplexné* ocele odolné voči korózii obsahujú viac ako 19 % *Cr* a majú viac ako 30 % *feritu* aj *austenitu*. Moderné *duplexné* ocele odolné voči korózii obsahujú vo svojej mikroštruktúre približne 50 % *austenitu*

a 50 % *feritu* a kombinujú vysokú pevnosť *feritu* s ťažnosťou a húževnatosťou *austenitu*. Bežne používané *duplexné* ocele odolné voči korózii majú dobrú koróznou odolnosť v širokom rozsahu prostredí a vynikajúcu odolnosť voči koróznemu praskaniu pod napätím. Ich vysoká pevnosť a tvrdosť im poskytujú dobrú odolnosť voči eróznej korózii, kavitácii a koróznemu únavu. *Duplexné* ocele odolné voči korózii majú tiež dobrú odolnosť voči atmosférickej korózii a používajú sa na celý rad aplikácií namiesto *uhlíkovej* ocele, pretože nepotrebujú nátery ani významnú údržbu v agresívnej atmosfére [3].



Obr. 1. Porovnanie pevnostných vlastností *duplexných* ocelí s inými oceľami odolnými voči korózii.

*Duplexné* ocele odolné voči korózii majú vynikajúce mechanické vlastnosti (obr. 1). Pevnosť ťahu pri izbovej teplote je viac ako dvojnásobná oproti štandardným *austenitickým* oceliam odolným voči korózii. Avšak, ťažnosť a húževnatosť *duplexných* ocelí odolných voči korózii sú vo všeobecnosti nižšie ako u *austenitických*. V porovnaní s *uhlíkovou* oceľou alebo *feritickými* oceľami odolnými voči korózii je prechod od ťažnej krehkosti u *duplexných* ocelí odolnejších voči korózii plynulejší (obr. 2).



Obr. 2. Porovnanie nehrdzavejúcich ocelí - teploty prechodu z tvárnej na krehkú

*Duplexné* ocele odolné voči korózii si zachovávajú dobrú tvrdosť aj pri nízkych okolitých teplotách ( $-40^{\circ}\text{C}$ ). Všetky štyri typy *duplexných* ocelí odolných voči korózii majú dobrú razovú pevnosť vďaka ich optimalizovanej mikroštruktúre.

## 2 PRECIPITAČNÉ VYTVRDZOVANIE

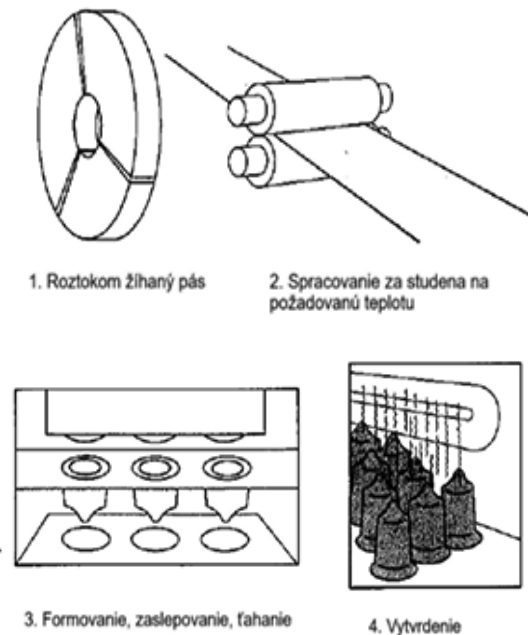
*Precipitačné* vytvrdzovanie ocelí odolných voči korózii vytvára skupinu zliatin, ktoré obsahujú *železo*,

chróm a nikel. Pridaním jedného alebo viacerých prvkov *Al, Cu, Mo, Ti* a *Nb* a tepelným spracovaním sa vytvorí *precipitačne* vytvrdená oceľ. Vďaka tepelnému spracovaniu tieto ocele ponúkajú ideálnu kombináciu vlastností, ktoré sa nachádzajú v *martenzitických* aj *austenitických* oceliach. Podobne ako *martenzitické* ocele môžu tepelným spracovaním dosiahnuť značnú pevnosť, pričom majú aj odolnosť proti korózii, ktorá je vlastná *austenitickým* oceliam odolným voči korózii. *Precipitačne* vytvrdené ocele odolné voči korózii majú pevnosť v ťahu od 850 MPa do 1 700 MPa a medzu klzu od 520 MPa do viac ako 1 500 MPa. Na dosiahnutie ešte vyšších pevností je možné použiť možnosť spracovania za studena pred starnutím. Zliatiny z *precipitačne* vytvrdenej ocele sa ponúkajú v dvoch hlavných stavoch: žihavý stav a popúšťanie.

V žihavom stave sú tieto zliatiny relatívne mäkké a kujné, s tvrdosťou podľa *Rockwella* od B75 do C20. Po tvarovaní môžu byť diely podrobené vytvrdzovaniu starnutím, aby sa dosiahli vyššie hodnoty *Rockwellovej* tvrdosti, zvyčajne od C35 do C49. Hlavným účelom *precipitačne* vytvrdených ocelí odolných voči korózii je ponúknuť materiál, ktorý kombinuje pevnosti *austenitických* a *martenzitických* ocelí odolných voči korózii. Ich cieľom je poskytnúť výnimočnú pevnosť, prispôbené vlastnosti a odolnosť proti korózii pre náročné aplikácie. Prostredníctvom riadeného procesu tepelného spracovania dosahujú *precipitačné* ocele odolné voči korózii zvýšenú pevnosť tvorbou jemných zrazenín vo svojej mikroštruktúre. Využíva sa v rôznych priemyselných odvetviach, napríklad v leteckom, námornom, lekárskom a automobilovom priemysle. *Precipitačné* vytvrdzovanie ocele odolnej voči korózii prebieha prostredníctvom riadeného procesu tepelného spracovania. Začína sa úpravou roztokom, pri ktorej sa zliatina zahrieva, aby sa vytvoril rovnomerný pevný roztok. Nasleduje rýchle ochladenie alebo kalenie, pri ktorom sa legujúce prvky zachytia v kryštálovej štruktúre. Počas starnutia opätovný ohrev spôsobí, že sa tieto prvky vyzrážajú ako jemné častice, čím sa zabrzdí pohyb dislokácií a zvýši sa pevnosť. Voliteľné spracovanie za studena pred starnutím môže zlepšiť vlastnosti. Výsledkom sú lepšie mechanické vlastnosti, ako napríklad vyššia pevnosť a tvrdosť, dosiahnuté interakciou medzi zrazeninami a dislokáciami [4, 5].

Kľúčovou vlastnosťou *precipitačne* vytvrdených ocelí odolných voči korózii je ich schopnosť prejsť počas procesu tepelného spracovania sériou metalurgických zmien. Proces sa začína roztokom žihavým pásom ktorý sa pri izbovej teplote spracuje za studena na požadovanú teplotu. Potom sa diel formuje, zaslepuje a ťahá. Posledným krokom je vytvrdenie vytvarovaných dielov, ktoré majú požadovanú pevnosť a tvrdosť.

Rozpúšťanie, známe aj ako "úprava roztokom", iniciuje proces zrážania a tvrdnutia. Tento krok zahŕňa rozpúšťanie zrazenín a minimalizáciu potenciálnej segregácie zliatiny.



Obr. 3. Proces *precipitačného* vytvrdzovania

Na dosiahnutie tohto cieľa sa materiál zahreje na teplotu rozpúšťania a udržiava sa pri nej, aby sa podporil vývoj rovnomerného tuhého roztoku. Po dosiahnutí tejto rovnomernosti sa materiál odoberie zo zdroja tepla a pripraví sa na ďalšiu fázu. [4] Ďalšia fáza postupu zahŕňa rýchle ochladenie alebo kalenie zliatiny. V tejto fáze je rýchlosť ochladzovania materiálu taká rýchla, že výsledkom je presýtený tuhý roztok obsahujúci prebytočné zložky *medi*. Táto rýchla premena zabraňuje difúzii nukleačných miest. Spôsobuje, že k ochladzovaniu dochádza tak rýchlo, že sa na zliatine nemôžu tvoriť zrazeniny. [5] Fáza starnutia je poslednou fázou procesu zrážania a tvrdnutia. V rámci tohto kroku sa materiál ďalej zahrieva, ale tentoraz pod teplotou rozpúšťania. Tento riadený ohrev spôsobí, že atómy prejdú obmedzenou difúziou na krátke vzdialenosti. Výsledkom je vytvorenie jemne rozptýlených zrážkových vrstiev v materiáli. Tento proces účinne spevňuje zliatinu obmedzením pohybu dislokácií. *Precipitačné* vytvrdzovanie je značne pomalý proces. Proces vyzrážania pevných materiálov sa začína ich vystavením zvýšenej teplote na rozpustenie. Tento proces môže trvať od jednej hodiny až 20 hodín. Výsledná zmes sa môže stať vysoko nasýtenou a ľahko podlieha ďalšej úprave, ako je kalenie, následné starnutie a umelé starnutie. Nasleduje doba namáčania v trvaní 2 až 20 hodín. Kombinácia času namáčania a teploty starnutia sa určuje podľa požadovanej pevnosti konečného výrobku. Presné výpočty času a teploty sú prvoradé. Nadmerné hodnoty môžu viesť k zníženiu zrážok, čo má za následok vyššiu ťažnosť a

nižšiu pevnosť. Alternatívnou metódou na dosiahnutie vytvrdnutia zrazenín je prirodzené starnutie, ktoré si však vyžaduje dlhší časový rámec, od niekoľkých dní až po niekoľko týždňov [4, 5].

### 3 AUSTENITICKÉ PRECIPITAČNE VYTVRDENÉ OCELE

*Austenitické* zliatiny si zachovávajú svoju *austenitickú* štruktúru žiňaním a následným kalením prostredníctvom starnutia. Pri teplote žiňania 1095°C až 1120°C sa *precipitačná* kaliaca fáza rozpúšťa a zostáva v roztoku počas rýchleho ochladzovania. Pri opätovnom zahriatí týchto zliatin v rozsahu 650°C až 760°C dochádza k precipitácii, čo vedie k zvýšenej tvrdosti a pevnosti. Najmä tvrdosť *austenitických* zliatin zostáva nižšia ako tvrdosť *martenzitických* alebo *poloaustenitických precipitačne* vytvrdených ocelí odolných voči korózii a tieto zliatiny si zachovávajú nemagnetické vlastnosti [5].

### 4 POLOAUSTENITICKÉ PRECIPITAČNE VYTVRDENÉ OCELE

Po rýchlom ochladení z teploty žiňania na izbovú teplotu si *poloaustenitické* ocele zachovávajú svoju *austenitickú* štruktúru. Táto vlastnosť im dodáva priaznivú húževnatosť a ťažnosť pre procesy tvárnenia za studena, čím sa uprednostňujú pred *martenzitickými precipitačne* vytvrdenými ocelami, ktoré majú tendenciu byť príliš tvrdé. Na dosiahnutie kalenia a spevnenia je potrebná počiatočná transformácia z *austenitu* na *martenzit*. Tým sa materiál pripraví na následné spracovanie pri teplote starnutia. Zahrievanie *poloaustenitických* ocelí na teplotu 650°C až 870°C vyvoláva vyzrážanie karbidov. Tento proces znižuje prítomnosť prvkov stabilizujúcich *austenit* v matrici, čo umožňuje čiastočnú transformáciu na *martenzit* po ochladení na izbovú teplotu. Čiastočnú premenu *martenzitu* možno dosiahnuť aj ochladením pod *Ms* teplotu (začiatok *martenzitickej* premeny) alebo spracovaním za studena. Z toho vyplýva, že vystužovanie *poloaustenitických precipitačne* vytvrdených ocelí odolných voči korózii ocelí zahŕňa dvojfázový alebo dvojstupňový prístup. Po počiatočnom spracovaní, ktoré podporuje tvorbu *martenzitu*, druhá fáza zahŕňa vystavenie teplote starnutia 455°C až 593°C. Toto vystavenie vedie k zrážaniu, výsledkom čoho sú tvrdosť a celkové spevnenie [6].

### 5 MARTENZITICKÉ PRECIPITAČNE VYTVRDENÉ OCELE

Najmä *martenzitické* zliatiny vykazujú pri teplotách žiňania od približne 1040°C do 1065°C predovšetkým *austenitické* štruktúry. Po ochladení na izbovú teplotu tieto zliatiny podliehajú transformačnému procesu, ktorý mení *austenitovú* štruktúru na *martenzitovú*.

Rýchle ochladenie na vzduchu alebo v oleji po tejto fáze zachováva prítomnosť prísad, ako je *med'* a *kolumbium*, v tuhom roztoku pri teplote okolia. V teplotnom rozpätí približne od 150°C do izbovej teploty dochádza k premene *austenitu* na *martenzit*. Keď sa vysoko presýtený tuhý roztok v *martenzitovej* matrici opätovne zahreje na teplotu starnutia 482°C až 593°C, vyzrážajú sa drobné častice, čo vedie k zvýšenej tvrdosti a pevnosti [6].

### ZÁVER

*Precipitačné* vytvrdzovanie umožňuje dosiahnuť veľmi vysoké mechanické vlastnosti (pevnosť v ťahu aj medzi klzu), často výrazne vyššie ako u klasických *austenitických* alebo *feritických* ocelí. Na rozdiel od niektorých vysokopevných uhlíkových alebo legovaných ocelí, *PH* ocele si zachovávajú dobrú koróznú odolnosť. *Precipitačné* vytvrdzovanie prebieha pri relatívne nízkych teplotách (typicky 480°C až 620°C), čo minimalizuje deformácie a zmeny rozmerov počas tepelného spracovania. Oproti klasickým *martenzitickým* nehrdzavejúcim oceliam (ktoré vyžadujú kalenie a následné popúšťanie), *PH* ocele nevyžadujú kalenie vo vode alebo oleji, čím sa znižuje riziko prasklín alebo deformácií.

### Pod'akovanie

*Táto práca bola podporená projektom KEGA 003ŽU-4/2024 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.*

### LITERATÚRA

- [1] MC CLMENTS, D. (2023): *Learn more about this materials and its different grades available to manufacture.*  
<https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-stainless-steel/>
- [2] TUOLIAN (2023): *The Ultimate Guide for Austenitic Stainless Steel.*  
<https://tuolianmetal.com/austenitic-stainless-steel/>
- [3] KALADHAR, M. - KAMBAGOWNI, V. et al. (2012): *Machining of austenitic stainless steels.* In: Inderscience Publishers  
<https://www.inderscience.com/offers.php?id=48564>
- [4] KHATIB, J., M., 2009. *Sustainability of Construction Materials.* Woodhead Publishing
- [5] DOMÁNKOVÁ, M. - MAREK, P. - MORAVČÍK, R. (2007): *The effect of cold work on the Sensitisation of austenitic stainless steel.* In: Materials and technology.
- [6] PARVATHAVARTINI N. - DAYAL R. K. (2002): *Influence of chemical composition, prior deformation and prolonged thermal aging on sensitisation characteristics of austenitic stainless steels.* In: Journal of Nuclear Materials.

---

# Analýza a výber batériových systémov pre nezávislú elektrickú trakciu v železničnej doprave

---

## Vladimír Samaš, Ing.\*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Martin Bučko, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.bucko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Matúš Adamkovič, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: matus.adamkovic@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Analysis and selection of battery systems for independent electric traction in railway transport

**Abstract:** The increasing emphasis on environmental sustainability in rail transport is leading to a search for alternatives to conventional diesel rolling stock, especially on non-electrified or partially non-electrified local lines. Battery traction electric systems represent one of the prospective options, with their efficiency largely dependent on the choice of appropriate battery technology. Range optimization in this context means achieving the maximum possible distance a vehicle can travel on a single charge, considering weight, power and operating conditions, which tend to be variable during operation. An important aspect is also the analysis of the production and operating costs depending on the lifetime of the different battery types. In this paper, four main types of batteries usable in rail transport are compared - *Li-ion* (conventional *lithium-ion*), *LiFePO<sub>4</sub>* (*LFP*), *Li-Titanate* (*LTO*) and *Lithium Polymer* (*Li-po*). They are compared in terms of technical parameters (energy density, voltage, cycling life), cost effectiveness, safety and suitability for railway applications. The analysis also includes an assessment of the potential of *sodium-ion* (*Na-ion*) batteries as a future alternative.

**Keywords:** independent traction, batteries, regional lines, range optimization.

---

## ÚVOD

Železničná doprava predstavuje jednu z kľúčových zložiek osobnej a nákladnej prepravy so značným dopadom na udržateľnosť dopravného systému ako celku. Hoci veľká časť železničnej infraštruktúry v rozvinutých krajinách prešla elektrifikáciou, značné úseky koľajových tratí - najmä v regionálnych alebo menej vyťažených oblastiach - zostávajú bez trakčného vedenia. V týchto prípadoch sa bežne nasadzujú vozidlá so spaľovacím motorom, predovšetkým dieselové jednotky, ktoré sú však environmentálne aj prevádzkovo menej výhodné. Okrem emisií skleníkových plynov a lokálnych znečisťujúcich látok sa tu prejavuje aj zvýšená hluková záťaž a závislosť od fosílnych palív. Z tohto

dôvodu rastie záujem o alternatívne formy pohonu, predovšetkým o plne elektrické riešenia založené na batériových systémoch [1, 2].

Batériová trakcia predstavuje perspektívne riešenie pre nezávislú prevádzku železničných vozidiel na neelektrifikovaných lokálnych tratiach. Jej hlavnými výhodami sú nulové lokálne emisie, vyššia energetická účinnosť, nižšie prevádzkové náklady a tichý chod. Z pohľadu energetického hospodárstva však ide o mimoriadne náročné aplikácie, ktoré si vyžadujú vysokú mieru optimalizácie - najmä pokiaľ ide o výber vhodného typu akumulátorovej technológie. Rôzne chemické varianty lítium-iónových batérií sa odlišujú v parametroch ako sú menovité napätie, energetická a výkonová hustota,

životnosť, bezpečnostné charakteristiky, tepelná stabilita či odolnosť voči cyklickému zaťaženiu. Klasické *Li-ion*, *LiFePO<sub>4</sub>* (*LFP*), *Li-ion polymérové* (*Li-Po*), *lítium-titaničitanové* (*LTO*) či novšie *sodíkovo-iónové* (*Na-ion*) technológie predstavujú rôzne kompromisy medzi týmito faktormi.

Cieľom tejto publikácie je analyzovať jednotlivé akumulčné technológie z hľadiska ich použiteľnosti v koľajových vozidlách so zameraním na optimalizáciu dojazdu, spoľahlivosť, bezpečnosť a ekonomickú efektívnosť. Osobitná pozornosť sa venuje porovnaniu energetickej hustoty, cyklickej životnosti a vhodnosti pre aplikácie s vysokým výkonom. Súčasne sa skúmajú aj prevádzkové a investičné náklady, ako aj potenciál integrácie alternatívnych technológií (napr. *Na-ion*) v budúcich nízko-nákladových riešeniach.

Z odborného hľadiska je kľúčové identifikovať takú batériovú technológiu, ktorá bude nielen technicky vyhovovať požiadavkám trakčných systémov, ale bude zároveň aj ekonomicky udržateľná a environmentálne prijateľná. V kontexte prebiehajúcej transformácie železničného sektora na bez emisný model tak výber optimálnej batérovej platformy predstavuje strategický rozhodovací faktor.

## 1 LÍTIUM-IÓNOVÉ AKUMULÁTORY

*Lítium-iónové* akumulátory (ďalej len *Li-ion*) na obr. 1 patria medzi najčastejšie využívané akumulčné systémy v rôznych oblastiach vrátane dopravy. Ich popularita spočíva najmä v priaznivom pomere medzi energeticou hustotou, hmotnosťou, životnosťou a dobíjacou efektívnosťou. *Li-ion* batérie sú dostupné v rôznych tvarových a konštrukčných vyhotoveniach. Tradične sa využívajú cylindrické články, najčastejšie typov 18650 a 21700, ktoré sa používajú napríklad v automobilovom priemysle. S cieľom znížiť počet jednotlivých článkov a zjednodušiť konštrukciu batériových modulov sa však čoraz častejšie nasadzujú články väčších rozmerov, ako sú 4680 alebo prizmatické s objemovou kapacitou až niekoľko desiatok Ah. Tento trend je výhodný pre železničné aplikácie, kde sa kladie dôraz na minimalizáciu spojov a jednoduchšiu údržbu. Pod pojmom „*Li-ion*“ sa definuje viacero chemických variácií, ktoré určujú elektrochemické vlastnosti batérie. Medzi najpoužívanejšie typy patria [3]:

- *NMC 811* (*nikel:mangán:kobalt* = 8:1:1),
- *NMC 622*,
- *NMC 532*,
- *NMC 111*,
- *NCA* (*nikel-kobalt-hliník*),
- *LMO* (*lítium-mangán-oxid*).

Menovité napätie týchto článkov sa najčastejšie pohybuje v rozsahu 3,6 V až 3,8 V, pričom

maximálne nabíjacie napätie dosahuje približne 4,2 V (v závislosti od konkrétneho chemického zloženia). Výber konkrétneho typu batérie je podmienený prevádzkovými požiadavkami, ako sú požadovaná energetická a výkonová hustota, životnosť, bezpečnostné aspekty a prevádzkové teploty.

V súčasnosti sa kladie dôraz na optimalizáciu pomeru *niklu, mangánu a kobaltu* - napríklad typ *NMC 811*, ktorý poskytuje vysokú energetickú hustotu, avšak je menej stabilný pri vysokých teplotách.



Obr. 1. *Lítium-iónové* akumulátory

## 2 LÍTIUM- IÓN POLYMÉROVÉ AKUMULÁTORY

*Lítium-polymérové* akumulátory (ďalej len *Li-po*) predstavujú jednu z typov *lítium-iónovej* technológie, pričom ich hlavnou odlišnosťou je forma *elektrolytu*, kde namiesto klasického kvapalného *elektrolytu* používajú gélovitý alebo polymérový *elektrolyt*, ktorý môže byť v niektorých prípadoch čiastočne pevného skupenstva. Tento elektrolyt je zabudovaný medzi elektródami v tzv. *pouch* fólii, ktorá tvorí flexibilný a veľmi ľahký obal článku. *Li-po* články sa vyznačujú nižšou vnútornou impedanciou, čo im umožňuje dosahovať vyšší špičkový výkon a rýchlejšie nabíjanie aj vybíjanie v porovnaní s klasickými *Li-ion* článkami. Z tohto dôvodu sú obľúbené v aplikáciách vyžadujúcich vysoký výkon v krátkom čase - ako napríklad v dronoch.

Významnou výhodou *Li-po* batérií je tiež nižšia hmotnosť pri porovnateľnej kapacite, ako aj možnosť

výroby v rôznych tvaroch a rozmeroch - čo je výhodné v priestorovo náročných aplikáciách. Avšak práve ich flexibilná kapsova konštrukcia si vyžaduje externú mechanickú oporu alebo prítlačnú silu, aby sa zabránilo deformáciám článku počas prevádzky. Medzi hlavné nevýhody patria nižšia životnosť, ktorá je spôsobená najmä oddelením anódy a katódy počas cyklického namáhania. Okrem toho majú *Li-po* články výrazne vyššie riziko nafukovania, výbuch či vznik požiaru, čo ich radí medzi najmenej bezpečné typy *lítiových* batérií. Tieto riziká súvisia s degradáciou *polymérového elektrolytu*, stratou jeho stability a možným skratom medzi elektródami.

Menovité napätie jednotlivých článkov je porovnateľné s *Li-ion* technológiou, zvyčajne 3,7 až 3,8 V, s maximálnym nabíjajúcim napätím do 4,40 V, prípade HV (*High voltage*) batérií [4].

Vzhľadom na nižšiu tepelnú stabilitu a zložitejšiu manipuláciu nie sú *Li-po* batérie v železničnej doprave bežnou voľbou. Ich využitie je vhodnejšie tam, kde je kritická požiadavka na nízku hmotnosť, vysoký výkon a flexibilitu rozmerov, avšak pri dodržaní prísnych bezpečnostných opatrení.

### 3 LÍTIUM- ŽELEZO- FOSFÁTOVÉ AKUMULÁTORY

Lítium-železo-fosfátové akumulátory, známe pod skratkou *LFP* ( $LiFePO_4$ ), predstavujú jednu z najstabilnejších a zároveň najbezpečnejších *lítium-iónových* technológií dostupných na trhu. V porovnaní s inými *lítiovými* chemickými zloženiami sa vyznačujú nižším menovitým napätím okolo 3,2 V, avšak ponúkajú výnimočnú tepelnú a chemickú stabilitu, čo ich predurčuje na použitie v náročných prevádzkových podmienkach. *LFP* články sa štandardne vyrábajú vo forme *pouch* (vreckových), valcovitých alebo prizmatických článkov, pričom sa bežne vyskytujú vo veľkých rozmeroch s kapacitou od desiatok až po stovky ampérhodín (Ah) na článok. Táto konštrukcia je ideálna pre aplikácie s vyššími energetickými nárokmi, kde je zároveň požiadavka na dlhú životnosť a vysokú bezpečnosť.

Medzi hlavné výhody patrí:

- vysoká cyklická životnosť - často presahujúca 3000 až 5000 nabíjajúcich cyklov bez výraznej degradácie,
- odolnosť voči prehrievaniu, preťaženiu aj mechanickému poškodeniu,
- nižšia výrobná cena, vzhľadom na absenciu drahých a toxických materiálov ako kobalt a nikel.

Hoci majú nižšiu energetickú hustotu v porovnaní s *NMC* alebo *NCA* článkami, ich bezpečnosť, robustnosť a spoľahlivosť ich robia ideálnou voľbou pre mobilné aj stacionárne aplikácie, najmä tam, kde nie je kritická požiadavka na hmotnosť alebo objem.

*LFP* články sa dnes široko uplatňujú v elektrických automobiloch a autobusoch, koľajových a priemyselných vozidlách či v stacionárnych batériových úložiskách. Ich výhodou je aj rovnomerný priebeh napätia počas vybíjacieho cyklu. Vzhľadom na ich odolnosť voči vysokým teplotám sú vhodné aj pre regióny s extrémnymi klimatickými podmienkami [5].

### 4 LÍTIUM-TITÁNIČITANOVÉ AKUMULÁTORY

*Lítium-titáničitanové* akumulátory, označované ako *LTO* ( $Li_4Ti_5O_{12}$ ), predstavujú špecifickú vetvu *lítium-iónových* batérií, ktorá sa vyznačuje extrémnou dlhou životnosťou, vysokou bezpečnosťou a výnimočnou rýchlosťou nabíjania a vybíjania. Hlavným rozdielom oproti bežným *Li-ion* technológiám je použitie *titáničitanovej* anódy namiesto *grafitovej*, čo zásadne mení elektrochemické vlastnosti článku. Menovité napätie *LTO* článkov je nižšie - približne 2,3 V, čo je ich najväčšou nevýhodou z hľadiska energetickej hustoty. Na druhej strane, poskytujú veľmi nízku vnútornú impedanciu, čo im umožňuje veľmi vysoké prúdové zaťaženie a sú schopné zvládnuť extrémne rýchle nabíjanie (často v rozsahu niekoľkých minút). Zároveň vykazujú výnimočnú cyklickú životnosť - viac ako 10000 cyklov, v niektorých prípadoch až 40000 cyklov, bez výrazného poklesu kapacity.

Medzi kľúčové vlastnosti patria:

- vysoká tepelná a chemická stabilita,
- schopnosť pracovať v extrémnych teplotách (od  $-30^{\circ}C$  do  $+60^{\circ}C$  a viac),
- vysoká odolnosť voči mechanickému poškodeniu a tepelnému *runaway efektu*,
- rýchla odozva na zmenu cyklickej záťaže, čo ich predurčuje na aplikácie s vysokými nárokmi na rýchlosť nabíjania.

*LTO* články sa zvyčajne vyrábajú v prizmatickej forme a často sa využívajú v špecifických oblastiach, kde je rozhodujúcim parametrom dlhá životnosť, vysoká spoľahlivosť a bezpečnosť - napríklad v železničných aplikáciách, autobusoch, trolejbusoch, vojenskej technike, priemyselných *UPS* systémoch, alebo ako záložné batérie v kritickej infraštruktúre.

*LTO* akumulátory našli využitie aj v batériovej elektrickej jednotke *BEMU*, vyrobenej spoločnosťou *Škoda Transportation a.s.* Jednotka je určená na čiastočne neelektrifikované regionálne trate. Vďaka osadeniu palubných batérií je jednotka schopná prejsť 80 km bez pripojenia na trakčné vedenie, čo umožnilo elimináciu nutnosti nasadiť dieselové jednotky, alebo motorové vozne a tým výrazne zmenšiť negatívny dopad na životné prostredie. Maximálna rýchlosť v batériovom režime  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  plne postačuje na bezpečnú prevádzku na regionálnych tratiach (obr. 2) [6].



Obr. 2. Elektrická jednotka BEMU

Nevýhodou týchto akumulátorov je nižšia energetická hustota ( $30$  až  $80 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), čo znamená väčšie rozmery a vyššia hmotnosť pre rovnakú kapacitu v porovnaní s inými typmi batérií. Z tohto dôvodu sa používajú predovšetkým tam, kde sú iné parametre (bezpečnosť, životnosť, rýchlosť) nadradené kapacite a veľkosti. [7].

## 5 SODÍKOVO- IÓNOVÉ AKUMULÁTORY

Sodíkovo-iónové akumulátory (*Na-ion*) predstavujú perspektívnu alternatívu k tradičným *lítium-iónovým* systémom, predovšetkým v súvislosti s

- energetická hustota je nižšia ako pri *Li-ion* článkoch (typicky okolo  $100$  až  $160 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),
- dobrá teplotná stabilita a možnosť bezpečnej prevádzky v širšom rozsahu teplôt,
- nižšia cena a jednoduchšia výroba, keďže *sodík* a *hliník* môžu nahradiť drahšie kovy ako *kobalt* alebo *meď*.

*Na-ion* smeruje najmä k nasadeniu v oblastiach, kde je prioritou nízka cena a dlhá cyklická životnosť, napríklad v stacionárnych energetických úložiskách, doprave s nižšími nárokmi na dojazd, alebo ako doplnková technológia pre nízkoenergetické systémy. Ich cyklická životnosť je porovnateľná s *LFP* akumulátormi (zvyčajne  $2000$  až  $4000$  cyklov), pričom niektoré verzie vykazujú vysokú rýchlosť nabíjania a dobrú odolnosť voči teplotným výkyvom. Obmedzením zostáva nižšia energetická hustota, čo znižuje ich využiteľnosť v aplikáciách s obmedzeným priestorom a požiadavkou na vysoký dojazd. Výrobcovia ako *CATL*, *Faradion* alebo *HiNa Battery* už predstavili prvé komerčne dostupné riešenia a očakáva sa, že *Na-ion* batérie sa stanú doplnkom alebo alternatívou k *Li-ion* technológii najmä v nízkonákladových aplikáciách [8].

Tab. 1. Porovnanie technológií batérií

Typ	<i>Li-ion</i>	<i>Li-po</i>	<i>LFP</i>	<i>LTO</i>	<i>Na-ion</i>
Napätie [V]	$2,5 \div 4,2$	$3,0 \div 4,4$	$2,0 \div 3,6$	$1,8 \div 2,85$	$1,5 \div 4,3$
$\text{Wh}\cdot\text{l}^{-1}$	$250 \div 730$	$200 \div 600$	$220 \div 350$	$60 \div 160$	$100 \div 250$
$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$	$150 \div 250$	$100 \div 200$	$90 \div 160$	$50 \div 80$	$100 \div 160$
Cena za 1 kWh	$100 \div 250$	$250 \div 500$	$90 \div 200$	$800 \div 1200$	$80 \div 120$
Cyklická životnosť [-]	$500 \div 2000$	$250 \div 1000$	$2000 \div 7000$	$5000 \div 20000$	$2000 \div 4000$
Koeficient životnosti akumulátoru [-]	1,000	0,375	2,813	4,063	1,950
Koeficient nákladu na jednotku vzdialenosti [-]	1,000	5,714	0,315	1,407	0,293

udržateľnosťou, dostupnosťou surovín a cenovou efektívnosťou.

Využívajú *sodík* ( $\text{Na}^+$ ) ako nosič elektrického náboja namiesto *lítiových iónov*, pričom ich princíp činnosti je elektrochemicky veľmi podobný ako pri *Li-ion* technológii. Najväčšou výhodou *Na-ion* batérií je, že *sodík* je podstatne lacnejší a geograficky dostupnejší ako *lítium*, čím odpadá závislosť na ťažko dostupných a geopoliticky nestabilných surovinách. Ďalšou výhodou je ich vyššia environmentálna šetrnosť a nižšia toxicita použitých materiálov, z čoho vyplýva, že majú nižší negatívny dopad na životné prostredie.

Medzi hlavné charakteristiky patria:

- menovité napätie článku sa pohybuje okolo  $3,0 \text{ V}$  v závislosti od použitej *katódovej* a *anódovej* chémie,

## 6 POROVNANIE TECHNOLÓGIÍ

Koeficient životnosti akumulátoru je vyjadrený pomocou pomeru počtu nabíjajúcich cyklov kde ako etalón s hodnotou 1 je zvolený *Li-ion* akumulátor. Z tab.1 teda vyplýva že najpriaznivejší akumulátor z hľadiska počtu nabíjajúcich cyklov je typ *LTO*. Tento typ predstavuje až  $4,06$  násobne lepšiu životnosť ako *Li-ion* akumulátor a naopak medzi najhoršie akumulátory sa v takomto prípade radia *Li-po*, ktoré sa vyznačujú len s  $37,5 \%$  životnosťou voči *Li-ion*.

Koeficient nákladu na jednotku vzdialenosti je vyjadrený bezrozmernou hodnotou predstavujúcou pomery medzi obstarávacou cenou a schopnosťou prejsť určitú vzdialenosť za svoju životnosť. Pri porovnaní s etalónom, a teda *Li-ion* akumulátorom je možné určiť najdrahší akumulátor a zároveň finančne

najvýhodnejší. Za najdrahší sa považuje *Li-po* avšak medzi finančne optimálne sa radia *LFP* a *Na-ion*, ktoré predstavujú približne tretinu obstarávacej ceny.

## ZÁVER

Aj keď sa *LTO* akumulátory v súčasnosti často využívajú v železničnej doprave pre ich extrémne dlhú životnosť, rýchle nabíjanie a vysokú bezpečnosť, ich nízka energetická hustota a vysoká cena predstavujú výrazné obmedzenia. Na druhej strane, *LFP* technológia ponúka dobrý kompromis medzi nákladmi, životnosťou a bezpečnosťou, čím sa javí ako vhodná alternatíva najmä pre prevádzku na regionálnych tratiach s čiastočnou, alebo žiadnou elektrifikáciou. Klasické *Li-ion* batérie poskytujú vyššiu energetickú hustotu, no ich obmedzená životnosť a vyššia závislosť od drahých surovín ako kobalt či nikel znižujú ich atraktivitu. *Li-po* batérie, napriek svojim výkonom, sú pre železničné aplikácie kvôli nízkej bezpečnosti a kratšej životnosti nevhodné. Perspektívnym riešením do budúcnosti sa javia sodíkovno-iónové batérie, ktoré kombinujú nízku cenu, dostupnosť materiálov a ekologickosť, a môžu sa stať rozumnou alternatívou pre menej výkonné, ale nákladovo efektívne aplikácie v železničnej doprave.

## Pod'akovanie

„Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

## LITERATÚRA

[1] STRÁŽOVEC, P. - SUCHÁNEK, A. - ŠT'ASTNIAK, P. - HARUŠINEC, J. (2019): *Detection of residual stress in a railway wheel*. In: 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, TRANSCOM.

[2] LOVSKA, A. - ISHCHUK, V. - DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2025): *Analysis of running properties of a rail multiple-unit with a diesel and a hydrogen powertrain*. In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Karpenko, M., Stosiak, M. (eds) TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA.

[3] DENG, D. (2015): *Li-ion batteries: basics, progress, and challenges*. In: Energy Science and Engineering.

[4] KANGLONG G., SHIHAN Q., HUAPING W., JUNDA H., MINGGUANG W., YULU Y., XIU LI, YURONG R., JIANMIN M. (2022). *High-voltage electrolyte chemistry for lithium batteries*. In: Small Science, Vol. 2022, No. 2, 2100107, pp. 1-18.

[5] BABOO, P. J. - YATOO, A. - M., DENT, M. - NAJAFABADI, H. E. - LEKAKOU, C. - SLADE, R. - HINDER, J. S. - WATTS, F. J. (2022): *Exploring Different Binders for a LiFePO4 Battery. Battery Testing, Modeling and Simulations*. In: Energy, Vol. 15, No. 7, 2332.

[6] ŠKODA TRANSPORTATION a.s. (2024): Dostupné na: <https://www.skodagroup.com/reference/regiopanter-battery-unit>

[7] JULIEN, CH. M. - MAUGER, A. (2024): *Fabrication of Li4Ti5O12 (LTO) as Anode Material for Li-Ion Batteries*. In: Micromachines, Vol. 15, No. 3, 310.

[8] CHENG, D. L. - YANG, L. C. - ZHU, M. (2018): *High-performance anode materials for Na-ion batteries*. In: Rare Materials, Vol. 37, pp. 167-180.

# Kvantitatívne hodnotenie náchylnosti Al-Si-Cu-Mg zliatiny s prídavkom titánu na vznik trhlín za tepla

**Martina Sýkorová, Ing., PhD.**

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

E-mail: [martina.sykorova@fstroj.uniza.sk](mailto:martina.sykorova@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2771

## Quantitative Evaluation of the Hot-Tearing Susceptibility of Al-Si-Cu-Mg Alloy with Titanium Addition

**Abstract:** This study presents a quantitative evaluation of the effect of *titanium (Ti)* additions on the hot-tearing susceptibility of the *AlSi5Cu2Mg aluminium* alloy. The *AlSi5Cu2Mg aluminium* alloy is used in the production of highly stressed cylinder head castings and is characterized by an increased susceptibility to hot tears. The main objective of the study was to determine the extent to which grain refinement of the *aluminium* alloy with an excessive amount of *Ti* affects its susceptibility to hot tears. Thermal analysis was performed to characterize the solidification behaviour of the experimental alloys. Grain refinement was evaluated metallographically by measuring the *Dendrite Arm Spacing (DAS) index*. The results confirmed that the addition of *titanium* led to a decrease in the hot tearing susceptibility of the *AlSi5Cu2Mg* alloy.

**Keywords:** aluminium alloys, titanium, hot-tearing susceptibility.

## ÚVOD

Trhliny za tepla sú závažnou chybou odliatku, ktoré vznikajú počas tuhnutia pri teplote blízkej *solidu*. Vznik trhlín za tepla sa uskutočňuje v oblastiach s nízkou pevnosťou a teda po hraniciach zŕn, pričom dochádza k medzikryštalickému porušeniu. Trhliny vznikajú v dôsledku prítomnosti napätí *endogénneho* a *exogénneho* pôvodu. *Endogénne* napätia vznikajú vplyvom rozdielného zmrašťovania jednotlivých častí odliatku v dôsledku nerovnomerného ochladzovania. Napätia *exogénneho* pôvodu vznikajú vplyvom pôsobenia vonkajších činiteľov, ktoré kladú odpor voči zmrašťovaniu odliatku, ako napr. zlievarenská forma. Zlievarenská forma ovplyvňuje vznik *exogénnych* napätí v závislosti od jej materiálu a konštrukčného vyhotovenia [1].

Nemenej dôležitým faktorom vplývajúcim na vznik trhlín je aj chemické zloženie materiálu. To má vplyv na výslednú náchylnosť zliatiny na vznik trhlín najmä z pohľadu vplyvu jednotlivých chemických prvkov na šírku intervalu tuhnutia [2]. Pri *Al-Si-Cu-Mg* zliatinách má *med'* výrazný vplyv na náchylnosť zliatiny na vznik trhlín, a to najmä z dôvodu ovplyvnenia šírky intervalu tuhnutia. Vo všeobecnosti sa so vzrastajúcim obsahom *Cu* v zliatine zároveň rozširuje aj interval tuhnutia, čo spôsobuje zníženie odolnosti zliatiny voči vzniku trhlín [3]. Štúdie preukázali, že jednou z možností ako znížiť

náchylnosť zliatiny na vznik trhlín za tepla, je očkovanie *Al-Si-Cu-Mg* zliatin. *Jang* uvádza, že prídavok *Ti* vedie k zníženiu náchylnosti hliníkových zliatin na vznik trhlín za tepla v dôsledku lepšieho dosadzovania taveniny do medzidendritických priestorov [4].

Zníženie náchylnosti *Al-Si-Cu-Mg* zliatin na vznik trhlín za tepla prostredníctvom očkovania môže vo významnej miere rozšíriť oblasť použitia *Al-Si-Cu-Mg* zliatin s vysokou náchylnosťou na praskanie.

Podutektická hliníková zliatina *AlSi5Cu2Mg* nachádza uplatnenie v oblasti produkcie vysokonamáhaných odliatkov pre automobilový priemysel (napr. hláv valcov). Zliatina *AlSi5Cu2Mg* je výrobcom navrhnutá so špecifickým chemickým zložením, ktoré výrazne limituje obsah *Ti* v tavenine (max. 0,03 hm. % *Ti*). Štúdie uvádzajú, že optimálny očkujúci účinok *podeutektických hliníkových* zliatin je dosiahnutý pridaním 0,10 hm. % *Ti* [5]. Predpis chemického zloženia *AlSi5Cu2Mg* zliatiny stanovený výrobcom obmedzuje použitie štandardných očkovadiel typu *Al-Ti* a *Al-Ti-B*. Aj napriek obmedzeniam vyplývajúcich z predpisu chemického zloženia bol v experimentálnej práci zámerne zvolený prídavok *Ti*, ktorý v nadlimitnom množstve prevyšoval odporúčania výrobcu. Cieľom výskumu bolo zistiť v akej miere vplýva nadlimitné množstvo

Ti na výslednú náchylnosť hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* na vznik trhlín za tepla.

## 1 METODIKA A REALIZÁCIA EXPERIMENTOV

Pre experimentálne účely bola zvolená *podeutektická hliníková* zliatina *AlSi5Cu2Mg*, ktorá bola označená ako referenčná zliatina. Chemické zloženie referenčnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* je uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Chemické zloženie hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* [hm.%].

Si	Cu	Mg	Fe	Sr	Ti	Al
5,49	1,92	0,29	0,19	0,01	0,013	Zv.

*Podeutektická hliníková* zliatina *AlSi5Cu2Mg* bola roztavená v elektrickej odporovej peci. Experimentálne zliatiny boli získané očkovaním referenčnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg* odstupňovaným prídavkom Ti (0,1; 0,2 a 0,3 hm. % Ti), pričom obsah Ti bol zámerne zvolený nad rámec odporúčania výrobcu (max. 0,03 hm. % Ti). V závislosti od prídavku Ti boli experimentálne zliatiny označené *Ti-0,1*, *Ti-0,2* a *Ti-0,3*. Ti bol do taveniny pridaný vo forme predzliatiny *AlTi5B1* pri teplote  $770^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Experimentálne zliatiny boli vyhotovené gravitačným odlievaním v otvorenej atmosfére do kovovej formy. Kovová forma bola pred odlievaním ošetrená *grafitovým* náterom. Teplota kovovej formy bola počas odlievania udržiavaná v teplotnom intervale od 180 do  $200^{\circ}\text{C}$ . Teplota odlievania experimentálnych zliatin bola z dôvodu vyššieho prídavku Ti a horšej rozpustnosti predzliatiny *AlTi5B1* stanovená na  $755^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . V tab. 2 uvádzajúcej chemické zloženie zliatin *Ti-0,1*; *Ti-0,2* a *Ti-0,3* možno vidieť, že reálny obsah Ti v tavenine bol nižší v dôsledku neúplného roztavenia predzliatiny *AlTi5B1*.

Tab. 2. Chemické zloženie experimentálnych zliatin [hm. %].

Prídavok Ti	Si	Cu	Mg	Ti	Sr	Al
<i>Ti-0,1</i>	5,81	1,84	0,27	<b>0,09</b>	0,007	Zv.
<i>Ti-0,2</i>	5,72	1,88	0,23	<b>0,17</b>	0,005	Zv.
<i>Ti-0,3</i>	5,62	1,84	0,22	<b>0,25</b>	0,006	Zv.

### 1.1 Termická analýza

Termická analýza bola uskutočnená s cieľom vyhodnotiť priebeh tuhnutia referenčnej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*. Referenčná zliatina bola odliata do skúšobného téglika. Na dne skúšobného téglika bol umiestnený termočlánok typu K, ktorý zaznamenával teplotný priebeh tuhnutia taveniny. Teplotný priebeh tuhnutia taveniny bol zapísaný na tzv. meraciu kartu, ktorá umožňuje prepis získaného súboru údajov do

analogového zápisu. Analogový zápis bol následne prepísaný cez softvér *LabView 2 Hz* do numerického a grafického zápisu. *Softvérom LabView 2 Hz* bola vyhotovená krivka ochladzovania referenčnej zliatiny v závislosti od času. Vzhľadom na to, že teplota kryštalizácie jednotlivých fáz je na krivke ochladzovania ťažko identifikovateľná, bola vyhotovená prvá derivácia krivky ochladzovania. Teplota kryštalizácie jednotlivých fáz sa na prvej derivácii krivky ochladzovania vyznačuje zmenou priebehu krivky [5].

### 1.2 Hodnotenie DAS indexu

Vplyv odstupňovaného prídavku Ti na zjemnenie zrna bol posudzovaný metalograficky na základe hodnotenia *DAS indexu* (*Dendrite Arm Spacing*). *DAS index* určuje vzdialenosti sekundárnych osí *dendritov*, pričom platí, že čím menšia je hodnota *DAS indexu* tým jemnejšia je štruktúra a tým menšie sú segregáčné vzdialenosti. Hodnota *DAS indexu* sa vypočíta ako podiel dĺžky *dendritov* (*L*) a počtu sekundárnych osí *dendritov* (*n*):

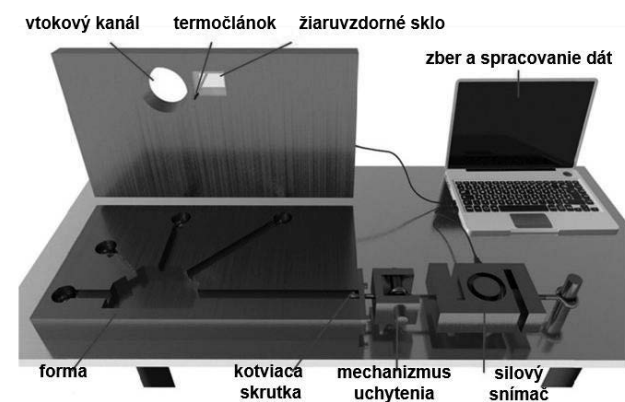
$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad (1)$$

*DAS index* je priamo závislý len od rýchlosti ochladzovania v intervale tuhnutia. Pri príprave experimentálnych zliatin bol kladený dôraz na zabezpečenie približne rovnakých podmienok tuhnutia. Z tohto hľadiska by mohlo byť hodnotenie *DAS indexu* orientačným ukazovateľom miery očkujúceho účinku Ti.

Metalografické hodnotenie *DAS indexu* bolo uskutočnené prostredníctvom softvéru *Quick Photo Industrial 3.1*.

### 1.3 Hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín

Meracie zariadenie na hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín za tepla je zobrazené na obr. 1.



Obr. 1. Meracie zariadenie na hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín za tepla

Konštrukcia formy bola nadimenzovaná tak aby podnecovala vznik trhlín v odliatku počas tuhnutia. Kovová forma bola pred odlievaním ošetrená

separačným *grafitovým* náterom. Teplota formy bola udržiavaná v teplotnom intervale  $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Tavenina bola vtokovým kanálom dopravovaná do dutiny formy. Dutina formy pozostávala z piatich ramien rôznej dĺžky. Štyri z piatich skúšobných ramien boli ukončené guľovým zakončením s cieľom zabezpečiť vznik brzdného zmraštenia, ktoré vedie k zvýšeniu náchylnosti zliatiny k tvorbe trhlín. Tieto ramená boli určené na kvantitatívne hodnotenie náchylnosti zliatiny na vznik trhlín.

Kvantitatívne hodnotenie bolo uskutočnené na základe stanovenia tzv. *Hot Tearing Indexu (HTI)*. Pre kvantitatívne hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín boli určené 4 ramená rôznej dĺžky. Hodnota *HTI* bola určená dvomi rôznymi metódami (*HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>*) a ich vzájomnou kombináciou (*HTI<sub>3</sub>*).

Prvý spôsob získania hodnoty *HTI* vo svojich štúdiách popisuje *Wu* [6]. Hodnota *HTI<sub>1</sub>* je určená na základe počtu trhlín (*PT*), charakteru a veľkosti trhliny (*CHT*) a počtu posudzovaných ramien (*PR*) nasledujúcou rovnicou (2).

$$HTI_1 = \frac{PT \cdot \sum CHT}{PR} \quad (2)$$

Druhú metódu stanovenia hodnoty *HTI<sub>2</sub>* vo svojich prácach popisujú *Song* a *Akhyar* [7, 8]. V tomto prípade bola hodnota *HTI<sub>2</sub>* určená v závislosti od charakteru a veľkosti trhliny (*CHT*), polohy trhliny na skúšobnom ramene (*KPT*) a dĺžke skúšobného ramena (*KDR*) nasledovne:

$$HTI_2 = \sum CHT \cdot KPT \cdot KDR \quad (3)$$

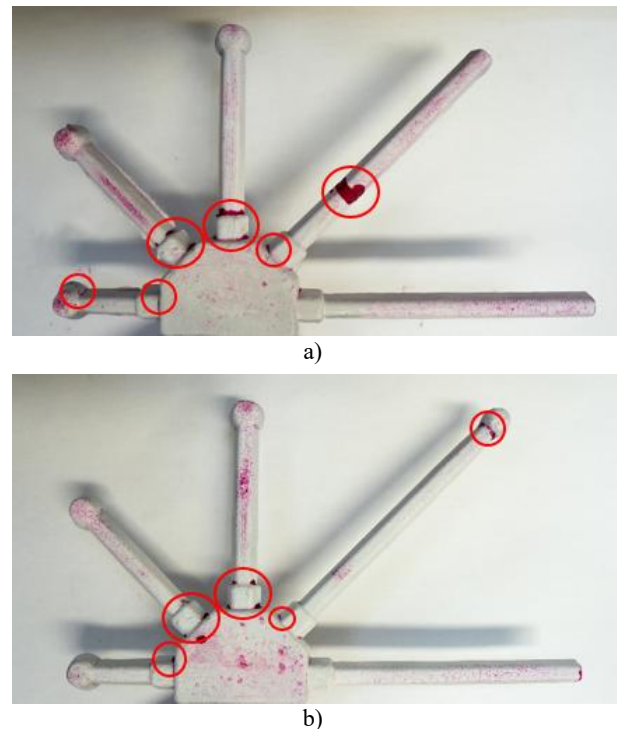
Koeficient charakteru a veľkosti trhliny *CHT* pri hodnotení *HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>* udáva mieru závažnosti trhliny. *Li* uvádza kategorizačný systém, ktorý v závislosti od závažnosti trhliny rozdeľuje koeficient *CHT* do štyroch kategórií (obr. 2) [9].



**Obr. 2. Hodnotenie *CHT* na základe kategorizácie trhliny**

Príslušná hodnota koeficientu *CHT* bola stanovená vizuálnou kontrolou trhlín na štyroch skúšobných ramenách. Na potvrdenie charakteru trhlín bola vykonaná kapilárna skúška (obr. 3). Kapilárna skúška bola vykonaná v súlade s *STN EN ISO 3452-1*. Pre kapilárnu skúšku bol použitý skúšobný systém s označením *IICe* podľa *STN EN ISO 3452-1*. Pre farebnú kapilárnu skúšku bol použitý kapilárny systém od firmy *Diffu-therm* v zložení čistič *BRE*, červený penetrant *BDR* a biela vývojka *BEA*.

Penetračný čas bol 60'. Hodnotilo sa v dvoch krokoch. Prvé hodnotenie bolo ihneď po zaschnutí vývojky a druhé po uplynutí vyvolávacieho času 15'. Kontrola bola vykonaná pri teplote  $22^{\circ}\text{C}$ .



**Obr. 3. Príklad kapilárnej skúšky: a) referenčná zliatina, b) Ti-0,3**

Tabuľka 3 uvádza hodnoty koeficientu dĺžky ramena (*KDR*) a koeficientu polohy trhliny (*KPT*) na stanovenie hodnoty *HTI<sub>2</sub>*.

**Tab. 3. Kategorizačný systém na stanovenie hodnôt *KDR* a *KPT***

Koeficient dĺžky ramena	<i>KDR</i>	Koeficient polohy trhliny	<i>KPT</i>
Rameno 1 (64,5 mm)	1	Dolná časť ramena	1
Rameno 2 (104,5 mm)	2	Stredná časť ramena	3
Rameno 3 (124,5 mm)	3	Horná časť ramena	2
Rameno 4 (184,5 mm)	4		

Kombináciou výpočtov pre stanovenie hodnoty *HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>* bol získaný tretí spôsob výpočtu hodnoty *HTI<sub>3</sub>* podľa vzťahu (4). Hodnota *HTI<sub>3</sub>* poskytuje komplexnejší pohľad na náchylnosť zliatiny na vznik trhlín.

$$HTI_3 = \frac{PT \cdot \sum (CHT \cdot KDR \cdot KPT)}{PR} \quad (4)$$

Výsledné hodnoty *Hot Tearing Indexu (HTI<sub>1</sub>, HTI<sub>2</sub> a HTI<sub>3</sub>)* možno charakterizovať ako mieru náchylnosti na vznik trhlín za tepla *Hot Tears Susceptibility (HTS)* (tab. 4).

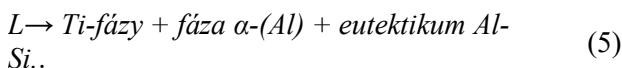
Tab. 4. Určenie miery náchylnosti na vznik trhlín za tepla (HTS).

$HTI_x$ index	< 0,5	0,5÷1,25	1,25÷2,25	2,25÷3,5	> 3,5
HTS	minimálna	malá	mierna	vysoká	veľmi vysoká

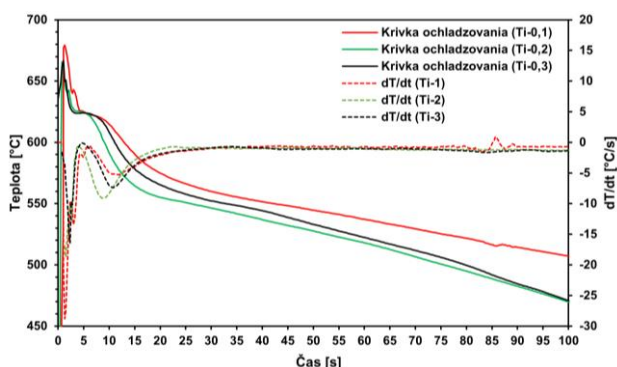
## 2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

### 2.1 Termická analýza

Záznam z termickej analýzy pre zliatiny  $Ti-0,1$ ,  $Ti-0,2$  a  $Ti-0,3$  je zobrazený na obr. 4. Na krivkách ochladzovania bola na začiatku tuhnutia zliatin  $Ti-0,1$ ,  $Ti-0,2$  a  $Ti-0,3$  zaznamenaná rekalescencia v oblasti teplôt od 638 do 645°C. Na zázname termickej analýzy referenčnej zliatiny nebola rekalescencia v teplotne vymedzenej oblasti prítomná. Zhang vo svojich štúdiách uvádza, že priebeh tuhnutia  $Al-Si$  zliatin očkovaných  $Ti$  možno popísať nasledovne [10]:



Zo záznamu termickej analýzy a na základe uvedenej štúdie [10] vyplynulo, že tuhnutie  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny s prídavkom  $Ti$  začína kryštalizáciou fáz na báze  $Ti$ . Kryštalizácia  $Ti$ -fáz prebiehala pred tuhnutím primárnej fázy  $\alpha\text{-}(Al)$  v oblasti teplôt od 638 do 645°C.



Obr. 4. Krivky ochladzovania zliatin s odstupňovaným prídavkom  $Ti$  a ich prvé derivácie

Teploty kryštalizácie príslušných fáz, ktoré boli získané z termickej analýzy sú uvedené v tab. 5.

Z nadobudnutých výsledkov bolo preukázané, že očkovanie  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny  $Ti$  viedlo k zvýšeniu teploty likvidu ( $T_L$ ).  $T_L$  narastala s narastajúcim hm. %  $Ti$ . Teplota likvidu zliatiny bez prídavku  $Ti$  bola 610°C. Najvyšší nárast  $T_L$  bol zaznamenaný zliatinou s prídavkom 0,3 hm. %  $Ti$  ( $Ti-0,3$ ).  $T_L$  v porovnaní s referenčnou zliatinou v tomto prípade vzrástla o 35°C. Výsledky termickej analýzy zliatin s prídavkom  $Ti$  sú v súlade so Samuelovými štúdiami [11].

Tab. 5. Teploty kryštalizácie príslušných fáz v experimentálnych zliatinách [°C]

Zliatina	$T_L$	Eutektikum $Al-Si$	$Mg_2Si$	$Al_2Cu$	$T_S$
Ref. zliatina	610	567	555	543	517
$Ti-0,1$	638	554	521	506	483
$Ti-0,2$	640	551	531	507	481
$Ti-0,3$	645	553	533	510	486

Tuhnutie zliatin s prídavkom  $Ti$  pokračovalo kryštalizáciou eutektickej fázy  $Al-Si$  pri teplote okolo 553°C. V porovnaní s referenčnou zliatinou klesla teplota kryštalizácie eutektickej fázy  $Al-Si$ . Pokles teploty kryštalizácie bolo taktiež možné pozorovať pri intermetalických fázach  $Mg_2Si$  a  $Al_2Cu$ . Tuhnutie končí na teplote solidu ( $T_S$ ).  $T_S$  klesla vplyvom prídavku  $Ti$  v porovnaní s referenčnou zliatinou, pričom najväčší pokles 36°C bol zaznamenaný zliatinou  $Ti-0,2$ . Z uvedeného vyplýva, že v dôsledku prídavku  $Ti$  do  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny dochádza k ovplyvňovaniu teploty kryštalizácie príslušných fáz a rozširovaniu intervalu tuhnutia  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny, čo môže viesť k zvýšeniu náchylnosti na vznik trhlín za tepla.

### 2.2 Hodnotenie DAS indexu

Hodnoty  $DAS$  indexu referenčnej zliatiny a zliatin s prídavkom  $Ti$  sú uvedené v tab. 6. Uvedené hodnoty predstavujú priemerné hodnoty z piatich meraní  $DAS$  indexu.

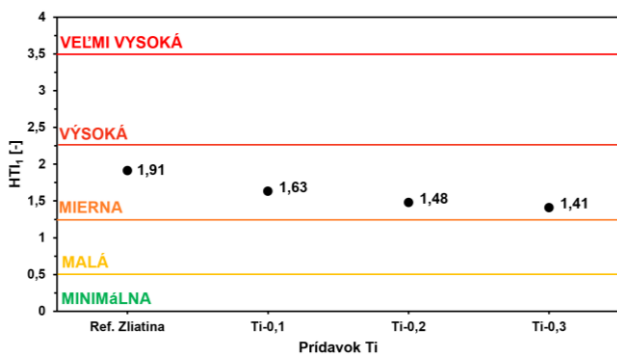
Tab. 6. Hodnoty  $DAS$  indexu experimentálnych zliatin [ $\mu m$ ]

	Ref. zl.	$Ti-0,1$	$Ti-0,2$	$Ti-0,3$
$DAS$ index	26,8	21,1	20,3	19,9

Referenčná zliatina dosiahla hodnotu  $DAS$  indexu = 26,8  $\mu m$ . Vplyvom prídavku 0,1 hm. %  $Ti$  bol v porovnaní s referenčnou zliatinou zaznamenaný pokles  $DAS$  indexu o 21 %. Hodnota  $DAS$  indexu zliatiny  $Ti-0,2$  klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 24 %. Pokles hodnoty  $DAS$  indexu naznačuje dosiahnutie jemnejšej štruktúry, ktoré vzhľadom na striktné dodržiavanie podmienok tuhnutia možno pripísať očkujúcemu účinku  $Ti$ . Ďalším zvyšovaním hm. %  $Ti$  nebol zaznamenaný výraznejší pokles  $DAS$  indexu, čo je v súlade so štúdiami, ktoré uvádzajú, že zvyšovaním  $Ti$  nad 0,20 hm. % nedochádza k významnejšiemu zjemneniu štruktúry [10].

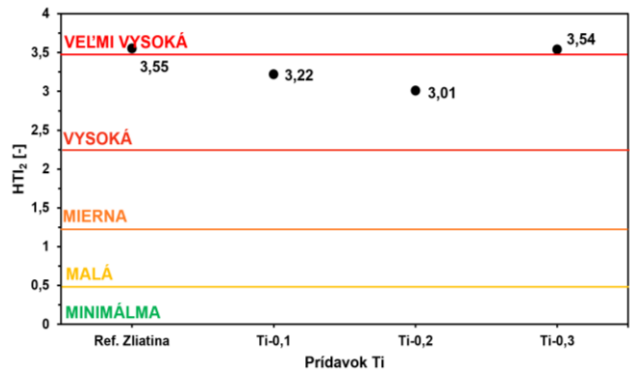
### 2.3 Kvalitatívne hodnotenie náchylnosti $AlSi5Cu2Mg$ zliatiny na vznik trhlín

Hodnoty indexu  $HTI_1$  sú pre referenčnú zliatinu a zliatinu s prídavkom  $Ti$  uvedené na obr. 5. Na základe posúdenia počtu trhlín, charakteru a veľkosti trhlín na príslušných skúšobných ramenách bol výpočtom stanovený index pre referenčnú zliatinu  $HTI_1 = 1,91$ . Z hľadiska hodnotenia miery náchylnosti na vznik trhlín  $HTS$  bola zliatina zaradená medzi zliatiny s miernou náchylnosťou na vznik trhlín. Zliatiny s prídavkom  $Ti$  vykazovali mierny pokles hodnoty indexu  $HTI_1$ , pričom jeho hodnota klesala s narastajúcim hm. %  $Ti$ . Pridaním 0,10 hm. %  $Ti$  hodnota posudzovaného indexu klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 14 %. Zliatinou  $Ti-0,2$  bola dosiahnutá hodnota indexu  $HTI_1 = 1,48$ . Pokles v porovnaní s referenčnou zliatinou činil 22 %. Najnižšia hodnota bola získaná zliatinou s prídavkom 0,3 hm. %  $Ti$ . Hodnota  $HTI_1$  indexu zliatinu  $Ti-0,3$  klesla z 1,91 na 1,41 (pokles o 26 %). Zliatiny s prídavkom  $Ti$  boli napriek miernemu poklesu  $HTI_1$  klasifikované medzi zliatiny s miernou náchylnosťou na vznik trhlín.



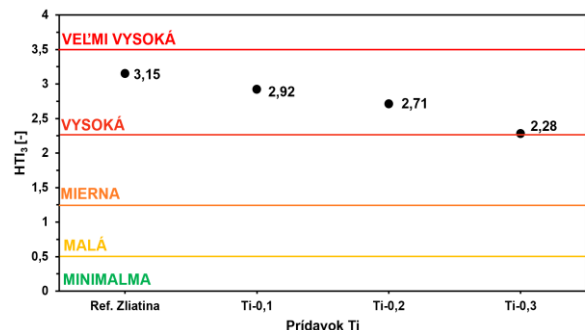
Obr. 5. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_1$ .

Hodnoty indexu  $HTI_2$  pre referenčnú zliatinu a zliatinu s prídavkom  $Ti$  sú zobrazené na obr. 6. Druhý spôsob stanovenia  $HTI_2$  zohľadňoval okrem charakteru a veľkosti trhliny aj polohu trhliny na skúšobnom ramene a dĺžku skúšobného ramena. Z tohto hľadiska boli dosiahnuté hodnoty  $HTI_2$  podstatne vyššie ako hodnoty indexu  $HTI_1$ . Referenčná zliatina dosiahla hodnotu indexu  $HTI_2 = 3,55$  a bola zaradená medzi zliatiny s veľmi vysokou náchylnosťou na vznik trhlín. Zliatinami s prídavkom  $Ti$  bol  $\leq 0,2$  hm. %  $Ti$  zaznamenaný pokles hodnoty indexu  $HTI_2$ . V porovnaní s referenčnou zliatinou vykazovali zliatiny  $Ti-0,1$  a  $Ti-0,2$  pokles indexu  $HTI_2$  o 7 % a 13 %.  $Ti-0,1$  a  $Ti-0,2$  boli klasifikované medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla.  $HTI_2$  stanovená pre zliatinu  $Ti-0,3$  nadobudla hodnotu blízku  $HTI_2$  stanovenej pre referenčnú zliatinu. Zliatina  $Ti-0,3$  bola podobne ako zliatina bez prídavku  $Ti$  zaradená medzi zliatiny s veľmi vysokou náchylnosťou na vznik trhlín.



Obr. 6. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_2$ .

Hodnota indexu  $HTI_3$  bola získaná vzájomnou kombináciou vzťahov pre výpočet  $HTI_1$  a  $HTI_2$  (obr. 7). Zliatina bez prídavku  $Ti$  dosiahla hodnotu  $HTI_3 = 3,15$  a bola klasifikovaná medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla. Následne bol pozorovaný pokles hodnoty indexu  $HTI_3$  s narastajúcim hm. %  $Ti$ . V dôsledku prídavku 0,1 hm. %  $Ti$  klesol index  $HTI_3$  z 3,15 na 2,92 (pokles o 7 %). Zliatinou  $Ti-0,2$  bol zaznamenaný pokles  $HTI_3$  v porovnaní s referenčnou zliatinou o 14 %. Najpriaznivejšie výsledky boli v tomto prípade získané zliatinou  $Ti-0,3$ . Hodnota indexu  $HTI_3$  klesla v dôsledku prídavku 0,3 hm. %  $Ti$  z 3,15 na 2,28 takmer o 28 %. Zliatiny s prídavkom  $Ti$  boli podobne ako referenčná zliatina klasifikované medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla.



Obr. 7. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_3$ .

### ZÁVER

Termickou analýzou experimentálnych zliatin bolo preukázané, že s prídavkom  $Ti$  dochádza k rozširovaniu intervalu tuhnutia  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny. Rozširovanie intervalu tuhnutia je sprevádzané zvýšením náchylnosti zliatiny na vznik trhlín za tepla. Napriek rozšíreniu intervalu tuhnutia zliatin s prídavkom  $Ti$  bolo na základe zosumarizovaných výsledkov kvantitatívneho hodnotenia preukázané, že zliatiny s prídavkom  $Ti$  vykazovali nižšiu náchylnosť na vznik trhlín za tepla v porovnaní s referenčnou zliatinou  $AlSi5Cu2Mg$ .

V tomto prípade bol rozhodujúcim faktorom pozitívny vplyv zjemňujúceho účinku  $Ti$  na primárnu

fázu  $\alpha$ -(Al). Vplyvom zjemnenia primárnej fázy  $\alpha$ -(Al) bolo zabezpečené lepšie dosadzovanie taveniny do medzidendritických priestorov, čím dochádzalo k zlepšeniu náchylnosti na vznik trhlín za tepla. Pozitívne zníženie náchylnosti na vznik trhlín za tepla zliatiny *AlSi5Cu2Mg* v dôsledku prídavku *Ti* by mohlo viesť k zvýšeniu životnosti odliatkov hláv valcov. Obmedzenie výrobcu, ktoré výrazne limituje obsah *Ti* v *AlSi5Cu2Mg* zliatine však zamedzuje použitie predzliatin *Al-Ti-B* v nami uvedenom rozsahu. Predpokladá sa, že toto obmedzenie vychádza z negatívneho vplyvu *Ti* na tepelnú vodivosť, ktorá taktiež vo významnej miere ovplyvňuje životnosť hláv valcov.

### Pod'akovanie

Článok bol vytvorený v rámci projektu grantovej agentúry KEGA: 003ŽU-4/2024. Autori týmto ďakujú agentúre za podporu.

### LITERATÚRA

- [1] PASTIRČÁK, R. - BOLIBRUCHOVÁ, D. - SLÁDEK, A. (2015): *Teória zlievania*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS - vydavateľské centrum ŽU, 155 pages.
- [2] ZHAO, B. - YE, B. - WANG, L. - BAI, Y. - YU, X. - WANG, Q. - YANG, W. (2022): *Effect of Ageing and Thermal Exposure on Microstructure and Mechanical Properties of a HPDC Al-Si-Cu-Mg alloy*. In: *Materials Science and Engineering: A*, 849, 143463.
- [3] OH, S. - MUNKHDELGER, C. - KIM, H. (2021): *Effect of Cu Content on Hot Tearing Susceptibility in Al-Si-Cu Aluminum Casting Alloy*. In: *Korea Foundry Soc.*, 41, pp. 419-433.
- [4] JANG, J. - KUMAR, L. - YU, H. - SHINK, K. (2022): *Effects of Cr and Ti Addition on Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Al-7Si-3Mg Die-Casting Alloys*. In: *Metals and Materials International*, 29, pp. 204-214.
- [5] PASTIRČÁK, R. - BOLIBRUCHOVÁ, D. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS - vydavateľské centrum ŽU, 167 pages.
- [6] WU, Q. (2014): *Study of Hot Tearing in cast and Wrought Aluminum Alloys*. Bakalárska práca, Massachusetts: Worcester polytechnic institute, 46 pages.
- [7] SONG, J. - PAN, F. - ATRENS, A. - JIANG, B. - ZHANG, M. - LU, Y. (2016): *A Review on Hot Tearing of Magnesium Alloys*. In: *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, pp. 152-172.
- [8] AKHYAR, A. - SUYITNO, V. - ISWANTO, P. T. (2017): *Hot Tearing Susceptibility of Aluminum Alloys Using CRCM-Horizontal Mold*. In: *Results in Physics*, 7.
- [9] LI, Y. - LI, H. - KATGERMAN, L. - DU, Q. - ZHANG, J. - ZHUANG, L. (2021): *Recent Advances in Hot Tearing During Casting of Aluminium Alloys*. In: *Progress in Materials Science*, 35.
- [10] ZHANG, Y. - YAN, F. - ZHAO, Y. - SONG, CH. - HOU, H. (2022): *Effect of Ti on Microstructure and Mechanical Properties of Die-Cast Al-Mg-Zn-Si Alloy*. In: *Materials Research Express*, 6, 036526.
- [11] SAMUEL, A. M. - MOHAMED, S. S. - DOTY, H. W. - SAMUEL, F. H. (2018): *Effect of Melt Temperature on the Effectiveness of the Grain Refining in Al-Si Castings*. In: *Materials Science and Engineering*, 7626219.

---

# Numerická štúdia vplyvu teploty jadra na tepelné zaťaženie vysokotlakovej formy pri výrobe odliatkov pre EC motory

---

**Marek Matejka, Ing., PhD.\***

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

**Radka Podprocká, Ing., PhD.**

Rosenberg-Slovakia s.r.o.,  
Kováčska 38, 044 25 Medzev,  
E-mail: [podprockaradka@gmail.com](mailto:podprockaradka@gmail.com), E-mail: + 421 918 085 069

## Numerical study of the effect of core temperature on the thermal load of a high-pressure die casting mold in the production of EC motor components

**Abstract:** Thermal loading of the die in high-pressure die casting is a complex phenomenon driven by the interaction of the molten metal with the die surface. This interaction leads to cyclic temperature changes, steep thermal gradients, and thermal shock, all of which significantly impact the integrity of the die. During each injection cycle, dramatic temperature changes occur on the die surface. *Molten aluminum* comes into contact with the die surface, which can reach peak temperatures exceeding 450°C, causing high temperature fluctuations. The aim of the experiment was to investigate the influence of two different thermoregulation media - water and *ITERM 6MB* heat transfer oil - on the thermal behavior of the die cores for *EC 75* and *EC 55* castings. Experimental results showed that water cooling leads to more efficient heat dissipation and lower temperatures in the core, while oil tempering ensures higher and more stable temperatures. Analysis of the temperature distribution in the die closing and opening phases confirmed that while water cooling leads to more intensive cooling, oil tempering contributes to a more uniform thermal regime and a potential reduction in thermal shock, which is crucial for die life and casting quality. Significant differences were observed in the cores' thermal behavior for *EC 75* and *EC 55* castings, despite their differing tubular section heights.

**Keywords:** high-pressure die casting, thermal loading, thermoregulation, numerical simulation.

---

## ÚVOD

Vysokotlakové odlievanie (*HPDC*) zahŕňa komplexné tepelné zaťaženie formy. Tento jav je primárne spôsobený interakciou roztaveného kovu s povrchom formy. Dôsledkom sú cyklické zmeny teploty, strmé teplotné gradienty a tepelný šok, ktoré zásadne ovplyvňujú celistvosť formy [1].

Počas každého vstrekovacieho cyklu dochádza k dramatickým teplotným zmenám na povrchu formy. Roztavená hliníková tavenina, vstrekaná pri teplotách okolo 680 až 750°C, prichádza do kontaktu s povrchom formy, ktorý môže dosiahnuť špičkové teploty nad 450°C. Tento kontakt spôsobuje vysoké teplotné fluktuácie nielen na povrchu formy, ale aj v jej objeme. Teploty formy sa môžu v priebehu jedného cyklu výrazne meniť, napríklad od 320°C počas vstrekovania až po približne 180°C po vyhodení odliatku [2]. Tieto cyklické zmeny sa neustále opakujú s každým vstrekom. Rýchlosť

ochladzovania v *HPDC* je typicky veľmi vysoká, pohybujúca sa v rozmedzí 50 až 125°C·s<sup>-1</sup>. Tepelný tok ( $q$ ) medzi roztaveným kovom a formou, ktorý je zodpovedný za tieto zmeny, sa riadi *Fourierovým zákonom* vedenia tepla (1) [3]:

$$q = -k \cdot \left( \frac{dT}{dx} \right), \quad (1)$$

kde  $k$  je tepelná vodivosť materiálu,  $dT/dx$  je teplotný gradient.

To znamená, že účinnosť prenosu tepla je priamo úmerná tepelnej vodivosti formy a strmosti teplotného gradientu [4].

Kľúčovým aspektom je dynamický rozsah tepelného zaťaženia. Merania ukázali, že materiál formy v blízkosti povrchu dutiny je namáhaný teplotnými fluktuáciami ( $\Delta T$ ) presahujúcimi 200°C. Okrem toho, teplotné rozdiely presahujúce 50°C v rámci formy môžu viesť k významnému tepelnému napätiu. Tieto kvantifikované hodnoty podčiarkujú, že problémom

nie je len absolútna teplota formy, ale predovšetkým veľkosť a frekvencia týchto teplotných zmien. Opakované vystavenie takýmto cyklickým zmenám je hlavným hnacím motorom degradácie formy [5].

Opakované teplotné cykly indukujú vo forme tepelné napätie. Toto napätie, v spojení s vysokým špecifickým tlakom počas prevádzky formy, vytvára podmienky podobné vysokému dynamickému namáhaniu. Tepelné napätie vzniká v dôsledku nerovnomerného rozloženia teploty počas tuhnutia a chladenia, čo vedie k rozdielnemu rozťahovaniu a zmršťovaniu rôznych častí formy. Ak sú teplotné gradienty príliš vysoké, výsledné tepelné napätie môže prekročiť medzu pevnosti materiálu formy a spôsobiť vznik trhlin [6, 7].

Dôležité je, že tepelné napätie nie je len okamžitým javom, ale kumuluje sa s každým cyklom, čo vedie k fenoménu tepelnej únavy. Koncept "akumulácie tepla" naznačuje, že forma má obmedzenú schopnosť efektívne odvádzať teplo. Ak sa teplo hromadí, zvyšuje to základnú teplotu formy a tým aj celkové tepelné napätie. Tento kumulatívny proces znamená, že tepelná história formy priamo ovplyvňuje jej životnosť. Okrem toho, počiatočný tepelný šok, ku ktorému dochádza počas prívodu roztaveného materiálu do nedostatočne predhriatej formy, môže výrazne skrátiť životnosť formy. Predhrievanie formy je preto kľúčové pre minimalizáciu tohto počiatočného šoku a zníženie teplotných gradientov, čím sa forma pripraví na lepšie zvládanie následných cyklických zaťažení [8, 9].

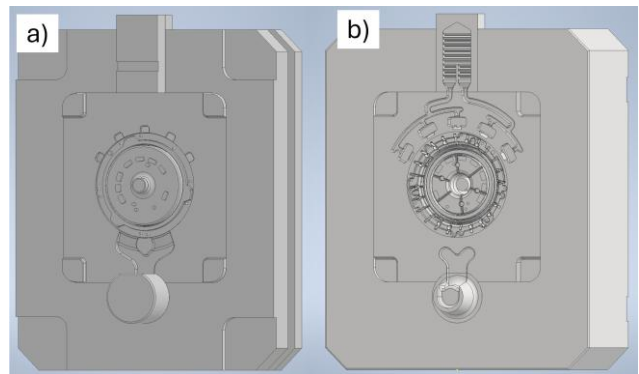
## 1 METODIKA EXPERIMENTU

Pre experimentálne účely bola použitá vysokotlaková forma, konkrétne pre odliatok s označením *Statorbuchse EC 112/75* a *EC 112/55*. Odliatky sú súčasťou motora EC (elektronicky komutovaný). Ide o synchronný motor s permanentnými magnetmi a vonkajším obežným kolesom, napájaný z meniča. Tento odliatok sa vyrába pomocou jednodutinovej formy, ktorú v reálnej praxi používa firma *Rosenberg-Slovakia*. Na základe skutočnej formy bol vytvorený jej 3D model. Hlavným cieľom tohto 3D modelu bolo jeho následné využitie v simulačnom softvéri *ProCast*. Celá zostava 3D modelu vysokotlakovej formy sa skladala z rámu a vložiek pre pohyblivú a pevnú časť, vložiek pre vlnovec a jadra (obr. 1).

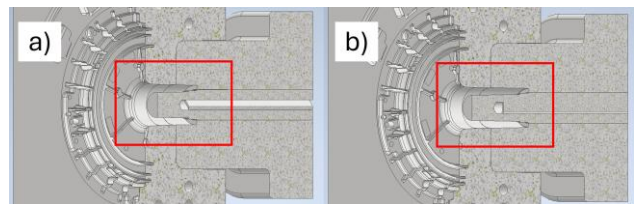
Odliatky *EC 75* a *EC 55* sa od seba rozlišujú rozdielnou výškou tubovej časti. Obrázok 2 zobrazuje uloženie jadra vo forme a rozdiel vo veľkosti tuby resp. použitého jadra (červený obdĺžnik).

Do pohyblivej aj pevnej časti formy boli vymodelovaná termoregulácia formy. Tento termoregulačný systém zahŕňa kanáliky umiestnené v oblasti dutiny formy (vložková časť), v jadrách, pri napažení tablety do vtokovej sústavy a vo vložkách

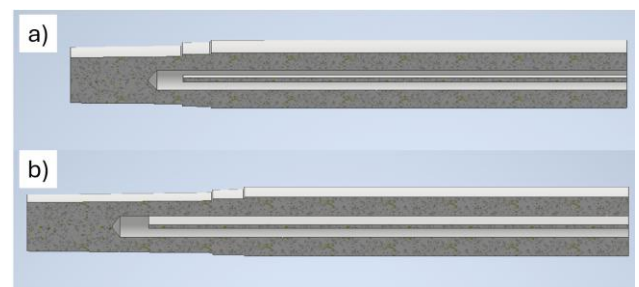
pre vlnovec v pohyblivej časti. Regulovanie teploty v jadre bolo zabezpečené pomocou špeciálnych sond s priečkou (obr. 3).



Obr. 1. Nasiet'ované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť



Obr. 2. Nasiet'ované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť



Obr. 3. Nasiet'ované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

V rámci experimentálnych prác boli použité dva druhy médií v termoregulačnom systéme jadra, a to voda a teplotonosný olej s označením *ITERM 6MB*. Použitá voda na reguláciu teploty formy bola chemicky upravená - demineralizovaná, aby nedochádzalo k vzniku korózie na plochách kanálikoch alebo zanášanie termoregulačných okruhov vápenatými usadeninami. Hlavným rozdielom medzi vodou a teplotonosným olejom je niekoľkonásobne vyšší súčiniteľ prestupu tepla vody pri porovnaní s olejom *ITERM 6MB*. Vyšší súčiniteľ prestupu tepla značí rýchlejšie ochladzovacie formy. Z daného dôvodu sa voda používa ako chladiace médium, pričom olej je používaný na cieleu temperáciu formy.

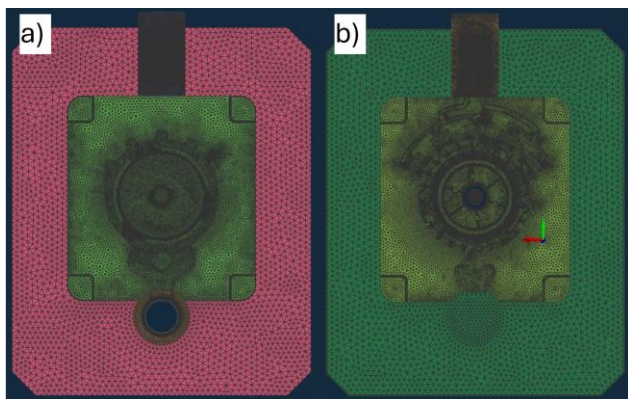
### 1.1 Príprava simulácie cyklovania tlakovej formy

Prvým krokom pri experimentálnom skúmaní teplotného zaťaženia formy bolo realizovanie numerických simulácií v softvéri *ProCAST*. Na

dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov boli parametre odlievania konzultované s firmou *Rosenberg*.

V rámci simulácie boli vykonané celkovo štyri simulácie, pričom dve z nich sa týkali odliatku *EC 75* a ďalšie dve odliatku *EC 55* (vplyv zmeny výšky tuby). Pri každej simulácii sa menilo prúdiace médium v termoregulačnom okruhu jadra.

Sieťovanie bolo vykonané v module *MESH*, pričom všeobecným pravidlom prípravy siete bolo zvýšenie jemnosti siete v dôležitých bodoch odliatku, kde sa nachádzajú jemné detaily alebo tenké steny. Naopak, vonkajšie steny formy boli sieťované hrubšie, aby sa ušetrili výpočtové kapacity procesoru (obr. 4).



Obr. 4. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

Tab. 1. Parametre odlievania a simulácie v *ProCAST*

Parametre	<i>EC 75</i>	<i>EC 55</i>
Liaci stroj	<i>CLH 400.02P</i>	
Materiál odliatku	<i>AlSi12Cu1(Fe)</i>	
Materiál formy	Oceľ <i>H13</i>	
Teplota kovu	705°C	
Počiatková teplota pevnej časti	190°C	
Počiatková teplota pohyb. časti	190°C	
Doba lisovania	5 s	
Doba tuhnutia odliatku	17 s	
Maximálna rýchlosť lisovacieho piestu	3,5 m·s <sup>-1</sup>	
Hmotnosť odliatku	1 kg	0,9 kg
Maximálny tlak v komore	95 MPa	
Metóda plnenia formy	Vysokotlakové odlievanie	
Stop kritérium pre simuláciu cyklovania	Koniec 10 cyklu	

Po dokončení sieťovania boli definované parametre, ako napríklad spôsob odlievania, materiály jednotlivých objemov, počiatkové plnenie komory, spôsob prechodu tepla medzi objektmi, teplota a spôsob termoregulácie, stop kritérium pre ukončenie

simulácie plnenia formy a ostatné parametre na základe reálnych podmienok.

V rámci definovania procesných podmienok softvér *ProCAST* umožňuje prepočet koeficientu prestupu tepla pre vodu a olej ako prúdiace médium (*HTC calculator*). Prepočet koeficientu prestupu tepla pre jednotlivé média umožnil presné zadefinovanie hodnôt pre vodu a olej *ITERM 6MB* čím sa zabezpečili podmienky čo najviac približujúcim sa reálnym podmienkam. Tabuľka 2 uvádza parametre cyklovania pre obe verzie cyklovania.

Tab. 2. Parametre cyklovania v sekundách [s]

Verzia cyklovania	<i>EC 75</i>	<i>EC 55</i>
Počet cyklov	10	10
Otvorenie formy	10	10
Vyhodenie odliatku	12	12
Štart postreku formy	15	15
Koniec postreku formy	32	32
Štart ofuku formy	35	35
Koniec ofuku formy	54	54
Zatvorenie formy	57	57
Doba cyklu	61	61

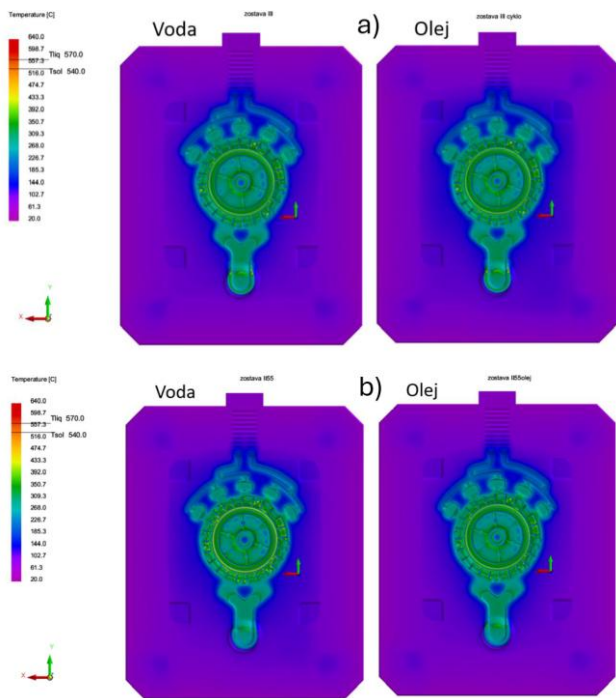
## 2 HODNOTENIE TEPELNÉHO ZAŤAŽENIA FORMY

V simulácii boli počiatkové podmienky nastavené na desať cyklov. Rozloženie teplôt na forme počas otvárania v desiatom cykle je zobrazené na obr. 5. Na ňom je vľavo znázornená forma pre odliatok *EC 75* (obr. 5a) s vodou chladeným jadrom a hneď vedľa forma s jadrom temperovaným teplotonosným olejom. Forma pre odliatok *EC 55* je zobrazená na obr. 5b.

Vo všetkých prípadoch sa väčšina objemu formy udržiavala v rozmedzí teplôt 20 až 110°C (znázornené fialovou farbou). V blízkosti odliatku dosahovala teplota 140 až 200°C (modrá farba). V oblasti spojenia tablety s vtokovou sústavou sa očakávané dosiahla teplota 390°C (svetlozelená farba). Podobne aj oblasť dutiny formy, ktorá je v priamom kontakte s taveninou, dosahuje teplotu okolo 350°C. Ako sa predpokladalo, rozdiel v teplotách bol zaznamenaný v oblasti jadra, kde pri chladení vodou boli teploty na čele jadra nižšie.

Pri jadre môžeme pozorovať, že najvyššiu teplotu 380°C majú jadrá používané pre odliatky *EC 75* (obr. 6a) v mieste priameho kontaktu s tekutým kovom, čo je približne v strede odliatku. Je to spôsobené väčším objemom tekutého kovu. Smerom od okrajov sa teplota znižuje na 270 až 230°C. Jadrá používané pri odliatkoch *EC 55* (obr. 6b) dosahovali v mieste styku s tekutým kovom teplotu 330°C.

Celkový priemer jadra bol ohriaty touto teplotou približne do 1/5 priemeru, pri *EC 75* to bolo do 1/3 priemeru. Vplyv chladenia vodou viditeľne znížil hĺbku prehriatia materiálu jadra.



Obr. 5. Rozloženie teplôt pri fáze otvorenia formy v rámci desiateho cyklu pre: a) *EC 75* b) *EC 55*

Pre komplexnú analýzu tepelného správania foriem pri vysokotlakovom odlievaní boli zaznamenané a vizualizované priebehy teplôt v závislosti od času pre vybrané body v jadrách foriem.

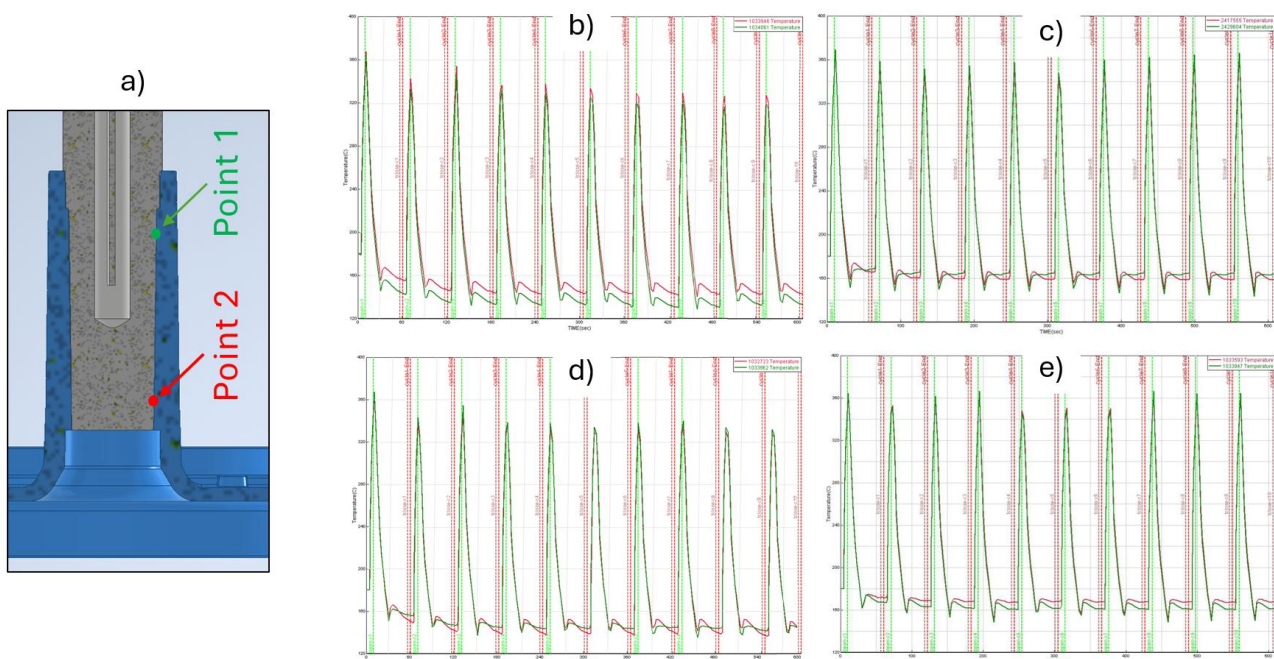
Na obr. 7a je schematicky znázornené umiestnenie teplotných sond, pričom "Point 1" reprezentuje stred jadra a "Point 2" povrch čela jadra, ktorý je v priamom kontakte s taveninou. Je dôležité poznamenať, že

odliatky *EC 75* a *EC 55* sa líšia vo výške tubovej časti, ako je zobrazené na. Grafy na obr. 7b,c,d,e ilustrujú cyklické zmeny teplôt počas desiatich simulovaných cyklov pre rôzne konfigurácie chladenia a typu odliatkov.

Všetky grafy vykazujú zreteľný cyklický charakter zmien teploty, typický pre proces vysokotlakového odlievania. Každý cyklus je charakterizovaný prudkým nárastom teploty počas vstrekovania roztaveného kovu a následným postupným poklesom teploty vplyvom chladenia/temperovania. Pozorovateľná je stabilizácia tepelnej bilancie po úvodných 1-2 cykloch, pričom od tretieho cyklu sú teplotné priebehy už vysoko konzistentné.

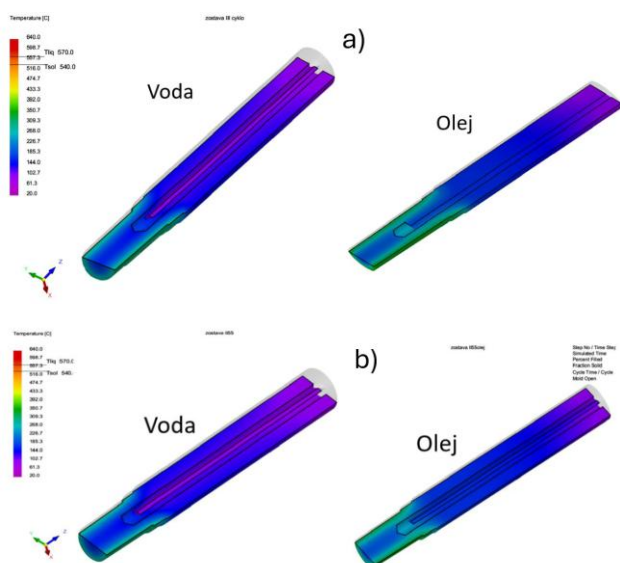
Krivky pre "Point 2" (povrch čela jadra) konzistentne dosahujú vyššie teplotné špičky a väčšie amplitúdy výkyvov v porovnaní s krivkami pre "Point 1" (stred jadra), čo potvrdzuje existenciu významného teplotného gradientu v rámci jadra v dôsledku jeho priameho kontaktu s horúcou taveninou.

Pri porovnaní foriem chladených vodou (grafy b pre *EC 75* a d pre *EC 55*) s formami temperovanými olejom (grafy c pre *EC 75* a e pre *EC 55*) sú zrejme kľúčové rozdiely. Jadrá temperované olejom dosahujú celkovo vyššie prevádzkové teploty, a to ako v špičkách, tak aj v minimálnych hodnotách. Navyše, teplotné priebehy pri olejovom temperovaní sú výrazne stabilnejšie a "hladšie", s menšími fluktuáciami v rámci cyklu, čo svedčí o efektívnejšej regulácii teploty a ustálenejšom tepelnom stave jadra vďaka cieľnému temperovaniu. Naopak, pri chladení vodou je badateľné rýchlejšie ochladzovanie po dosiahnutí teplotnej špičky, čo je spôsobené vyššou tepelnou kapacitou a prestupnosťou tepla vody. Charakteristickým rysom vodou chladených jadier je



Obr. 7. Graf teploty v závislosti od času: a) umiestnenie bodov, b) voda *EC 75*, c) olej *EC 75*, d) voda *EC 55*, e) olej *EC 55*

aj mierny postupný pokles minimálnej povrchovej teploty v prvých cykloch (približne do 5. cyklu), kým dôjde k úplnému ustáleniu tepelnej bilancie.

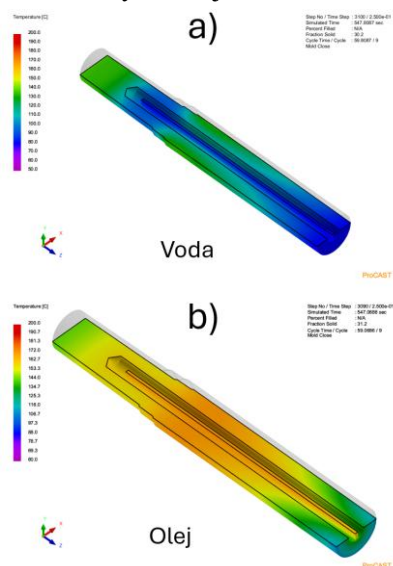


Obr. 6. Rozloženie teplôt v jadre pri fáze otvorenia formy v rámci desiateho cyklu pre: a) EC 75 b) EC 55

Vizuálna analýza grafov nepreukázala zásadné rozdiely v celkovom teplotnom správaní jadier pre odliatky EC 75 a EC 55 pri porovnateľných podmienkach chladenia/temperovania. Hoci môžu existovať minimálne rozdiely v absolútnych hodnotách teplotných špičiek alebo miním.

## 2.1 Fáza zatvorenia formy

Obrázok 8 prezentuje simulované tepelné rozloženie v jadre odliatku EC 55 v deviatom cykle, konkrétne počas fázy zatvorenia formy, pre dva odlišné typy termoregulačného systému jadra.

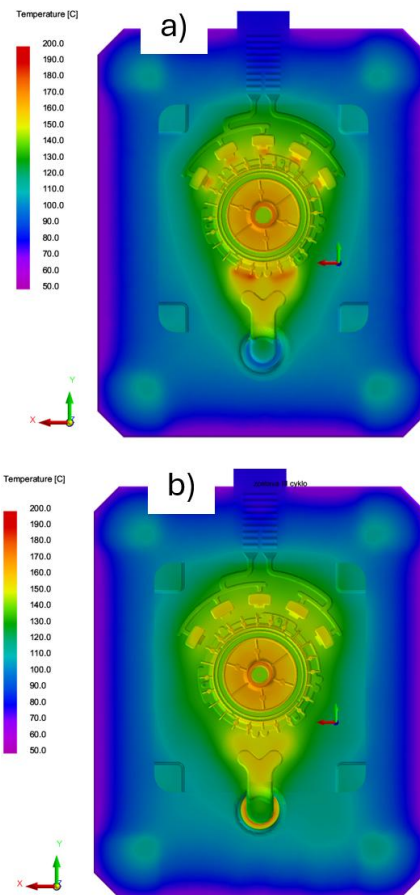


Obr. 8. Rozloženie teplôt v jadre pri fáze zatvorenia formy v rámci deviateho cyklu pre odliatku EC 55: a) voda, b) olej

Fáza zatvorenia formy, počas ktorej je jadro zobrazené, je mimoriadne dôležitá pre celý proces vysokotlakového odlievania z hľadiska tepelného

režimu. Teplota jadra v momente uzavretia formy a prípravy na ďalšie vstrekovanie taveniny predstavuje kritický počiatočný stav. Táto teplota priamo ovplyvňuje rýchlosť tuhnutia taveniny po jej kontakte s jadrom.

V prípade vodného chladenia (obr. 8a) je jadro výrazne chladnejšie, čo sa prejavuje prevládajúcimi modrými a zelenými odtieňmi, indikujúcimi teploty približne v rozmedzí 60 až 120°C. Je zreteľný výrazný teplotný gradient; najchladnejšie oblasti (modrá farba) sú lokalizované v blízkosti vnútorných chladiacich kanálov. Teplota postupne stúpa smerom k vonkajšiemu povrchu jadra, ktorý je v kontakte s dutinou formy, kde dosahuje zelené a žlté odtiene (okolo 100 až 140°C). Táto vysoká efektívnosť odvádzania tepla je spôsobená vysokou tepelnou vodivosťou vody ako chladiaceho média, čo vedie k celkovo nižším teplotám a rýchlejšiemu odvodu tepla z jadra.



Obr. 9. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

Jadro temperované olejom (obr. 8b) je naopak výrazne teplejšie, s prevládajúcimi žltými, oranžovými a červenými odtieňmi, čo naznačuje teploty v rozsahu približne 120 až 180°C. Aj keď existuje teplotný gradient, jadro je celkovo rovnomernejšie a vyššie temperované. Najhorúcejšie miesta (oranžová/červená farba) sú sústredené na vonkajšom povrchu jadra, ktorý je v priamom kontakte s taveninou, čo je v súlade s cieľom

temperovania. Vnútorne oblasti jadra sú o niečo chladnejšie, no stále podstatne teplejšie ako pri vodnom chladení. Olejové temperovanie má za cieľ udržiavať jadro na vyššej a stabilnejšej teplote, čo je dôležité pre zníženie tepelného šoku na jadro počas vstrekovania, zlepšenie toku taveniny a optimalizáciu tvorby mikroštruktúry, ako aj kvality povrchu odliatku.

Simulácie rozloženia teplôt v deviatom cykle počas kriticky dôležitej fázy zatvorenia pohyblivej časti formy pre odliatky EC 55 a EC 75 odhalili konzistentné trendy (obr. 9). Vonkajšie časti formy udržiavali teploty 20 až 110°C pre štruktúrnu integritu, zatiaľ čo oblasti dutiny a vtokovej sústavy dosahovali 140 až 390°C v priamom kontakte s taveninou. Analýza potvrdila, že geometria odliatkov (EC 55 a EC 75) nemala zásadný vplyv na tepelné správanie jadier a formy pri porovnateľných podmienkach.

## ZÁVER

Numerická štúdia detailne analyzovala vplyv rôznych termoregulačných médií na tepelné zaťaženie jadier aj samotnej vysokotlakovej formy pri výrobe odliatkov EC 75 a EC 55. Experimentálne výsledky jasne preukázali, že výber média má zásadný dopad na tepelné správanie jadra aj celkovej formy. Vodné chladenie efektívnejšie odvádza teplo, čo vedie k celkovo nižším teplotám a rýchlejšiemu ochladzovaniu jadra. To sa prejavilo výraznejšími teplotnými gradientmi v rámci jadra a nižšími teplotami na čele jadra v porovnaní s olejovým temperovaním. Naopak, použitie teplonosného oleja *ITERM 6MB* viedlo k vyšším a stabilnejším prevádzkovým teplotám jadra. Tento ustálenejší priebeh je výhodný pre zníženie tepelného šoku na jadro počas vstrekovania a môže potenciálne predĺžiť životnosť formy. Analýza tepelného rozloženia vo fáze zatvorenia formy potvrdila, že teplota jadra v tomto momente je kritická pre ďalšie plnenie a tuhnutie taveniny, ovplyvňujúc rýchlosť tuhnutia, mikroštruktúru a kvalitu povrchu odliatku. Vo fáze otvorenia formy bolo pozorované, že systém dosiahol ustálený stav tepelnej bilancie už po relatívne nízkom počte cyklov, čo naznačuje stabilitu procesu. Napriek geometrickým rozdielom (výška tubovej časti) medzi odliatkami EC 75 a EC 55, neboli zaznamenané zásadné rozdiely v celkovom teplotnom správaní jadier pri porovnateľných podmienkach. Tieto zistenia potvrdzujú, že cieľená termoregulácia jadra a formy je kľúčová pre optimalizáciu procesu vysokotlakového odlievania, znižovanie chybovosti a zlepšenie kvality finálnych odliatkov.

## PodĎakovanie

Článok vznikol v rámci projektu grantovej agentúry VEGA: VEGA 1/0160/22 a bol financovaný EÚ

*NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti pre Slovensko pod projektovým číslom 09I03-03-V05-00002. Autori ďakujú za túto podporu..*

## LITERATÚRA

- [1] DAS, S. - BHAMANIA, S. - PARATE, S. (2025): *Evaluating Die Life in High-Pressure Die Casting: Correlating Temperature Dynamics and Durability through Altair Inspire Cast and SIMSOLID*. In: *Journal of Materials and Engineering*: 3(4), pp. 349-364.
- [2] BONOLLO, F. - GRAMEGNA, N. - TIMELLI, G. (2015): *High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges*. In: *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67, pp. 901–908.
- [3] BERGMAN T, - LAVINE A, - INCROPERA F, et al. (2011): *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- [4] MAJERNÍK, J. - PODARIL. M. - MAJERNIKOVA, M. (2024): *Evaluation of High Pressure Die Casting Mold Temperature Relations Depending on the Location of the Tempering Channels*. In: *Archives of Foundry Engineering*, 24(1), pp. 115–120.
- [5] DOU, K. - LORDAN, E. - ZHANG, Y., et al. (2021): *A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in High pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling*. In: *Journal of Material Processing Technology*, 296, 117193.
- [6] BHASKAR, M. - GOBIRAMAN, A. - NALLUSAMY, T. - PERIYASAMY, S. (2022). *Die Life in Aluminium High-Pressure Die Casting Industries*. In: *Journal of The Institution of Engineers: Series D*. 103(1), pp.1-7.
- [7] MAJERNÍK, J. - PODARIL. M. - MAJERNIKOVA, M. - SRAMHAUSE, K. (2025): *Temperature Conditions Change in the High Pressure Die Casting mold Volume Depending on the Gating System Volume*. In: *Archives of Foundry Engineering*, 25(1), pp. 52-58.
- [8] CASAROTTO, F. - FRANKE, A. J. - FRANKE, R. (2012): *High-pressure die-cast (HPDC) aluminium alloys for automotive applications*. In: *Advanced Materials in Automotive Engineering*, pp. 109-149.
- [9] LIU, W. - ZHANG, W. - WANG, P. et al. (2024): *Effect of slow shot speed on externally solidified crystal, porosity and tensile property in a newly developed high-pressure die-cast Al-Si alloy*. In: *China Foundry*, 21, pp. 11-19.

# Ručné obrábanie kovov pilovaním

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

## Manual metalworking by filing

**Abstract:** The presented contribution focuses on the field of manual metal processing using filing technology. Knowledge about the production of files, the geometry of file teeth are presented. Some selected findings from the subject area are presented.

**Keywords:** file, technology, manual processing.

## ÚVOD

Pilníky sa používajú na obrábanie kovov ručným spôsobom. Tento spôsob spracovania kovov je známy od dávnych dôb. V múzeách sú uložené pilníky ktoré majú viac ako 2500 rokov a na mnohých, ešte starších predmetoch sa dá rozoznať, že boli spracované pilovaním. Zvláštne je aj to, že napríklad základné nástroje kde patrí kladivko, kliešte nožik ani samotný pilník sa mnoho nezmenil. Najstaršie *egyptské* pilníky sa v podobajú dnešným výrobkom. Doklady o tom, že pilník je jeden z najstarších nástrojov sa dajú nájsť v starobylej literatúre. Biblia dáva údaj o remeselníkoch pracujúcich pilníkom asi roku 1090 pred našim letopočtom prvej knihe *Samuelovej. I. Samuel, XIII:21: Pilník slúžil na brúsenie ostria motýk, trojzubých vidiel a sochorov.*

Staroveký básnik *Homér* popisuje z *gréckeho* bájoslovia boha *Héfaista* ako kladivom a pilníkom vyrábala drôty z ktorých zhotovil sieť na polapenie *Area* a *Afrodity*. *Rímskych* oceľových pilníkov sa zachovalo väčšie množstvo. V roku 1490 *Leonardo da Vinci* skonštruoval stroj na sekание pilníkov. Takýto prvý stroj bol vyrobený vo *Francúzsku* v roku 1750 *E. Chopitelom*. Príspevok som napísal z toho dôvodu, že som pracoval ako nástrojár a viem, aké je dôležité správne vedieť pracovať s pilníkmi rozličných druhov a veľkostí.

## 1 NÁSTROJE

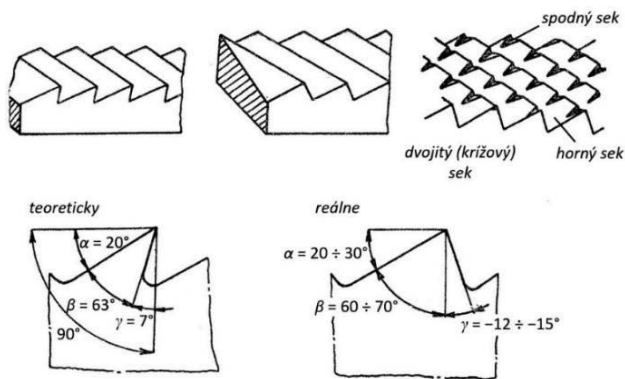
Úlohou technológie je vysvetliť a teoreticky zdôvodniť postup spracovania výrobku rôznymi spôsobmi a prostriedkami. Dôležité miesto v technológii má aj porovnanie rôznych spôsobov spracovania z technického a hospodárskeho hľadiska. V poslednej dobe sa upúšťa od dokončovania výrobkov najmä v kusovej výrobe pomocou ručných prác pretože táto práca je veľmi drahá. Napriek tomu

to sa isto vo výrobe nedá vyhnúť použitiu a aplikovaniu rozličných spôsobov ručného spracovania kovov medzi ktorými má svoje nezastupiteľné miesto pilovanie. Pilovanie je rezanie drobných triesok kvôli veľkým počtom zubov umiestnených na činnej časti pilníka. Pilníky sú nástroje ručné i strojové a používajú sa najmä v kusovej výrobe. Pilníky sa vyrábajú kovaním alebo valcovaním za tepla z nástrojovej ocele s obsahom uhlíka 0,9 až 1,5 % [1].

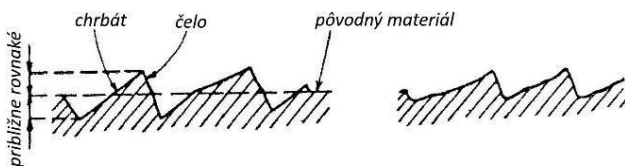
Zuby sa do kovového prúta vysekávajú za studena. Rezné uhly zubov bývajú rozličné; stredné hodnoty rezných uhlov sú  $\gamma_0 = 35^\circ$ ,  $\alpha_0 = -15^\circ$ . Pilníky na mäkké materiály majú obyčajne záseky usporiadané v jednom smere. Pre tvrdšie materiály býva sek spravidla krížový. Podľa hustoty zásekov sú rozoznávané rôzne typy pilníkov (hrubé, polohrubé - tzv. bastard (*B*), stredné (*BB*), jemné - *smooth* (*S*) a veľmi jemné (*SS*)). Hrubý drevársky pilník sa označuje ako rašpľa. Na základe tvaru prierezu je možné rozlišovať niekoľko typov pilníkov (obdĺžnikový, polkruhový, trojuholníkový, štvorcový, mečovitý (kosoštvorcový), jazýčkovitý, kruhový a nožovitý [3-5].

Hustota zubov pilníka, čiže sústava činných zubov určitej hustoty sa nazýva sek a udáva sa počtom zubov na 10 milimetrov dĺžky. Napríklad najhrubší sek 0 pri pilníkoch s dĺžkou 300 až 450 mm sa robí s hustotou 6 až 5 zubov na dĺžku 10 mm. Sek 1 pri pilníkoch s dĺžkou 40 až 450 mm má hustotu od 15 zubov (pri najkratších) do sedem zubov (pri najdlhších), sek 2 pri pilníkoch tých istých dĺžok, má hustotu od 20 do 9 zubov, sek 3 od 27 do 12 zubov a sek 4 od 36 do 15 zubov. So sekom 5 až 8 sa vyrábajú pilníky len s dĺžkou do 350 milimetrov a to s hustotou zubov 48 až 27 pri seku 5 do 112 až 63 (pri seku 8). Druh pilníka sa volí podľa veľkosti a tvaru obrábanej plochy podľa druhu materiálu obrobku, hrúbky odoberanej vrstvy a

podľa predpísanej kvality povrchu. Pilník musí byť taký dlhý aby sa dalo pracovať s dostatočne veľkým zdvihom. Pod dĺžkou zdvihu sa rozumie rozdiel medzi dĺžkou činnej časti pilníka a rozmerom obrábanej plochy v smere pilovania [2].



Obr. 1. Geometria zubov pilníka;  $\alpha$  = uhol chrbta,  $\beta$  = uhol ostria,  $\gamma$  = uhol čela; platí:  $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$



Obr. 2. Zväčšený prierez zubov pilníka

## 2 EXPERIMENTÁLNE ZISTENIA

Mnohé pokusy dokázali, že zručný zámočník tlačí na prostredne veľký pilník pri pilovaní ocele strednej tvrdosť silou 15 a 17 kg. Na každý zub, ktorý je v styku s pilovanou plochou pripadá časť tohto tlaku. Na konci zdvihu je to tlak na pilník menší preto tu pilník neodoberá triesku. Tento poznatok zvlášť platí pri sekaných pilníkoch. Frézované pilníky už lepšie zaberajú po celom zdvihu, čiže po celej dĺžke pracovného pohybu. Pretože na začiatku zdvihu sa pilník rozbieha zrýchľuje a na konci zastavuje, má uprostred zdvihu väčšiu rýchlosť asi  $36\text{mmmin}^{-1}$ . V porovnaní s rýchlosťou pri hobľovaní sú tieto rýchlosti pilníkov relatívne vysoké, ocel' by takouto rýchlosťou mohol hobľovať iba rýchlorezný nôž. Pri príliš veľkej reznej rýchlosti klesá životnosť pilníkov päť, ba aj viackrát. Pri normálnej práci vydržal napríklad pilník 30000 zdvihov pri zrýchlenej práci len 11000 zdvihov. Zahrievanie pilníkov pri práci sa riadi niekoľkými pravidlami, ktoré boli sformulované pri pokusoch [4-6].

Ostrý pilník je teplejší ako tupý. Pilník s hrubým sekou sa zahreje viac ako pilník s jemným sekou. Záleží teda teplota pilníka nielen od opotrebovania a hustote seku ale aj na rovnakej výške zubov a pilotovaného materiálu. Ostré pilníky sa ohrievajú pri normálnej práci pri hrubom seku na  $80^\circ$  až  $90^\circ\text{C}$ , pri jemnom seku na  $50^\circ$  až  $60^\circ\text{C}$ . Po otupení klesá teplota o  $20^\circ$  až  $30^\circ$ , pretože príliš tupé zuby už neodoberajú materiál. Stredný pilník dlhý 400 mm odoberie asi 2,2 kg mäkkej ocele kým sa otupí. Pri nepretržitom

pilovaní počas ôsmich hodín pracovnej doby vydržal dvanásť dní [1].

### 2.1 Spôsobu otupenia pilníkov

1. Najskôr sa odlamujú jemné časti ostria. Preto je výhodné ak sa používa nový pilník najskôr na mäkké kovy a zliatiny ako je napríklad mosadz. Aby sa odlomené ostria nezatlačili do pilovanej plochy. Potierajú sa nové hľadacie pilníky pred použitím kriedou a olejom na ocel' a húževnaté ľahké zliatiny.
2. Po čase sa ostria zubov otupia ako ostria iných rezných nástrojov.
3. Zuby sa vylamujú pri pilovaní tvrdého materiálu a prerušovaných plochách a hranách. Niekedy sa tomu nedá zabrániť, preto je dobré na zrážanie hrán nepoužívať nové pilníky.

### 2.2 Trvanlivosť pilníkov

V trvanlivosti pilníkov sú veľké rozdiely. Záleží na materiáli, sekaní, kalení kalení a na spôsobe práce. Aj pri rovnakej práci sú výkyvy trvanlivosti až 1 ku 10. To značí že jeden pilník vydrží trebárs na mäkkej oceli 30000 pracovných zdvihov, druhý tristotisíc zdvihov. Z toho dôvodu veľmi záleží na kvalite pilníkov. Experimentálnymi skúškami bolo zistené, že pri pilovaní ocele je trvanlivosť sekaných a frézovaných pilníkov na rovnakú prácu približne rovnaká. Frézované pilníky však dávajú lepší povrch.

### 2.3 Skúšanie pilníkov

Nový pilník má mať svetlú farbu. Temné zafarbenie vzniká oxidáciou zubov a značí to už horšie ostria. Ďalej má mať pilník jasný čistý zvuk keď sa podrží zvislo medzi oboma prstami a udrie sa naň kúskom ocele. Nečistý zvuk značí trhliny ktoré vznikli pri kalení alebo i pri kovaní. Dobře tepelne spracovaných pilník má mať na lome jemné zamotové zrno. Ostrnosť pilníku sa skúša bronzovým hranolom  $38 \times 20 \times 65$  mm s hmotnosťou 0,5 kg a tvrdosťou 75 až 83, ktorý nesmie sklznúť oproti seku na sekanej ploche pilníka sklonenou pod uhlom  $20^\circ$ . Ak znesie hranolček aj väčšie naklonenie pilníka (nesklzne nadol) má pilník väčšiu ostrnosť [7, 8].

### 2.4 Pilovanie na sústruhu

Pilník sa drží šikmo na os obrobku a súčasne sa posúva v smere dĺžky súčiastky. Týmto sa lepšie odstraňujú triesky a získa sa lepší povrch. Dobře sa pracuje s normálnym jednosekovým pilníkom, ešte lepšie výsledky dáva zvláštny pilník pre prácu na sústruhu so šikmejším sekou. Čisto reže, dobre sa čistí, netrhá povrch, zabraňuje chveniu a takto aj rýchlejšie pracuje. Na úzkych plochách nemá zuby, aby sa nepoškodili čelné plochy obrobkov.

## ZÁVER

V uvedenom texte bola pozornosť zameraná na problematiku pilníkov a pilovania. V dnešnej dobe sa znižuje potreba práce s pilníkom. Nie je ale dobré celkom úplne sa prestať venovať tejto oblasti ručného spracovania. Článok som pripravil ako moje osobné skúsenosti s touto technológiou, keď som ju aplikoval pri mojej nástrojárskej práci.

## LITERATÚRA

- [1] DOBROVOLNÝ, B. (1971): *Pilování*. Práce Brno, 83 strán.
- [2] LIPTÁK, O. a kol. (1979): *Technológia výroby obrábanie*. ALFA Bratislava, s. 154-156.

- [3] KOS, F., KRŇÁK, R., JONÁŠ, M. (1985) : *Kvalifikační příručka nástrojaře*. Práce Praha, s. 86-88.
- [4] OUTRATA, J. (1982): *Technológia ručného spracovania kovov*, ALFA Bratislava, s. 31-39.
- [5] DOBROVOLNÝ, B. (1965) : *Nástrojář pro výrobu a opravu lisovacích nástrojů a přípravků*. SNTL Praha, s. 37-65.
- [6] VESELÝ, A. (1978): *Ručné spracovanie kovov*. ALFA Bratislava, s. 61-80.
- [7] DOBROVOLNÝ, B. (1975): *Nástrojářství*, SNTL Praha, 83 strán.
- [8] BENEŠ, A. a kol. (1967): *Mechanická technologie kovů*. SNTL Praha, s. 283-292.

# Spracovanie technických materiálov z matematického hľadiska

**Zuzana Malacká, RNDr., PhD.\***

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.

E-mail: [zuzana.malacka@fstroj.uniza.sk](mailto:zuzana.malacka@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 4961, Fax.: + 421 41 525 2541

## Processing technical materials from a mathematical perspective

**Abstract:** The processing of technical materials is a key process in many industries, such as mechanical engineering, automotive, aerospace and energy. Mathematical modelling of these processes allows for a better understanding and optimization of processing techniques, which leads to increased efficiency and product quality. This article focuses on the application of mathematical methods in the processing of technical materials, including the analysis of mechanical properties, thermal behaviour and material flow dynamics. Examples from the fields of forming, welding and casting are presented, demonstrating the importance of mathematical approaches in improving the quality and efficiency of production.

**Keywords:** mathematical modelling of materials, physical model, optimization.

## ÚVOD

Matematické modelovanie sa stalo neoddeliteľnou súčasťou inžinierskej praxe, najmä v oblasti spracovania technických materiálov. Umožňuje nielen pochopenie základných fyzikálnych procesov, ale aj predikciu správania materiálov pri rôznych technologických operáciách. Cieľom tohto článku je ukázať, aká je nutnosť matematických vedomostí - konkrétne derivácií a integrálov aj v tejto oblasti a poskytnúť prehľad o aplikácii matematických metód pri spracovaní materiálov, s dôrazom na ich praktické využitie a výhody. Spracovanie technických materiálov zahŕňa rôzne procesy ako je tavenie, lisovanie, kovanie, zvarovanie, odlievanie a obrábanie. Každý z týchto procesov má svoje špecifické požiadavky na materiálové vlastnosti, tepelné správanie a mechanické zaťaženie. Matematika poskytuje nástroje na modelovanie týchto procesov, analýzu dát, čo je nevyhnutné pre optimalizáciu výrobných techník, predpovedanie správania materiálov a zlepšenie kvality konečných výrobkov.

## 1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLOV

Pre pochopenie správania materiálov počas ich spracovania sú kľúčové mechanické vlastnosti materiálov. Medzi tieto vlastnosti patria pevnosť, tvrdosť, pružnosť a elasticita. Tieto vlastnosti môžu byť modelované pomocou rôznych matematických prístupov.

Pri skúšaní vlastností kovových materiálov dochádza počas namáhania skúšobného telesa spravidla najskôr

k elastickej deformácii, potom k plastickej deformácii, po ktorej nasleduje lom.

*Elastické správanie sa popisuje Hookovým zákonom. Hookov zákon je vhodný v prípadoch:*

- *malých elastických deformácií:* keď sú deformácie dostatočne malé, aby sa materiál správal elasticky a vrátil sa do pôvodného stavu po odstránení zaťaženia,
- *lineárnej závislosti medzi napätím a deformáciou:* pre materiály, ktoré vykazujú lineárnu závislosť medzi napätím a relatívnym predĺžením (deformáciou),
- *jednoduchých geometrických tvarov:* pri analýze jednoduchých tvarov, ako sú pruhy alebo tyče, kde je možné predpokladať rovnomerné rozloženie napätia a deformácie:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

kde  $\sigma$  je napätie,

$E$  je modul pružnosti,

$\varepsilon$  je deformácia.

Tento vzťah je základom pre analýzu mechanického správania materiálov pri ťahu alebo tlaku, platí len pre pružné deformácie a je aplikovateľný do tzv. *meze úmernosti*, kde materiál ešte neprešiel do plastickej oblasti.

### 1.1 Plasticke správanie

Pri analýze deformácií materiálov v technických aplikáciách sa často používajú tenzory deformácie, ktoré umožňujú kvantifikovať zmeny v tvare a

veľkosti materiálu. Tieto tenzory sa transformujú medzi rôznymi referenčnými rámcami pomocou špecifických pravidiel.

*Tenzor deformácie* je vhodný v prípadoch:

- *veľkých deformácií*, ak sú deformácie dostatočne veľké, že lineárne aproximácie (ako *Hookov zákon*) už nie sú presné,
- *nelineárneho správania materiálu*, pri materiáloch, ktoré vykazujú nelineárnu závislosť medzi napätím a deformáciou,
- *zložitejších geometrických tvarov*, pri analýze zložitejších tvarov a štruktúr, kde je potrebné presne modelovať rozloženie napätia a deformácie v rôznych smeroch.

Deformačný gradient  $F$  je základný tenzor, ktorý popisuje, ako sa mení pozícia bodu v materiáli počas deformácie. Je definovaný ako gradient mapovania medzi počiatočnou (referenčnou) konfiguráciou  $X$  a aktuálnou (deformovanou) konfiguráciou  $x$ :

$$F = \frac{\partial X}{\partial x}, \quad (2)$$

Tento tenzor je druhého rádu a obsahuje informácie o rozťahovaní a rotácii materiálu. Jeho determinant  $\det(F)$  udáva zmenu objemu elementu objemu počas deformácie. Deformačný gradient môže byť rozložený pomocou polárnej dekompozície na rotáciu  $R$  a pravý tenzor rozťahovania  $U$ :

$$F = R \cdot U, \quad (3)$$

kde  $R$  je ortogonálny tenzor reprezentujúci rotáciu,  $U$  je pozitívne definitný tenzor reprezentujúci čisté rozťahovanie.

## 1.2 Tenzor deformácie (Strain Tensor)

Tenzory deformácie sa používajú v mechanike kontinua na matematické opísanie deformácie telesa v priestore. Tenzor deformácie je druhého rádu tenzor, ktorý popisuje zmeny v tvare materiálu bez zohľadnenia rotácie. Pre malé deformácie sa používa infinitesimálny tenzor deformácie  $\varepsilon$ , ktorý je symetrický a definovaný ako:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot (F^T \cdot F - I), \quad (4)$$

kde  $I$  je identitný tenzor.

Tento tenzor obsahuje informácie o normálnych a šmykových deformáciách materiálu. Pre väčšie deformácie sa používa *Green-Lagrangeov* tenzor deformácie  $E$ , ktorý je definovaný ako:

$$E = \frac{1}{2} \cdot (F^T \cdot F - I), \quad (5)$$

Tento tenzor je tiež symetrický a poskytuje presnejší popis deformácií pri väčších zmenách tvaru.

## 1.3 Transformácia tenzorov deformácie

Pri zmene referenčného rámcu sa tenzory deformácie transformujú podľa pravidla:

$$\varepsilon' = R^T \cdot \varepsilon \cdot R, \quad (6)$$

kde  $R$  je rotačný tenzor,

$\varepsilon$  je tenzor deformácie v pôvodnom rámci,

$\varepsilon'$  je tenzor deformácie v novom rámci.

Toto pravidlo zabezpečuje, že fyzikálne vlastnosti materiálu zostávajú nezmenené pri zmene referenčného rámcu.

## 2 PRÍKLAD POUŽITIA HOOKOVHO ZÁKONA PRI CNC OBRÁBANÍ OCEĽOVÝCH DIELOV

*CNC* obrábanie (frézovanie) na výrobu presných mechanických súčiastok. Ak použijeme ako materiál oceľ s vysokou pevnosťou (napr.  $42CrMo4$ ) a chceme dosiahnuť požadovanú presnosť a kvalitu povrchu pri minimalizácii deformácií.

### 2.1 Aplikácia Hookovho zákona

Pomocou *Hookovho zákona* (pretože sa predpokladá lineárna závislosť medzi napätím a deformáciou) môžeme odhadnúť, ako sa materiál bude správať pri pôsobení reznej sily, čo umožňuje nastaviť optimálne parametre obrábania (rýchlosť posuvu, rezná rýchlosť).

## 3 PRÍKLAD POUŽITIA TENZORA DEFORMÁCIE NA TVÁRNE NIE HLINÍKOVÝCH PLECHOV

Hliníkový plech (napr. *EN AW-1050*), chceme použiť na výrobu automobilových karosárskych dielov, čo dosiahneme hlbokým ťahaním. Chceme dosiahnuť požadovaný tvar bez vzniku trhlin a s rovnomerným rozložením hrúbky plechu.

### 3.1 Aplikácia tenzora deformácie

Pri veľkých deformáciách je potrebné zohľadniť nelineárne správanie materiálu. Tenzor deformácie umožňuje analyzovať zmeny v tvare a objeme materiálu v rôznych bodoch plechu počas procesu, čo pomáha optimalizovať parametre tvárnenia a predchádzať defektom.

## 4 TEPELNÉ SPRÁVANIE MATERIÁLOV

Tepelné správanie materiálov počas spracovania je ovplyvnené procesnými parametrami, ako je rýchlosť ohrevu, chladenia a tepelné vlastnosti materiálu. Napríklad pri tepelnom spracovaní kovov je dôležité riadiť teplotu a čas ohrevu, aby sa dosiahli požadované mechanické vlastnosti materiálu. Matematické modely umožňujú simulovať teplotné rozdelenie v materiáli počas ohrevu a chladenia.

Jedným z používaných vzorcov je Fourierova rovnice tepelnej vodivosti, ktorá popisuje distribúciu teploty v materiáli:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (7)$$

kde  $T$  je teplota,

$t$  je čas,

$\alpha$  je tepelná difúznosť,

$\nabla^2 \cdot T$  je Laplaceov operátor.

Riešením tejto rovnice pomocou numerických metód, ako je :

1. *Metóda konečných prvkov (FEM)*, môžeme získať teplotné pole v materiáli počas spracovania.
2. *Metóda Monte Carlo* - aplikuje sa na simuláciu náhodných procesov, ako je šírenie tepla v materiáloch s nehomogénnou štruktúrou.

#### 4.1. Príklad 1

Pri ohreve ocelového plechu s počiatočnou teplotou 20°C na 900°C počas 30 minút môžeme pomocou *FEM* simulácie získať teplotné rozdelenie v materiáli a určiť optimálny čas a teplotu ohrevu pre dosiahnutie požadovaných mechanických vlastností.

#### 4.2 Dynamika materiálových tokov

Dynamika materiálových tokov je kľúčovým prvkom v optimalizácii výrobných a logistických procesov. Je dôležitá pri procesoch, ako je odlievanie, kovárske formovanie a tvárnenie ale taktiež je dôležitá aj v oblastiach ako sú logistika a zásobovanie. Matematické modelovanie týchto tokov umožňuje efektívne riadenie zásob, minimalizáciu nákladov a zlepšenie celkovej výkonnosti systému. Na jej analýzu sa využívajú rôzne matematické modely a rovnice, ktoré popisujú správanie materiálov v systémoch. V tomto kontexte sa často využívajú metódy ako *analýza materiálových tokov (MFA)*, *metóda konečných prvkov (FEM)* a *metóda diskretných prvkov (DEM)*.

Patria tu:

*Navier-Stokesove* rovnice sú základnými rovnicami popisujúcimi pohyb tekutín. Sú odvodené z princípov zachovania hmoty a hybnosti a sú základom pre analýzu dynamiky tekutín v rôznych oblastiach, ako je inžinierstvo, fyzika a meteorológia.

Na modelovanie prúdenia materiálov, ako sú kvapaliny a plyny, sa používajú základné rovnice mechaniky kontinua (základné rovnice *Navier-Stokesovej* sústavy):

(a) *rovnice kontinuity (zachovanie hmoty)*:

$$\nabla \cdot u = 0. \quad (8)$$

Pre nekompresibilnú tekutinu (konštantná hustota  $\rho$ ) sú *Navier-Stokesove* rovnice vyjadrené nasledovne:

b) *rovnice hybnosti (zachovanie hybnosti)*:

*Navier-Stokesove* rovnice pre popis pohybu viskózných tekutín:

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 v + f, \quad (9)$$

kde  $\rho$  hustota tekutiny,

$v$  je rýchlostný vektor,

$\nabla p$  je gradient tlaku,

$\mu$  je dynamická viskozita,

$f$  sú vonkajšie sily (napr. gravitačná sila).

Odvodenie týchto rovníc vychádza z aplikácie základných princípov mechaniky na malý objem tekutiny:

- *zachovanie hmoty*: zabezpečuje, že hmotnosť tekutiny sa nestráca ani nevytvára v kontrolovanom objeme.
- *zachovanie hybnosti*: vyjadruje rovnováhu medzi silami pôsobiacimi na tekutinu a zmenou jej hybnosti.
- *zachovanie energie*: zohľadňuje prenos tepla a prácu vykonanú na tekutine.

Tieto princípy vedú k formulácii rovníc, ktoré popisujú dynamiku tekutiny s ohľadom na jej rýchlosť, tlak, viskozitu a vonkajšie sily a používajú sa na modelovanie prúdenia tekutín v rôznych aplikáciách, ako je prenos tepla (navrhovanie efektívnych dopravných systémov, ako sú potrubia a ventilačné systémy), pri návrhu dizajnu lietadiel a analýzu aerodynamiky. V praxi sa matematické modely materiálových tokov využívajú v rôznych oblastiach, a to:

- vo výrobe: optimalizácia výrobných liniek a procesov na základe analýzy materiálových tokov,
- v logistike: efektívne riadenie skladovania a distribúcie materiálov.

## 5 APLIKÁCIE MATEMATICKÝCH METÓD V TECHNOLOGICKÝCH PROCESOCH

Matematické rovnice sú neoddeliteľnou súčasťou analýzy a optimalizácie procesov tvárnenia, zvráňania a odlievania technických materiálov. Umožňujú inžinierom a technológom modelovať správanie materiálov pri rôznych podmienkach, čo vedie k efektívnejšiemu a kvalitnejšiemu spracovaniu.

### 5.1 Tvárnenie materiálov

Pri tvárnení materiálov je dôležité pochopiť správanie materiálu pri deformácii. Matematické modely umožňujú simulovať procesy ako je ťahanie alebo

lisovanie, čo vedie k optimalizácii parametrov a zlepšeniu kvality výrobkov.

### 5.1.1 Rovnica pre výpočet sily potrebnej na ohýbanie

Pri ohýbaní plechov sa používa empirická rovnica na výpočet potrebnej ohybovej sily:

$$P = \frac{k \cdot Y \cdot L \cdot t^2}{D}, \quad (10)$$

kde  $P$  je ohybová sila [N],

$k$  je empirický koeficient závislý od typu nástroja,

$Y$  je medza klzu materiálu [MPa],

$L$  je dĺžka ohybu [mm],

$t$  je hrúbka plechu [mm],

$D$  je polomer ohybu [mm].

### 5.1.2 Príklad 2

Pre materiál s medzou klzu 500 MPa, dĺžkou ohybu 400 mm, hrúbkou plechu 2,5 mm a polomerom ohybu 25 mm, s koeficientom  $k = 1,3$ , sa ohybová sila vypočíta z rovnice (10) ako:

$$P = \frac{1,3 \cdot 500 \cdot 400 \cdot (2,5)^2}{25} = 65 \text{ kN}.$$

## 5.3 Zváranie

Numerické modelovanie zváracích procesov, ako je zváranie trením, umožňuje analyzovať tepelné a mechanické účinky počas zvárania. Tieto modely pomáhajú predchádzať defektom a zlepšovať mechanické vlastnosti zváraných spojov.

### 5.3.1 Výpočet energie potrebnej na zváranie

Pri zváraní je dôležité vypočítať množstvo energie potrebnej na roztavenie materiálu. Používa sa rovnica:

$$E = \rho \cdot V \cdot \Delta T, \quad (11)$$

kde  $E$  je potrebná energia [J],

$\rho$  je hustota materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$V$  je objem roztaveného materiálu [ $\text{m}^3$ ],

$\Delta T$  je rozdiel medzi teplotou tavenia a teplotou zvárania [K].

### 5.3.2 Príklad 3

Pre oceľovú dosku s hustotou  $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , objemom  $V = 0,01 \text{ m}^3$  a teplotným rozdielom  $\Delta T = 1500 \text{ K}$ , sa energia vypočíta použitím rovnice (11):

$$E = 7850 \cdot 0,01 \cdot 1500 = 117750 \text{ J}. \quad (11)$$

## 5.3 Odlievanie

Pri odlievaní kovov je dôležité modelovať tok tekutého kovu a jeho tuhnutie. Matematické modely,

vrátane magnetohydrodynamických simulácií, umožňujú optimalizovať procesy ako je odlievanie do elektromagnetických foriem, čo vedie k zlepšeniu kvality odliatkov. Pri odlievaní zliatin sa používa *Scheil-Gulliverova* rovnica:

$$C_L = C_0 \cdot f_L^{k-1}, \quad (12)$$

kde  $C_L$  je koncentrácia v kvapalnej fáze,

$C_0$  je počiatočná koncentrácia,

$f_L$  je frakcia kvapalnej fázy,

$k$  je distribučný koeficient.

Rovnica (12) umožňuje predpovedať zloženie kvapalnej a tuhej fázy počas tuhnutia zliatiny, čo je kľúčové pre kontrolu kvality odliatkov a predchádzanie defektom ako je segregácia.

## 5.4 Rezanie kovov

Pri rezaní kovov je potrebné modelovať interakciu medzi rezným nástrojom a materiálom. Pomocou *FEM* môžeme analyzovať rozdelenie napätí a teplôt v reznej zóne. Rovnice, ktoré popisujú tento proces, zahŕňajú:

- *Navier-Stokesove rovnice* pre prúdenie tekutín,
- *Fourierov zákon* pre prenos tepla,
- *Newtonov zákon* pre popis pohybu rezného nástroja.

Matematika, jej základné znalosti ako napr. aj derivácie a integrály sú dôležitými nástrojmi a zohrávajú v oblasti spracovania technických materiálov kľúčovú úlohu pri analýze, optimalizácii a predikcii správania materiálov počas výrobných procesov. Tieto nástroje umožňujú inžinierom a technológom modelovať a riadiť zložité procesy, čo vedie k efektívnejšiemu využívaniu zdrojov, zlepšeniu kvality výrobkov a zníženiu nákladov.

## 5.5 Aplikácie derivácií a integrálov v spracovaní materiálov

### 5.5.1 Analýza teplotných polí a prenosu tepla

Pri procesoch ako tavenie, kalenie alebo zváranie je dôležité pochopiť, ako sa teplota mení v čase a priestore. Pomocou parciálnych derivácií môžeme modelovať tepelné vedenie a prenos tepla v materiáloch, čo umožňuje optimalizovať parametre procesov a zabrániť nežiaducim zmenám štruktúry materiálu.

### 5.5.2 Modelovanie mechanických vlastností materiálov

Derivácie sa používajú na analýzu napätí a deformácií v materiáloch. Napríklad, pomocou *Hookovho zákona* sa dá vyjadriť vzťah medzi napätím a deformáciou v elastických materiáloch, čo je základom pre návrh a analýzu konštrukčných prvkov.

### 5.5.3 Optimalizácia výrobných procesov

Integrály sa používajú na výpočet veličín ako sú celková spotreba energie alebo hmotnosti počas výrobného procesu. Tieto informácie sú nevyhnutné pre optimalizáciu procesov, zníženie nákladov a minimalizáciu environmentálneho dopadu výroby.

### 5.5.4 Simulácia a analýza dynamických systémov

Pri analýze dynamických systémov, ako je prúdenie tekutín v potrubíach alebo správanie sa materiálov pri rôznych zaťaženiach, sa využívajú diferenciálne rovnice. Tieto rovnice umožňujú predpovedať správanie systému v čase a optimalizovať jeho výkon.

## ZÁVER

Matematické rovnice poskytujú neoceniteľné nástroje na analýzu a optimalizáciu procesov spracovania materiálov. Ich aplikácia vedie k zlepšeniu kvality výrobkov, zvýšeniu efektivity výroby a zníženiu nákladov. Preto je ich znalosť a správne využitie nevyhnutné i pre inžinierov a technológov v oblasti spracovania materiálov.

## Pod'akovanie

*Tento článok vznikol za podpory projektu KEGA 025\ ŽU-4/2024.*

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2012): *Malá príručka tvárnenia kovov*. 3. vydanie, ŽU Žilina, 146 s, ISBN 978 - 80-8070-554-0544-5.
- [2] JOHNSON, N.S. - VULIMIRI, P.S. - TO, A.C. - ZHANG, X. - BRICE, C.A. - KAPPES, B.B. - STEBNER, A.P. (2020): *Invited review: Machine learning for materials developments in metals additive manufacturing*, *Additive Manufacturing*, Volume 36, 2020, 101641, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101641>.
- [3] RYAN, M. E. - DUTTA, A. (1982): *Mathematical modeling of the blow-molding process*. In: *Polymer Engineering & Science*, 22(17), 1075-1083.
- [4] STANGLE, G. C. (1998). *Modelling of Materials Processing*. Springer.

---

# Overcasting ako inovatívna metóda spájania kovových materiálov

---

**Martin Medňanský, Ing.\***

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

**Marek Brúna, doc. Ing., PhD.**

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

## Overcasting as an innovative method of metallic material joining

**Abstract:** This article focuses on the research of innovative metal casting technology of overcasting (or compound casting) as a progressive method of joining metal materials in different phase states (solid-liquid). *Overcasting* allows the creation of bimetallic components with a diffusion-bonded interface that combine the advantageous properties of the matrix and core. It can offer high efficiency, greater design flexibility and weight savings, if suitable materials are joined. The article reviews different approaches to joining similar and dissimilar materials.

**Keywords:** compound casting, overcasting, material joining, hybrid castings.

---

## ÚVOD

Hliník má vysokú pevnosť, tvárnosť a priepustnosť, a preto sú jeho zliatiny považované za vhodnú voľbu pre aplikácie, kde je potrebná nízka hmotnosť. Je vo vysokej miere používaný v leteckom a automobilovom priemysle. S nástupom inovácií a nových technológií v priemysle sa otvárajú možnosti využitia *hliníkových* zliatin novými spôsobmi, a to aj tam, kde by konvenčnými metódami aplikovateľné neboli, vzhľadom na stále sa zvyšujúce požiadavky priemyslu. Medzi takéto spôsoby patrí aj inovatívna metóda spájania kovov [1].

V súčasnosti sa kovy (chemicky zhodné i odlišné) spájajú metódami, ktoré možno klasifikovať do troch hlavných skupín:

1. *Spájanie pevných látok s pevnými:* spájkovanie, valcovanie, zváranie trením, zváranie laserom, explozívne zváranie, povrchovo aktivované spájanie a hydrostatická extrúzia.
2. *Spájanie pevných látok s kvapalnými:* ponáranie za tepla (hot dipping) a zalievanie (overcasting, compound casting).
3. *Spájanie kvapalných látok s kvapalnými:* kontinuálne odlievanie a odlievanie s priamym chladením (*direct chill casting*) [1].

Spájanie pevných telies je zdĺhavý proces a vyžaduje vysoké investície do návrhu tvaru a substrátu.

Spájanie kvapaliny s kvapalinou tiež nie je ekonomické riešenie, a preto nie je vhodné na využitie v priemysle [2].

Spájanie pevných látok s kvapalnými, označované ako zalievanie, *overcasting*, či *compound casting*, sa považuje za najlepšiu techniku spájania vďaka svojim vynikajúcim vlastnostiam vrátane vysokej efektívnosti výroby, vynikajúceho výkonu, flexibility konštrukcie, úspory hmotnosti a nízkych prevádzkových nákladov.

## 1 OVERCASTING

Zalievanie je definované ako výrobná technológia, pri ktorej sa dva kovy, jeden v pevnom stave a druhý v kvapalnom stave, dostávajú do vzájomného kontaktu, takže medzi týmito dvoma materiálmi vzniká zóna difúznej reakcie, a tak dochádza k plynulému prechodu z jedného kovu do druhého. Z dôvodu konštrukčnej flexibility, efektívnosti výroby, úspory hmotnosti a nízkych výrobných nákladov sa v poslednom čase venuje veľká pozornosť *overcasting* technológii v rôznych systémoch a konštrukčných riešeniach [3].

### 1.1 Aplikácie technológie zalievania

Výhodou technológie zalievania (*overcasting*) je jej široká uplatniteľnosť vzhľadom na to, že výsledný

odliatok bude zdieľať kombináciu výhodných vlastností materiálov jadra a matrice.

Technológii zalievania sa intenzívne venuje napr. *Inštitút Fraunhofer*. Na lokálne zvýšenie mechanických vlastností, prioritne pevnosti pri vysokých teplotách, používajú v odliatku z hliníkovej matrice jadro z nehrdzavejúcej ocele. Jadro je vložené do dutiny formy pre vysokotlakové odlievanie a má tvar drôtených alebo perforovaných dosiek. Predkladá sa aj potenciálne využitie technológie na vysoko efektívnu realizáciu chladiacich kanálov. Vložením chladiaceho kanála - dutej rúrky cenovo dostupného štandardného materiálu ako zliatina *Al* alebo ocele, do dutiny formy je možné vytvoriť chladiace kanály plášťa elektromotora bez potreby použitia zlievarenského jadra [4].

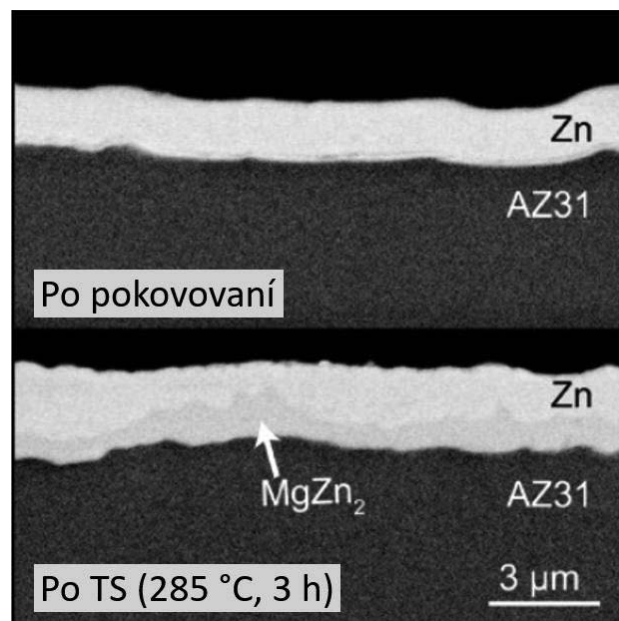
Využitie kovových pien pre absorpciu energie je jedným z hlavných predmetov výskumov aj v oblasti technológie zalievania. Výrobcovia automobilov využívajú myšlienku *crash boxov* - úmyselne ľahko zdeformovateľné časti karosérie na zachytenie čo najväčšieho množstva energie v prípade nárazu. Umiestňujú sa medzi nárazník a prednú lištu vozidla. Vyplnením rúrky *hliníkovou* penou je možné zvýšiť schopnosť absorpcie energie. Vyplnený *crash box* sa zrutí s väčším počtom záhybov na celej dĺžke steny rúrky. Vykonané štúdie výrobcu *FIAT* a *Nórskej univerzity vedy a techniky* ukazujú, že spolu so zlepšenou axiálnou absorpciou energie dochádza aj k veľkému zlepšeniu absorpcie energie pri mimoosových zrážkach [5].

Hybridné odliatky vyrobené zalievaním kovovej peny sa okrem tlmenia energie, vibrácií a nimi vzniknutého hluku nachádzajú uplatnenie aj ako tepelná izolácia v odvetví elektromobility. Vo všeobecnosti batéria elektromobilu produkuje teplo a elektrické napätie. Batéria je preto nutné pokryť špeciálnym materiálom, aby nedochádzalo k prepätiu. Vzhľadom na pokračujúcu snahu udržať hmotnosť vozidla na minimálnej úrovni ponúka technológia zalievania jasnú výhodu oproti tradičným mechanickým upevneniam [5].

## 2 ZALIEVANIE KOVOV NA ROVNAKÝCH BÁZACH - OVERCASTING

Spájanie identických kovov, ako napr. *Mg* a jeho zliatiny, bolo tiež experimentálne skúmané. Prírodná vrstva oxidu/hydroxidu na zliatinách *horčíka* zvyčajne bráni metalurgickému spájaniu prostredníctvom odlievania. Preto bola na substrát *AZ31* aplikovaná špeciálna úprava, ktorá nahradila vrstvu oxidu povlakom *Zn/MgZn<sub>2</sub>* (obr. 1). Substrát bol po brúsení a čistení ponorený do roztoku síranu zinočnatého, čím vzniká na substráte vrstva zinku s hrúbkou asi 100 nm. Ďalším krokom bola

galvanizácia, čím dochádza k zhrubnutiu vrstvy na 2 až 3 μm a tepelné spracovanie na zvýšenie adhézie *Zn* vrstvy k substrátu. Tepelné spracovanie sa vykonávalo v inertnej atmosfére argónu pri 285°C po dobu 3 hod. Difúznou reakciou vznikla medzivrstva *MgZn<sub>2</sub>*, ktorá tvorí chemické previazanie substrátu a povlaku. Po tejto preparácii bol substrát pripravený na zalievanie v inertnej atmosfére s teplotou liatia 700 až 750°C [6].

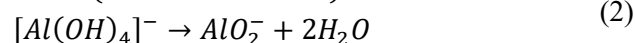
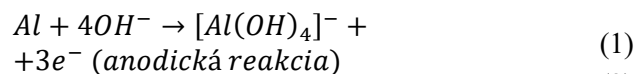


Obr. 1. Tepelným spracovaním vytvorená medzivrstva *MgZn<sub>2</sub>* [6]

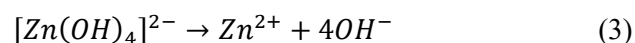
Spojenie *hliníkových* zliatin nebolo dokonale dosiahnuté z dôvodu prítomnosti vrstvy oxidu hlinitého (*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*) na povrchu tuhej *hliníkovej* zliatiny [6]. Táto povrchová vrstva má vyššiu teplotu tavenia (2072°C) ako roztavený kov, čo obmedzuje zmáčavosť pri zalievaní roztaveného materiálu [6].

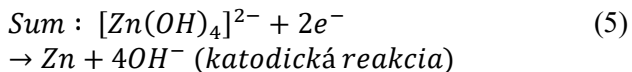
Tento problém riešil *Papis a kol.*, ktorí nahradili vrstvu *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* s vysokou teplotou tavenia (2072°C) vrstvou zinku s nízkou teplotou tavenia (420°C). Princíp *pozinkovania* v tomto experimente pozostával z chemického odstránenia stôp po valcovaní na materiály a chemického čistenia povrchu materiálu substrátu leptaním, po ktorom nasledovalo ponorenie substrátu do roztoku *NaOH* a *zinkových* aniónov s obchodným menom *SurTech652* bez potreby špeciálnej atmosféry. Pri namáčaní substrátu prebiehajú reakcie, pri ktorých dochádza k nahrádzaniu vrstvy *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* vrstvou zinku [3]:

Oxidácia:

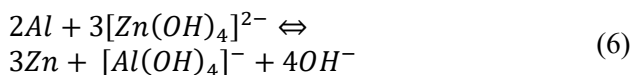


Redukcia:

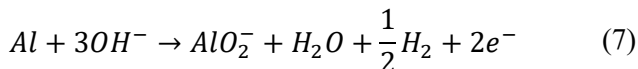




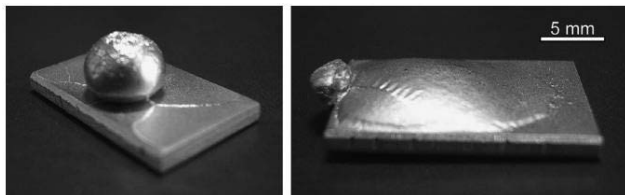
Celková reakcia:



Anodická vedľajšia reakcia na tvorbu  $\text{H}_2$ :

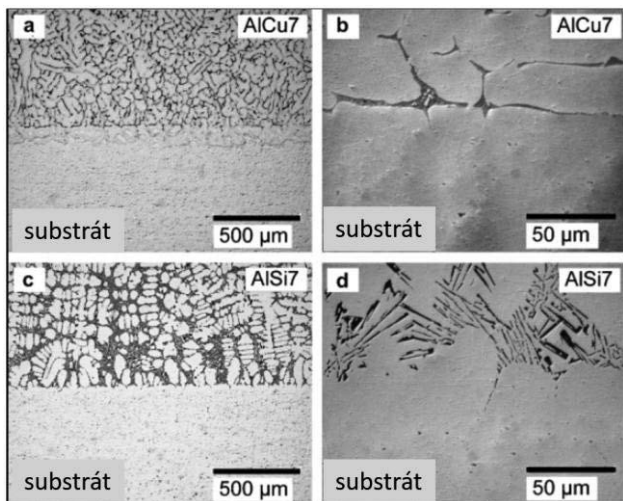


Po takto vzniknutom tenkom filme  $\text{Zn}$  sa vykonáva galvanizácia na zhrubnutie vrstvy z 400 nm na 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Výsledné zlepšenie zmačavosti bolo zachytené na obr. 2.



Obr. 2. Zvýšenie zmačavosti substrátu pozinkovaním [3]

Pri zalievaní  $\text{Al-Al}$  materiálov gravitačným odlievaním dochádzalo na rozhraní materiálov k zliedenským chybám ako pórovitosť a trhliny. Vzniku týchto chýb je možné zamedziť použitím tlaku pri zalievaní technológiou *squeeze overcasting*, pri ktorom dochádza k pevnému metalurgickému prepojeniu materiálov (obr. 3). Tepelné spracovanie zlepšuje mechanické vlastnosti zaliateho materiálu - vhodným je tepelné spracovanie starnutím [3, 6].



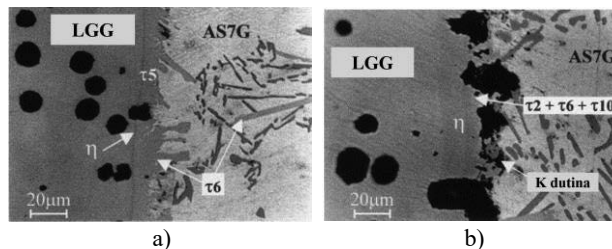
Obr. 3. Zalievanie  $\text{AlMg1}$  substrátu taveninou  $\text{AlCu7}$  a  $\text{AlSi7}$  [3]

### 3 ZALIEVANIE KOVŮ NA ODLIŠNÝCH BÁZACH - COMPOUND CASTING

*Overcasting* sa experimentálne ukázal ako osvedčený proces spájania rôznych kovov.

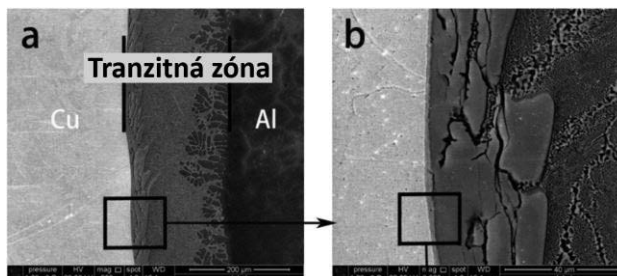
Viala a kol. úspešne vytvorili odliatok zo zliatiny hliníka s vložkou z liatiny s guľôčkovým grafitom. Tá bola gravitačným odlievaním do kokily zaliata prehriatou taveninou zliatiny hliníka. Skúmal sa aj

vplyv tepelného spracovania na vzniknutú tranzitnú zónu. V odliatkoch bez tepelného spracovania sa v metalurgicky vzniknutej tranzitnej zóne nachádzali intermetalické fázy  $\eta$  ( $\text{Al}_5\text{Fe}_2$ ),  $\tau_5$  ( $\text{Al}_7.4\text{Fe}_2\text{Si}$ ) a  $\tau_6$  ( $\text{Al}_{4.5}\text{FeSi}$ ) (obr. 4). Po tepelnom spracovaní sa v tranzitnej zóne nachádzajú intermetalické fázy  $\tau_2$  ( $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}_2$ ) a  $\tau_{10}$  ( $\text{Al}_{12}\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ). Na obr. 4 možno pozorovať vznik tzv. *Kirkendallových dutín* v tranzitnej zóne v dôsledku nerovnomernej difúzie  $\text{Al}$  atómov zo zliatiny do miest, kde prebiehala reakcia  $\text{Fe}$  a  $\eta$ , a nárast hrúbky tranzitnej zóny z 12 na 22  $\mu\text{m}$  [6].



Obr. 4. Tranzitná zóna zaliatej  $\text{LGG}$  zliatinou  $\text{Al}$ : a) pred tepelným spracovaním, b) po tepelnom spracovaní [7]

Ďalšou zaujímavou kombináciou kovov je  $\text{Al-Cu}$  bimetal. Ten je špecifický nízkou hustotou, odolnosťou voči korózii, nízkou hmotnosťou vďaka prítomnosti hliníka a veľmi vysokou tepelnou vodivosťou vďaka prítomnosti medi. Med' je však pri zvýšených teplotách náchylná na oxidáciu, čo spôsobuje chyby, ako sú trhliny alebo póry v tranzitnej zóne. Zinkové povlakovanie sa zaviedlo v rôznych prípadoch na ochranu povrchu pevného substrátu pri zalievaní. Nielenže zinkový povlak môže úspešne znížiť mieru oxidácie, ale nízka teplota topenia ( $420^\circ\text{C}$ ) a vysoká rozpustnosť zinku v materiáloch, ako je hliník a horčík, pri zvýšenej teplote môže tiež zabrániť zvýšenej koncentrácii zinku v tranzitnej zóne. Experimentálne bol vytvorený bimetal zaliatím pevného *pozinkovaného medeného* substrátu taveninou  $\text{Al}$  zliatiny, využitím technológie *Squeeze casting* (obr. 5).



Obr. 5. REM snímka morfológie  $\text{Al-Cu}$  bimetalického materiálu [8]

V závislosti od teploty liatia a aplikovaného tlaku boli v tranzitnej zóne odliatkov pozorované 4 vrstvy: Vrstva  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ , vrstva  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , eutektická vrstva  $\text{Al-Cu}$  a vrstva tuhého roztoku  $\text{Al}$  bohatá na  $\text{Cu}$ . Zväčšovanie

hrúbky tranzitnej zóny túto zónu, ako aj mieru prepojenia materiálov, oslabuje a vznikajú v nej trhliny. Najlepšie mechanické vlastnosti bimetal vykázal pri použití teploty odlievania 700°C [1, 8, 9].

Ďalším využitím technológie *compound casting* je v rámci znižovania ekonomickej záťaže na výrobu konkrétnej súčiastky vhodné zvoliť materiál povrchu odliatku z nehrdzavejúcej ocele a jadro odliatku z tyče konštrukčnej ocele.

V prípade zalievania substrátu taveninou s podobnou teplotou tavenia dochádza k nataveniu substrátu. Z tohto dôvodu boli pri experimentálnom zalievaní týchto dvoch typov ocelí technológiou liatia na vytaviteľný model pozorované tri rozhrania: v dôsledku interakcie tavenina/tavenina (rozhranie I), interakcie stuhnutá konštrukčná ocel'/tavenina nehrdzavejúcej ocele (rozhranie II) a interakcie pevná látka/pevná látka (rozhranie III). Dospelo sa k záveru, že rozhrania I a II majú vyššiu mikrotvrdosť ako rozhranie III, pretože oblasť interakcie rozhrania I a II má zmes martenzitickej a bainitickej mikroštruktúry. Keďže difúzia *uhlíka* prebieha z konštrukčnej ocele do nehrdzavejúcej ocele, *Cr* a *Ni* difundujú v opačnom smere difúzie *uhlíka*. Mechanické vlastnosti bimetalu boli vyššie ako vlastnosti nehrdzavejúcej ocele, ale nižšie ako vlastnosti konštrukčnej ocele [10].

Ďalšie experimenty a výskumy preukázali úspešné spôsoby prípravy bimetalických odliatkov *horčička* a *hliníka* bimetalických odliatkov liatiny s vysokým obsahom *chrómu* a ocele so stredným obsahom *uhlíka* a sivej liatiny a zliatiny *medi* (*Cu*) [1].

## ZÁVER

*Overcasting* umožňuje vytvárať bimetalické súčiastky s difúzne viazaným rozhraním, ktoré spájajú výhodné vlastnosti matrice a jadra. Vzhľadom na problematiku *oxidických* vrstiev  $Al_2O_3$  je predmetom výskumu ich nutné odstraňovanie alebo modifikácia rôznymi metódami - povlakovaním zinkom, galvanizáciou, tepelným spracovaním - za účelom zlepšenia zrnitosti a zabezpečenia metalurgického spojenia medzi súčasťami zo zhodných alebo odlišných kovov.

Technológia *overcasting* vykazuje vysoký aplikačný potenciál v automobilovom a elektromobilovom priemysle - pre výrobu energeticky absorpčných komponentov, chladiacich systémov a konštrukčných prvkov s vysokými nárokmi na pevnosť, teplotnú odolnosť a hmotnostnú optimalizáciu.

## Pod'akovanie

*Tento článok vznikol ako súčasť grantového projektu KEGA 029ŽU-4/2023: Rozvoj dištančnej formy vdelávania pre študentov strojárskoho zamerania na*

*báze interaktívnej platformy vo svetových jazykoch. Autori ďakujú grantovej agentúre za podporu.*

## LITERATÚRA

- [1] ALI, M. A. - JAHANZAIB, M. - WASIM, A., HUSSAIN, S. - ANJUM, N. A. (2018): *Evaluating the effects of as-casted and aged overcasting of Al-Al joints*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(1–4), 1377–1392.
- [2] HAJJARI, E. - DIVANDARI, M. - RAZAVI, S. H. - EMAMI, S. M. - HOMMA, T. - KAMADO, S. (2011): *Dissimilar joining of Al/Mg light metals by compound casting process*. In: Journal of Materials Science, 46(20), 6491–6499.
- [3] PAPIS, K. - HALLSTEDT, B. - LÖFFLER, J. - UGGOWITZER, P. (2008): *Interface formation in aluminium–aluminium compound casting*. In: Acta Materialia, 56(13), 3036–3043.
- [4] FRAUNHOFER IFAM - BUSSE, M. - CLAUSEN, J. - KLEI, J. (2021): *Metal-to-metal compound casting for innovative cast components* [online]. Dostupné na: [https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/Shaping\\_Functional\\_Materials/casting\\_technology/metal-to-metal-compound-casting-for-innovative-cast-components-fraunhofer-ifam.pdf](https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/Shaping_Functional_Materials/casting_technology/metal-to-metal-compound-casting-for-innovative-cast-components-fraunhofer-ifam.pdf)
- [5] BANHART, J. (2007). *Metal Foams - from Fundamental Research to Applications*. In: RAJ, B. (ed.) *Frontiers in the design of materials*. CRC Press. ISBN 978-1420-0473-01.
- [6] PAPIS, K. - LÖFFLER, J. - UGGOWITZER, P. (2010): *Interface formation between liquid and solid Mg alloys—An approach to continuously metallurgic joining of magnesium parts*. In: Materials Science and Engineering: A, 527(9), 2274–2279.
- [7] VIALA, J. - PERONNET, M. - BARBEAU, F. - BOSSELET, F. - BOUIX, J. (2002): *Interface chemistry in aluminium alloy castings reinforced with iron base inserts*. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(10), 1417–1420.
- [8] LIU, T. - WANG, Q., SUI, Y., WANG, Q., & DING, W. (2016): *An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum–copper bimetal by squeeze casting*. In: Materials & Design, 89, 1137–1146.
- [9] ZHANG, H. - CHEN, Y. - LUO, A. A. (2014): *A novel aluminum surface treatment for improved bonding in magnesium/aluminum bimetallic castings*. In: Scripta Materialia, 86, 52–55.
- [10] ŞİMŞİR, M., KUMRUOĞLU, L. C., & ÖZER, A. (2009): *An investigation into stainless-steel/structural-alloy-steel bimetal produced by shell mould casting*. In: Materials & Design, 30(2), 264–270.

# Tvárnenie plechu veľkou uvoľnenou energiou

**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

**Borislav Melo, Ing., PhD.**

Viena International, spol. s r. o.  
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin  
E-mail: melo@viena.sk

## Sheet metal forming with high released energy

**Abstract:** The paper analyzes an unconventional method of forming sheet metal parts with high energy release. Published diagrams and images together with a physical description of the process illustrate how this technology can be applied to form large-sized sheet metal parts at low production costs. The text presents important mathematical equations that are part of the physical description together with technological parameters. A brief economic evaluation is presented in the conclusion.

**Keywords:** sheet, forming, energy, metal parts.

## ÚVOD

Percentuálny pokles zastúpenia väčších a veľkých podnikov priniesol zákonite pokles v reálnom vyjadrení počtu kusov výrobkov, t. j. došlo k zmene veľkosti sérií. Tento fakt núti výrobcov strojárskeho výrobu, najmä oblasť plošného tvárnenia, využívať intenzívnejšie tzv. „zabudnuté“ postupy výroby. Výrobca je nútený hľadať taký postup, aby dokázal všetky požiadavky splniť a efektívne využiť zvolenú alternatívu. Jednou z ciest v oblasti plošného tvárnenia je aj možnosť tvárnenia výbuchom.

Ťahanie kovov explozívnymi tlakmi je podmienené presným množstvom trhavy na vykonanie požadovanej práce bez nežiaducej deformácie tvárneného kovu. Pri tvárnení kovov sa využíva nárazová vlna a tlak plynov vzniknutých pri explózii. Nízke výrobné náklady pri porovnaní s bežne používanými spôsobmi zvyhodňujú explozívne tvárnenie, zvlášť pre veľké súčasti.

Detonácia je vždy sprevádzaná vznikom tlakovej vlny v uzavretom i voľnom priestore. Efektívne tlaky plyných zmesí sú cca 2 MPa, tuhých látok alebo kvapalných látok 20 000 MPa. Detonácia je výbušná premena šíriaca sa rýchlosťou vyššou ako je rýchlosť zvuku vo výbušnom systéme.

Ak je tlak rovnaký v každom smere výbušného systému, je otázne, či jeho veľkosť bude stačiť na trvalú deformáciu spracovávaného materiálu, t. j. vytvorenie požadovanej súčasti predpísaného geometrického tvaru a rozmerov. Ak je jeden smer neuzavretý, spätný pohyb uvoľnenej energie, ktorá sa

uvoľní odrazením tlakovej vlny od podložky, čiže odražača, dôjde k posunu na tej istej nositeľke, a energia je zväčšená o prírastky z ostatných smerov. Nevyhnutnou podmienkou je, že spracovávaný materiál nesmie byť pri procese poškodený.

## 1 VÝBUCH A JEHO PÔSOBENIE V PROSTREDÍ

Nech existuje prvok C, nachádzajúci sa v čele detonačnej vlny (obr. 1). Na obr. 1a je vyznačený stav v čase  $t$  a na obr. 1c stav v čase  $t + dt$ . Symbol  $D$  znamená, že daná veličina sa vzťahuje k rýchlosti čela detonačnej vlny,  $u_d$  - rýchlosť hmoty na čele detonačnej vlny. V súlade s obr. 1 je zákon zachovania hmoty v integrálnom tvare vyjadrený rovnicou:

$$D \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_D = (D - u_D) \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_D, \quad (1)$$

$$\text{takže } u_D = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_D}\right).$$

Zákon zachovania hybnosti má tvar:

$$(p_D - p_w) \cdot dF \cdot dt = D \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_w \cdot (u_D - 0), \quad (2)$$

$$\text{takže } p_D - p_w = \rho_w \cdot u_D \cdot D$$

kde  $\rho$  - hustota,

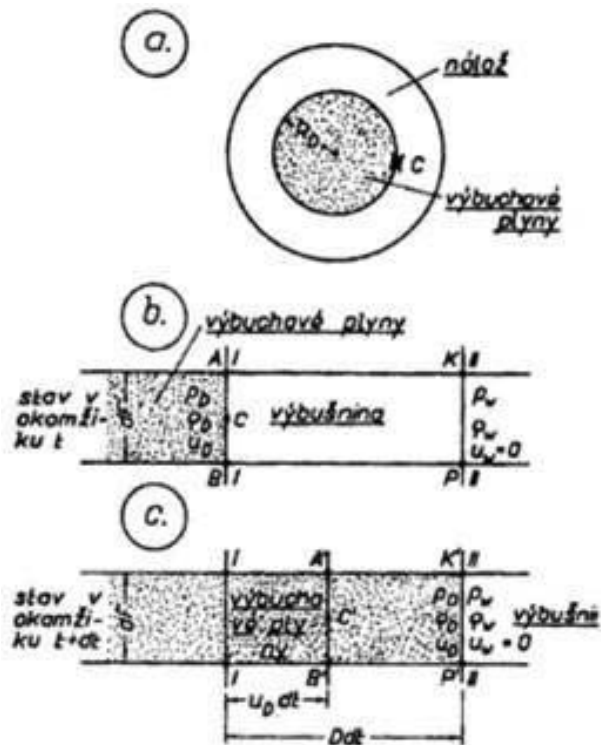
$p_D$  - tlak,

$p_w$  - tlak,

$\rho_w$  - hustota výbušniny,

$u_w$  - hmotová rýchlosť,

$E_w$  - vnútorná merná energia.



Obr. 1. Schéma sférického výbuchu: a) v čase  $t$ , b) výřez v okamihu  $t$ , c) výřez v okamihu  $t + dt$

Stavová rovnica udáva vzťah medzi tromi parametrami. Spravidla má tvar:

$$F(p, \rho, T) = 0, \quad p = p(V, S), \quad p = p(\rho, T). \quad (3)$$

Zákon zachovania energie:

$$Q_w = E_D - E_w + \frac{p_D + p_w}{2} \cdot \left( \frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho_w} \right). \quad (4)$$

Na uzatvorenie sústavy sa aplikuje hypotéza  $\Phi_1(p_D, \rho_D, u_D, t) = 0$ .

Na výpočet okrajových hodnôt sa aplikuje uzatvorená sústava šiestich rovníc (5):

$$\begin{aligned} u_D &= \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_D} \right) \cdot D \\ p_D - p_w &= \rho_w \cdot u_D \cdot D \\ Q_w &= E_D - E_w + \frac{p_D + p_w}{2} \cdot \left( \frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho_w} \right) \\ \frac{p_D}{\rho_D \cdot R \cdot T_D} &= \varphi(\rho_D) \end{aligned} \quad (5)$$

$$E_D = c_v \cdot T_D - \int_{p_w}^{p_D} \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_Q - p \right] \cdot \frac{d\rho}{\rho^2}$$

$$\Phi_1(p_D, \rho_D, u_D, t) = 0$$

Vzťahy boli odvodené pre čelo detonačnej vlny, ktorá je rázovou vlnou. Majú teda všeobecnú platnosť pre rázovú vlnu v ľubovoľnom prostredí, ak prostredie

neuvoľňuje energiu, zjednoduší sa zodpovedajúcim spôsobom tretia rovnica sústavy (5) ( $Q_w = 0$ ).

Z prvých dvoch rovníc sústavy (5) plynie po príslušnej zmene v označení rýchlosti častíc na čele rázovej vlny v uvažovanom prostredí:

$$u_\phi = u_x = \sqrt{[(p_x - p_0) \cdot (V_0 - V_x)]}, \quad (6)$$

kde  $p_0, V_0$  - tlak a merný objem prostredia pred čelom rázovej vlny,

$p_x, V_x$  - tlak a merný objem prostredia za rázovým čelom.

Rovnicami (5) a (6) a stavovou rovnicou ľubovoľného prostredia je úloha o počiatkových parametroch rázovej vlny riešená:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \cdot \left\{ 1 + \frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_x}{p_D} \right)^{\frac{k-1}{2 \cdot k}} \right] \right\}. \quad (7)$$

Pre rozlet produktov detonácie do prázdnoty  $p_x = 0$  a

$$u_x = u_{\max} = \frac{3 \cdot k - 1}{2 \cdot k - 1} \cdot D. \quad (8)$$

Zo vzťahu (8) plynie  $u_x \leq D$ , čo nezodpovedá realite, lebo rýchlosť  $u_x$  prevyšuje  $D$  takmer dvakrát. Rýchlosť rozletov produktov detonácie do vzduchu prevyšuje hodnotu  $D$ . Nesúlad je spôsobený tým, že pri prudkom spáde tlaku (do  $p_x < 3000$  MPa) sa nedá uvažovať hodnota  $k$  za konštantnú a rovnú trom. Odvodené vzorce dávajú správne výsledky pri výbušných a hustejších prostrediach, kde  $p_x > 3000$  MPa (voda, zeminy atď.).

Podľa [7] možno vyjadriť a vypočítať:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \cdot \left[ 1 - \sqrt{2 \cdot k} \cdot \frac{\pi^* - 1}{\sqrt{(k+1) \cdot \pi^* + (k-1)}} \right]. \quad (9)$$

Pre čelo rázovej vlny šíriace sa obklopujúcim prostredím platí rovnica (11), ktorá spolu s (9) a stavovou rovnicou ľubovoľného prostredia rieši danú úlohu.

Pri náraze detonačnej vlny na absolútne tuhú nedeformovateľnú prekážku je  $u_x = 0$  a z (9) plynie pre maximálny pretlak odrazu:

$$\pi^* = \frac{p_x}{p_D} = \frac{5 \cdot k + 1 + \sqrt{17 \cdot k^2 + 2 \cdot k + 1}}{4 \cdot k}. \quad (10)$$

Kov má spravidla väčšiu hustotu a menšiu stlačiteľnosť než produkty výbuchu v čele detonačnej vlny. Pri náraze detonačnej vlny na kov sa vytvorí odrazená rázová vlna a úloha je preto riešená rovnicami (7), (8) a stavovou rovnicou. Pre kovy, kvapaliny a tuhé telesá treba použiť izentropiu (9). Pre rad kovov je  $k_2 = k_1 = 4$ ,  $A^* = 4,5 \cdot 10^5$  MPa (Fe),  $A^* = 2,35 \cdot 10^5$  MPa (Cu),  $A^* = 2,04 \cdot 10^5$  MPa (dural). V oblasti tlakov  $p > 5000$  MPa platí:

$$p_x = p_\phi = A^* \cdot \left[ \left( \frac{v_\phi}{v_0} \right)^{k_2} - 1 \right]. \quad (11)$$

### 1.1 Pomerný impulz

Produkty výbuchu sa rozletia iba v smeroch kolmých na voľné povrchy. Tlak vo všetkých kontaktných bodoch prekážky je zhodný a rovná sa tlaku produktov okamžitej detonácie  $p_w^*$ . Čas pôsobenia tlaku je v rôznych bodoch prekážky rozdielny a rovná sa času príchodu povrchu rozletu do vzdialenosti uvažovaného bodu od najbližšieho voľného povrchu  $x$ , delené rýchlosťou premiestnenia povrchu rozletu  $N_{XW}$ :

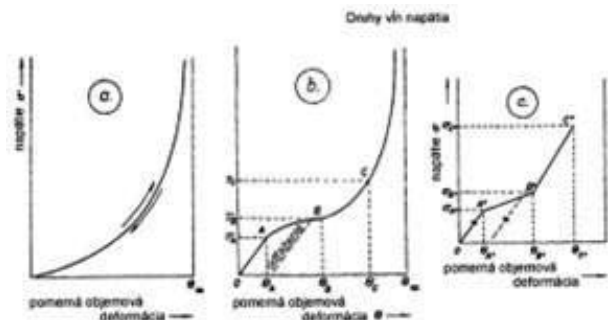
$$\tau = \frac{x}{N_{XW}}. \quad (12)$$

Tlak v čase  $t = 0$  náhle vzrastie, pôsobí po dobu  $\tau$  v rôznych bodoch všeobecne rôznou silou a potom náhle prestane pôsobiť.

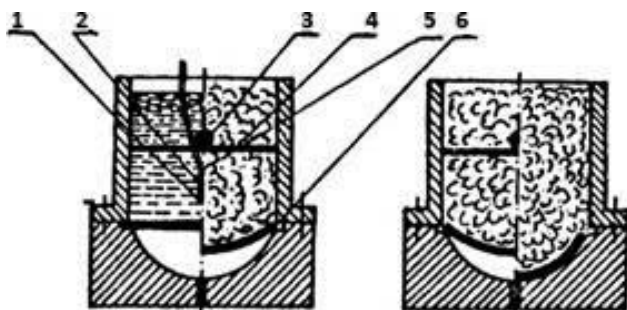
Výbuchové zaťaženie pôsobí na prekážku minimálnu dobu a prejaví sa ako okamžitý impulz:

$$i = p_w^* \cdot \tau, \text{ inak } i = \int_0^\tau p(t) \cdot dt, \quad (13)$$

kde  $i$  - pomerný alebo merný impulz.



Obr. 2. Závislosť tlakových napätí od pomerných objemových deformácií pre: a) kvapaliny, plyny ap., b) tuhé telesá, c) aproximácia závislosti troma úsečkami v danej oblasti



Obr. 3. Jednoduché ťahanie na 2 operácie explóziou v kvapaline: 1 - I. nálož, 2 - rozbuška, 3 - II. nálož, 4 - priehradka, 5 - zápalnica, 6 - plech

Tvárnenie výbuchom je vhodné pre kusovú alebo malosériovú výrobu rozmerných súčastí. Minimálna medzná hrúbka je 1 mm. Medzný pomer hrúbky k

východiskovému priemeru je pre oceľový plech pri  $t : D = 1 : 300$ . Kritická deformačná rýchlosť, ktorá vytvára maximálnu pomernú deformáciu, býva pri oceli v závislosti od tepelného spracovania od  $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pri zvyšovaní deformačnej rýchlosti sa mení diagram  $\sigma$ - $\epsilon$ , a to v oblasti nad medzu sklzu, jej hodnota sa zvyšuje až na trojnásobok.

Medzu sklzu pri dynamickom namáhaní možno pre ocele s nízkym obsahom uhlíka ( $\sim 0,05 \%$ ) určiť pri predpoklade konštantnej teploty z upraveného Becker-Ovowanovho empirického vzťahu:

$$\sigma_K = \sigma_{p_t} \cdot \left[ 1 - 0,21 \cdot \left( 2,65 - \log \frac{v}{h} \right) \right]. \quad (14)$$

kde  $\sigma_K$  - medza sklzu,

$v$  - deformačná rýchlosť,

$h$  - výška deformovaného materiálu,

$\sigma_{p_t}$  - medza pevnosti.

Pôsobením veľkých rýchlostí deformácie dochádza ku špeciálnej deformácii materiálovej mriežky natočením, ku vzniku tzv. dvojčiat.

Veľké rýchlosti deformácie umožňujú vznik miestnych drobných plastických deformácií, takže celkový namáhaný prierez nemusí byť ani znateľne deformovaný. Obvykle sa materiál spevní a zvýši sa jeho tvrdosť.

Tvárnenie výbuchom je vysoko rentabilné pre tvarovanie lodných plátov, stien rozmerných nádob, na odstraňovanie ovality nádrží atď. Sú uvádzané tieto pozitívne ekonomické účinky.

Úspory materiálov 50 až 70 % v dôsledku toho, že odpadá obrábanie, úspory času na obrábanie 30 až 85 %, úspora na strojnom parku.

Pri zložitých tvaroch sa využívajú metódy postupného odpaľovania náloží. Postupné odpaľovanie náloží rozdeľuje explozívne tvárnenie na určité postupne realizované operácie, v našom prípade ťahanie polgule.

Vzhľadom na nízke ceny trhavín a jednoduché nástroje (obvykle ide len o formy z dreva, tkaniny alebo betónu) sa dosahuje až 20-násobného zlacnenia výroby oproti zhotovovaniu súčastí klasickým spôsobom.

Energia rázových vln závisí najmä od chemického zloženia výbušnín, množstva a vzdialenosti od polotovaru. Rýchlosti zaťažovania sa pohybujú rádovo okolo  $103 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tlaky okolo  $104 \text{ MPa}$  a teploty okolo  $103 \text{ K}$ .

Podstatou výpočtu hmotnosti nálože je kritická deformačná práca:

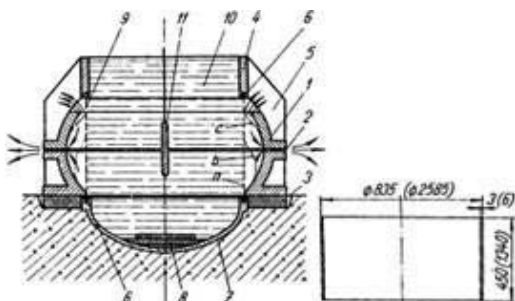
$$A_{krit} = a_{krit} \cdot V \quad (15)$$

a

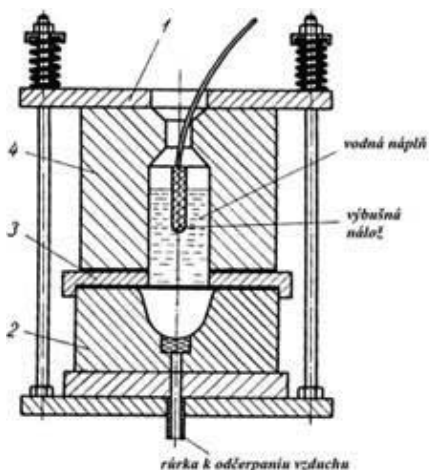
$$a_{krit} = \frac{1}{2} \cdot v_{krit}^2 \cdot \rho \quad (16)$$

kde  $\rho$  - merná hmotnosť,  
 $V$  - objem výtvarku.

Výpočet hmotnosti nálož je podľa toho približný, a preto každú novú technológiu treba vyskúšať.



Obr. 4. Ťažný nástroj pre explozívne ťahanie: 1 - teleso, 2 - plech, 3 - podložka, 4 - vrchná časť, 5 - teleso, 6 - dno, 7 - podstava, 8 - platničky, 9 - polovýrobok, 10 - voda, 11 - nálož, šípky naznačujú smer úniku spalín



Obr. 5. Schéma tvárnenia výbuchom: 1 - univerzálne upínacie zariadenie, 2 - výmenná lisovnica, 3 - gumová podložka, 4 - expanzná komora

## 2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRE PROCESU

Za normálne (do  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) alebo zvýšené (do  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) rýchlosti tvárnenia sa používajú mechanické alebo hydraulické (lisy) zdroje energie, alebo sa používa energia z expanzie pár a plynov (buchary). V poslednom čase sa intenzívnejšie začala využívať energia z explózií výbušnín (streliviny a trhaviny) a energia z detonácií výbušných zmesí (detonačné horenie pohonných látok). Rýchlosti explozívneho alebo detonačného horenia rozdeľujú tvárnenie na:

1. Tvárnenie s veľmi vysokými rýchlosťami do  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
2. Explozívne tvárnenie s rýchlosťami nad  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Z technologického hľadiska najvyšší rozvoj

zaznamenalo najmä explozívne tvárnenie, ktoré ako zdroj energie využíva:

1. Explozívnu energiu prostredníctvom kontaktnej alebo sprostredkovanej rázovej vlny.
2. Elektrickú energiu prostredníctvom elektrického výboja alebo účinku magnetického poľa.

Explózia nesie v sebe energiu vo forme tlaku, tepla a svetla. Na tvárnenie využívame najmä tlakovú rázovú vlnu, ktorá pôsobí na kov priamo kontaktne (výbušnina je položená priamo na kov) alebo sprostredkovane - nepriamo cez prostredie (výbušnina je uložená nad materiálom) a rázová vlna sa prenáša na kov prostredníctvom rázovej vlny vytvorenej vo vzduchu, vo vode alebo piesku, a len prostredníctvom nej sa potom prenáša na kov, ktorý svojím tlakovým účinkom tvárni do požadovaného tvaru.

## 3 VÝBUCH VO VODNOM PROSTREDÍ

Pri kontaktnom výbuchu, napr. na dne nádrže, sa vytvorí polguľová (sústredená nálož), príp. polparaboloidová (valcová nálož) rázová vlna. Platné sú vzťahy, ktoré boli uvedené v predošlom odseku.

Pre čelo vodnej rázovej vlny platia tieto rovnice:

$$N = (\rho_\phi \cdot u_\phi - \rho_o \cdot u_o) \cdot (\rho_\phi - \rho_o) \quad (17)$$

$$P_\phi = p_o = \rho_o \cdot (N - u_o) \cdot (u_\phi - u_o) \quad (18)$$

kde  $N$  - rýchlosť čela vlny,

$\rho_\phi, u_\phi, P_\phi$  - hustota, hmotová rýchlosť, tlak v čele vlny,

index  $O$  - pred čelom rázovej vlny.

Pri rázových vlnách je  $p_m = p_\phi; \rho_m = \rho_\phi; u_m = u_\phi$ .

$$P_\phi - p_o = d_2 \cdot (\rho_\phi \cdot k_2 - \rho_o \cdot k_2) \quad \text{pre } P_\phi \geq 3000 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\frac{P_\phi + B}{\rho_\phi \cdot k_2} = \frac{p_o + B}{\rho_o \cdot k_2} \quad \text{pre } P_\phi \leq 3000 \text{ MPa} \quad (20)$$

Priradí sa tiež rovnica pre rýchlosť zvuku:

$$c_{z\phi} = \sqrt{\frac{dp_\phi}{d\rho_\phi}} = \sqrt{\frac{k_2 \cdot (p_\phi + B)}{\rho_\phi}} \quad (21)$$

V rovnici  $d_2 = 40\,250 N_1 - k_2, k_2 = 6,29; B = 30\,450 N = 7,15$ .

Vyjdú rovnice pre štyri veličiny  $N, c_{z\phi}, \rho_\phi, u_\phi$ , ktoré je možné vyjadriť v závislosti od  $p_\phi$  alebo  $\Delta p_\phi$ .

V rozmedzí tlaku 100 až 120 MPa sa dá voda uvažovať ako lineárne pružné prostredie.

Nakoniec podľa *J. Henrycha* (1973) bude:

- rýchlosť čela vlny:

$$N = v_{zo} \cdot \left[ 1 + \frac{(l + k_2) \cdot \rho_\phi}{4 \cdot B \cdot k_2} \right], \quad (22)$$

- rýchlosť zvuku:

$$v_{z\phi} = v_{z0} \cdot \left[ 1 + \frac{(k_2 - 1) \cdot \rho_\phi}{2 \cdot B \cdot k_2} \right], \quad (23)$$

- hmotová rýchlosť:

$$u_\phi = \frac{c_{z0} \cdot P_\phi}{B \cdot k_2}, \quad (24)$$

- teplota:

$$T_\phi \approx T_0. \quad (25)$$

### 3.1 Odras rázovej vlny

Pri dopade rázovej vlny kolmo na absolútne tuhú nepohyblivú prekážku sa náhle zastavia pohybujúce sa častice na čele vlny a pretlak stúpne. Od prekážky sa potom proti prúdu častíc v dopadajúcej vlne šíri odrazená vlna.

Platí vzorec:

$$\Delta p \cdot \Phi_r = \frac{2 \cdot \Delta p_\phi + 2,5 \cdot \Delta p \cdot 2 \cdot \Phi}{\Delta p_\phi + 19000} \text{ [MPa]}. \quad (26)$$

### 3.2 Výpočet množstva trhaviny

Pri uvažovaní toho, že medza sklzu je hranicou medzi pružnou a plastickou oblasťou deformácie, potom pri tvárnení vysokými rýchlosťami musia sa rozlišovať dynamické medze sklzu, a to nestabilnú  $R_{ed}$  a stabilnú  $R_{es}$  [6].

Nestabilná medza sklzu  $R_{ed}$  je špičkové napätie, trvajúce len pri prechode vlny pružnej deformácie a určuje ju vzťah:

$$R_{ed} = \rho \cdot c^2, \quad (27)$$

kde  $c$  je rýchlosť pružnej vlny,

$v$  je rýchlosť častíc,

$\rho$  je hustota tvárneho materiálu.

Po prechode pružnej vlny sa mení proces pri nižšom napätí zo stabilnej dynamickej medze sklzu,  $R_{es}$ , do plastickej oblasti:

$$R_{es} = R_e \cdot \left( \frac{v_d}{v_c} \right)^n, \quad (28)$$

kde  $R_e$  je statická medza sklzu materiálu,

$v_d$  je deformačná rýchlosť pri dynamickom zaťažovaní,

$v_s$  je deformačná rýchlosť pri statickom zaťažovaní,

$n$  je experimentálne určený exponent.

## ZÁVER

Pri hodnotení tvárniacich metód doposiaľ platilo, že sú výhodné pre väčšie série a pri použití dobre tvárných materiálov. Pri tvárnení veľkou energiou táto

skutočnosť stráca buď celú alebo čiastočnú platnosť. Dá sa to dokázať nasledujúcou úvahou:

V celkovej kalkulácii výroby je veľká položka cena nástroja, ktorá pri tvárnení býva nepomerne väčšia než cena nástrojov pre obrábanie. Nutné je teda zaistiť takú veľkosť série, aby podiel ceny nástroja na jeden výlisok bol hospodársky únosný. Toto tvárnenie umožňuje použitie lacných ocelí pre nástroje, nástroje zo železobetónu, umelých hmôt a pod.

Typický je príklad tvárnenia lodnej obšívky. Cena potrebného nástroja vyrobeného z ocele bola stanovená na 3320 až 3985 €. Cena nástroja zo železobetónu, ktorý splnil ten istý účel bola 240 €. Napr. lis, umožňujúci tvárnenie lodného plátu 8 mm hrubého a s rozmermi 3 × 1 m do všestranne zboreného nepravidelného tvaru, sa dá celkom dobre pri tvárnení výbuchom nahradiť 2,5 kg trhaviny v cene 0,35 €. Nedá sa však hovoriť, že by metóda tvárnenia výbuchom bola univerzálna. Tvárnenie veľkou energiou je technológiou doplnkovou a s úspechom sa uplatní tam, kde bežné lisovacie spôsoby sú nedostatočné.

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnienie, Hydroforming*. EDIS Žilina ISBN 978-80-554-1205-4.
- [2] BREPTA, R. - PROKOPEC, M. (1982): *Šírení napěťových vln a rázy v tělesech*. ACADEMIA Praha.
- [4] FARLÍK, A. - ONDRÁČEK, L. (1988): *Teorie dynamického tváření*, SNTL Praha.
- [5] FUCHS, A. (1985): *Steel Research*, 85/6 p. 226.
- [6] HENRYCH, J. (1973): *Dynamika výbuchu a její použití*. Academia Praha.
- [7] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1988): *Plasticity and metal forming*, Cambridge.
- [8] KOLSKY, H. (1987): *Stress Waves in Solids*. Oxford at the Clarendon Press.
- [9] LOVE, A. E. H. (1985): *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Cambridge.
- [10] MACHEK, V. a kol. (1983): *Zpracování tenkých plechů*. SNTL Praha.
- [11] MORAVEC, J. (2006): *Odras od hladiny na rozhraní voda- vzduch pri tvárnení explóziou v hydraulickom prostredí*. Hydraulika a pneumatika, roč.VIII.1-2, pp. 63-64, ISSN 1335-5171.

---

# Kinematická analýza rovinného paralelného mechanizmu s tromi vodiacimi reťazcami s neidentickou štruktúrou

---

**Mária Michalková, Ing. RNDr., PhD.\***

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: maria.michalkova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 4952

**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

**Branislav Ftorek, doc. Mgr., PhD.**

Katedra aplikovanej matematiky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.ftorek@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 4962

## Kinematic analysis of the planar parallel mechanism with three serial chains of non-identical structure

**Abstract:** In this paper, we analyse the mobility of a planar parallel mechanism with three serial chains. The serial chains consist of three joints with one degree of freedom (rotational and translational), but with a different arrangement or combination of the mentioned joints. Using the Screw theory concept, there is investigated the mobility of the end effector, and the direct and inverse problem for the speeds is formulated, as well. Further, we deal with the occurrence of singular positions of such a mechanism.

**Keywords:** mobility of mechanism, singularities, planar parallel manipulator.

---

## ÚVOD

Jednou z prvých charakteristík, ktorú o ľubovoľnom mechanizme potrebujeme vedieť, je počet stupňov voľnosti, teda pohyblivosť daného mechanizmu. Táto informácia má zásadný význam pre kinematickú a dynamickú analýzu. Okrem toho umožňuje overiť existenciu nejakého mechanizmu ( $DOF > 0$ ) alebo stanoviť počet aktuátorov pre pohon mechanizmu [1]. Pohyblivosť telesa predstavuje počet nezávislých pohybov, ktoré môže teleso vykonať. Voľné teleso má v priestore šesť stupňov voľnosti. Vo väčšine prípadov je však teleso spojené s okolím geometrickými väzbami, ktoré jeho pohyblivosť znižujú v závislosti od druhu väzby. Pri uvoľňovaní väzby sa nahrádza reakčnou silou, resp. reakčným momentom síl, v závislosti od toho, či odoberá translačné alebo rotačné stupne voľnosti.

Kinematický model ako neoddeliteľná súčasť analýzy mechanizmu je nevyhnutný jednak pre riešenie jeho

dynamickej stránky, ako aj pre jeho riadenie a simuláciu. Úlohou kinematickej analýzy je zadefinovať priebeh polohy a orientácie koncového efektora v čase, jeho rýchlosť a zrýchlenie, prípadne ďalšie vyššie derivácie polohy.

V rámci kinematiky sa rozlišujú štyri základné úlohy:

- priama úloha pre polohu,
- inverzná úloha pre polohu,
- priama úloha pre rýchlosti,
- inverzná úloha pre rýchlosti.

Pri priamej úlohe pre polohy je potrebné na základe znalosti vzájomnej polohy členov mechanizmu určiť polohu koncového efektora. Vzájomná poloha členov v sériovom mechanizme je určená ich vzdialenosťami a uhlami ich osí; v prípade paralelných mechanizmov sú to dĺžky členov ich ramien, respektíve vzájomné usporiadanie ramien. Inverzná úloha postupuje opačne: zo známej polohy a orientácie koncového

efektora máme určiť topológiu jednotlivých členov mechanizmu. Rovnicu rýchlosti, z ktorej sa vychádza pri riešení priamej alebo inverznej úlohy pre rýchlosti, možno získať jednoducho po zderivovaní rovnice pre polohu členov podľa času. Tento postup, ale môže byť komplikovaný. Ako vhodná alternatíva pre nájdenie rovnice rýchlostí sa javí použitie *Screw theory*, konkrétne použitie recipročných skrutiiek.

V článku sa bude vyšetrovať pohyblivosť a formulovať pohybové rovnice pre rovinný paralelný mechanizmus s tromi vodiacimi reťazcami. Špecifikom tohto mechanizmu je, že reťazce nemajú identickú štruktúru. Analýza ukáže, ako to ovplyvní pohyblivosť mechanizmu a výskyt singulárnych polôh.

## 1 VÄZBY TELIES V SKRUTKOVOM VYJADRENÍ

Akúkoľvek zmenu polohy tuhého telesa v priestore je možné dosiahnuť rotáciou telesa okolo nejakej osi a následným posunutím v smere danej osi. Pri súbežnej realizácii týchto dvoch pohybov ide jednoducho o pohyb telesa po dráhe v tvare skrutkovice.

Z matematického hľadiska skrutkou (screw)  $\$$  nazývame usporiadanú dvojicu vektorov  $\mathbf{s}, \mathbf{s}^0 \in R^3$ , zapísanú v tvare duálneho vektora:

$$\$ = (\mathbf{s}, \mathbf{s}^0). \quad (1)$$

Vektor  $\mathbf{s}$  predstavuje smerový vektor osi skrutki. Stúpanie skrutki (pitch):

$$h = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^0}{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}} \quad (2)$$

je číselná charakteristika skrutki. Operácia „ $\cdot$ “ predstavuje skalárny súčin vektorov.

Ak  $h = 0$ , duálny vektor  $\mathbf{s}^0$  predstavuje moment priamky ku začiatku súradnicovej sústavy a je definovaný ako vektorový súčin smerového vektora  $\mathbf{s}$  priamky a polohového vektora  $\mathbf{r}$  ľubovoľného bodu priamky:

$$\mathbf{s}^0 = \mathbf{r} \times \mathbf{s}. \quad (3)$$

Primárna a duálna časť takejto skrutki spĺňajú podmienku ortogonalitu:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^0 = 0. \quad (4)$$

Ak je stúpanie skrutki  $h = \infty$ , potom  $\$ = (\mathbf{0}, \mathbf{s})$  za podmienky, že  $\mathbf{s} \neq \mathbf{0}$  [2].

Vzhľadom k tomu, že skrutki predstavujú duálne vektory, operácie sčítania a násobenia číslom sú pre nich definované rovnako ako pre vektory (usporiadané  $n$ -tice čísel). Rovnako sa tiež chápe lineárna (ne)závislosť skrutiiek, preto sa pri vyšetrovaní lineárnej (ne)závislosti skrutiiek postupuje rovnako ako pri riešení obdobnej úlohy pre vektory.

Pre určenie pohyblivosti mechanizmu pomocou skrutiiek sa využíva recipročný súčin skrutiiek. Nech  $\$1 = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1^0)$ ,  $\$2 = (\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_2^0)$  sú ľubovoľné skrutki. Potom sa operácia „ $\circ$ “, definovaná ako:

$$\$1 \circ \$2 = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1^0) \circ (\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_2^0) = \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2^0 + \mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{s}_1^0, \quad (5)$$

nazýva recipročný súčin skrutiiek. [2] Maticový tvar recipročného súčinu je:

$$\$1 \circ \$2 = \$1 \Delta \$2^T, \quad (6)$$

kde  $\Delta$  je štvorcová matica rozmeru  $6 \times 6$  v tvare:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Matica  $\mathbf{I}$  je jednotková matica a  $\mathbf{0}$  je nulová matica, obe rozmeru  $3 \times 3$ . Výsledkom recipročného súčinu dvoch skrutiiek je skalár.

Dve skrutki  $\$1 = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1^0)$ ,  $\$2 = (\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_2^0)$  sa nazývajú recipročné, ak platí:

$$\$1 \circ \$2 = 0. \quad (8)$$

Uvažuje sa skrutka  $\$ = (l, m, n | p, q, r)$ . Súradnice primárnej a duálnej časti recipročnej skrutki  $\$^r = (\bar{l}, \bar{m}, \bar{n} | \bar{p}, \bar{q}, \bar{r})$  sa vypočítajú zo vzťahu:

$$p \cdot \bar{l} + q \cdot \bar{m} + r \cdot \bar{n} + l \cdot \bar{p} + m \cdot \bar{q} + n \cdot \bar{r} = 0. \quad (9)$$

Ak skrutka  $\$$  určuje voľný pohyb telesa, potom recipročná skrutka  $\$^r$  reprezentuje väzbu (silu alebo moment) vzhľadom na odobratý stupeň voľnosti. Naopak, ak  $\$$  predstavuje väzbu, potom  $\$^r$  reprezentuje pohyb, ktorý telesu väzba umožňuje. [2] Uvažuje sa tuhé teleso, ktoré je spojené geometrickou väzbou s mechanizmom, pričom táto väzba telesu odoberá  $j$  stupňov voľnosti,  $j < 6$ . Množina všetkých lineárne nezávislých skrutiiek popisujúcich pohyby, ktoré daná väzba telesu umožňuje, sa volá pohybový systém telesa  $S_m$ . Množina všetkých lineárne nezávislých skrutiiek, ktoré sú súčasne recipročné ku všetkým skrutkám pohybového systému  $S_m$ , sa nazýva recipročný silový systém  $S^R$  [3]. Platí, že súčet voľných pohybov a väzieb je vždy šesť, preto:

$$\dim(S_m) + \dim(S^R) = 6. \quad (10)$$

### 1.1 Rotačná väzba

Nech sú dva členy mechanizmu spojené rotačnou väzbou. Rotačná väzba odoberá jeden stupeň voľnosti, preto jej zodpovedá jedna skrutka pohybového systému a päť skrutiiek väzbového systému. Nech je pravouhlá súradnicová sústava definovaná tak, že os  $x$  zodpovedá osi kĺbu a začiatok súradnej sústavy leží na osi rotácie. Potom pohybová skrutka vyjadrujúca voľný pohyb je daná:

$$\$ = (1, 0, 0 | 0, 0, 0). \quad (11)$$

Väzby dané ako recipročné silové skrutki tvoria recipročný systém obsahujúci päť skrutiiek v tvare:

$$\begin{aligned}
\mathcal{S}_1^r &= (1, 0, 0 | 0, 0, 0), \\
\mathcal{S}_2^r &= (0, 1, 0 | 0, 0, 0), \\
\mathcal{S}_3^r &= (0, 0, 1 | 0, 0, 0), \\
\mathcal{S}_4^r &= (0, 0, 0 | 0, 1, 0), \\
\mathcal{S}_5^r &= (1, 0, 0 | 0, 0, 1).
\end{aligned} \tag{12}$$

Vo všeobecnosti sa určí skrutka rotačnej väzby tak, že primárna časť  $\mathbf{s}$  predstavuje smerový vektor osi rotácie. Duálny vektor  $\mathbf{s}^0$  sa nájde ako vektorový súčin smerového vektora  $\mathbf{s}$  priamky a polohového vektora  $\mathbf{r}$  ľubovoľného bodu osi rotácie:

$$\mathbf{s}^0 = \mathbf{r} \times \mathbf{s}. \tag{13}$$

## 1.2 Posuvná väzba

Nech sú dva členy mechanizmu spojené posuvnou väzbou. Pravouhlá súradnicová sústava sa definuje tak, že smer posunu je definovaný v smere osi  $x$ .

Potom pohybová skrutka vyjadrujúca voľný pohyb je:

$$\mathcal{S} = (0, 0, 0 | 1, 0, 0) \tag{14}$$

a väzby dané ako recipročné silové skrutky sú v tvare:

$$\begin{aligned}
\mathcal{S}_1^r &= (0, 1, 0 | 0, 0, 0), \\
\mathcal{S}_2^r &= (0, 0, 1 | 0, 0, 0), \\
\mathcal{S}_3^r &= (0, 0, 0 | 1, 0, 0), \\
\mathcal{S}_4^r &= (0, 0, 0 | 0, 1, 0), \\
\mathcal{S}_5^r &= (1, 0, 0 | 0, 0, 1).
\end{aligned} \tag{15}$$

Vo všeobecnosti posuvnej väzbe zodpovedá skrutka  $\mathcal{S} = (\mathbf{0}, \mathbf{s})$ , ktorej duálna časť je vyjadrená smerovým vektorom posunutia  $\mathbf{s}$ .

## 2 POHYBLIVOSŤ MECHANIZMU

Uvažuje sa sériový kinematický reťazec tvorený  $h$  kinematickými dvojicami. Ako uvádzajú Amine et al. [4], pohybový systém sériového kinematického reťazca je daný ako zjednotenie pohybových skrutiek kinematických dvojíc:

$$S_m = \cup_{i=1}^h \mathcal{S}_i, \tag{16}$$

väzbový silový systém je naopak daný ako prienik väzbových skrutiek  $\mathcal{S}_i^r$ :

$$S^R = \cap_{i=1}^h \mathcal{S}_i^r. \tag{17}$$

Pohybový systém paralelného kinematického reťazca, ktorý je tvorený  $g$  sériovými vodiacimi reťazcami, je daný ako prienik pohybových systémov vodiacich reťazcov:

$$S_m = \cap_{i=1}^g S_{m_i}, \tag{18}$$

väzbový silový systém je daný ako zjednotenie väzbových systémov  $S_i^R$ :

$$S^R = \cup_{i=1}^h S_i^R. \tag{19}$$

Zjednotenie skrutiek sa určí len ako zjednotenie množiny prvkov s vylúčením lineárne závislých

skrutiek, prienik množiny skrutiek už je komplikovanejší. Preto sa pri určení pohyblivosti paralelného mechanizmu postupuje tak, že každej kinematickej dvojici v sériovom reťazci sa priradí pohybová skrutka. Určí sa pohybový systém sériového reťazca ako zjednotenie týchto kĺbových skrutiek (16). určí sa väzbový silový systém reťazca ako riešenie recipročnej úlohy k pohybovému systému (9). Postup sa zopakuje pre všetky sériové vodiace reťazce paralelného mechanizmu. Určí sa väzbový silový systém mechanizmu ako zjednotenie väzbových silových systémov jednotlivých reťazcov (19). Pohybový systém mechanizmu sa potom získa ako riešenie recipročnej úlohy (9) k väzbovému silovému systému mechanizmu.

## 3 ÚLOHA PRE RÝCHLOSTI

Nech otvorený kinematický reťazec tvorený členmi označenými  $j, j+1, j+2, \dots, m-2, m-1, m$ , ktoré sú navzájom spojené skrutkovými väzbami, kde  ${}^k\mathcal{S}^{k+1}$  vyjadruje skrutkovú väzbu medzi členmi  $k$  a  $k+1$ . Potom sa rýchlosť člena  $m$  vzhľadom na člen  $j$  vypočíta ako:

$$\begin{aligned}
{}^j\mathbf{V}^m &= \omega_{j,j+1} {}^j\mathcal{S}^{j+1} + \omega_{j+1,j+2} {}^{j+1}\mathcal{S}^{j+2} + \dots + \\
&+ \omega_{m-1,m} {}^{m-1}\mathcal{S}^m.
\end{aligned} \tag{20}$$

Pri stotožnení  $j$ -tého člena s bázou sériového robota a  $m$ -tý člen s jeho koncovým efektorom, sa získa rovnica pre výpočet relatívnej rýchlosti koncového efektora v skrutkovom tvare [5]. Zároveň sa získalo riešenie priamej úlohy pre rýchlosti v sériovom mechanizme. Výsledná rýchlosť koncového efektora sa potom určí na základe jednej polohy robota (vektorov osí rotačných väzieb a smerov posunutia translačných väzieb) a znalosti relatívnych rýchlostí jeho členov [6]. Po zápise rovnice (20) v maticovom tvare:

$$({}^0\mathbf{V}^n)^T = \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\Omega}, \tag{21}$$

kde:

$$\mathbf{J} = (({}^0\mathcal{S}^1)^T \quad ({}^1\mathcal{S}^2)^T \quad \dots \quad ({}^{n-1}\mathcal{S}^n)^T) \tag{22}$$

je *Jacobiho matica* (jakobián) a

$$\boldsymbol{\Omega} = (\omega_{0,1} \quad \omega_{1,2} \quad \omega_{2,3} \quad \dots \quad \omega_{n-1,n})^T \tag{23}$$

je vektor relatívnych rýchlostí, dá sa nájsť aj riešenie inverznej úlohy pre rýchlosti. Rovnica (21) sa vynásobí zľava inverznou maticou  $\mathbf{J}^{-1}$ , čím sa získa vyjadrenie vektora relatívnych rýchlostí (23) v tvare:

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{J}^{-1} ({}^0\mathbf{V}^n)^T. \tag{24}$$

V prípade paralelného mechanizmu musí platiť, že relatívna rýchlosť pohyblivej platformy, ktorá teraz reprezentuje koncový efektor, musí byť rovnaká, nech sa spočíta podľa (21) cez ktorýkoľvek jej vodiaci reťazec. Problematickým sa ale ukazuje skutočnosť, že nie všetky kinematické dvojice v paralelnom

mechanizme sú riadené. Pasívne kinematické dvojice v rovnici (21) sa eliminujú tak, že sa rovnica vynásobí skrutkou súčasne recipročnou k všetkým skrutkám pasívnych dvojíc. Tento postup sa zopakuje pre všetky vodiace reťazce, čím sa dostane sústava rovníc, ktorej maticový tvar je:

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{V}^p = \mathbf{B}\Omega_a, \quad (25)$$

kde:

$$\mathbf{A} = [\$1^R \ \$2^R \ \$3^R \ \$4^R \ \$5^R \ \$6^R] \quad (26)$$

je matica recipročných skrutiek ku skrutkám pasívnych kĺbov v jednotlivých vodiacich reťazcoch,  $\Delta$  je operátor polarity definovaný v (7):

$$\mathbf{B} = \text{diag}[\$1^R \circ \$a_1, \$2^R \circ \$a_2, \$3^R \circ \$a_3, \$4^R \circ \$a_4, \$5^R \circ \$a_5, \$6^R \circ \$a_6] \quad (27)$$

je diagonálna matica koeficientov a

$$\Omega_a = [\omega_{a_1}, \omega_{a_2}, \omega_{a_3}, \omega_{a_4}, \omega_{a_5}, \omega_{a_6}]^T \quad (28)$$

je vektor relatívnych rýchlostí aktívnych kinematických dvojíc jednotlivých vodiacich reťazcov (vyjadrenia (26), (27), (28) sú zapísané pre paralelný mechanizmus so 6 aktuátormi) [5]. Ak má matica  $\mathbf{A}\Delta$  inverznú maticu, po vynásobení rovnice (25) inverznou maticou  $(\mathbf{A}\Delta)^{-1}$  vyjde riešenie priamej úlohy pre rýchlosti. Ak existuje inverzná matica k matici  $\mathbf{B}$ , po vynásobení rovnice (25) maticou  $\mathbf{B}^{-1}$  sa získa riešenie inverznej úlohy pre rýchlosti.

Mechanizmus sa nachádza v singulárnej polohe, ak koncový efektor stráca jeden alebo viac stupňov voľnosti [7]. Singulárna poloha mechanizmu v matematickom vyjadrení predstavuje neexistenciu inverznej matice. Pre paralelné mechanizmy sa určujú singulárne polohy z rovnice (25). Rozlišujú sa tri typy singularít:

- singularity 1. druhu - matica  $\mathbf{B}$  je singulárna,
- singularity 2. druhu - matica  $\mathbf{A}\Delta$  je singulárna,
- singularity 3. druhu - obe matice  $\mathbf{A}\Delta$  a  $\mathbf{B}$  sú singulárne [8].

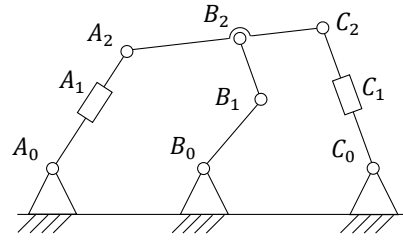
#### 4 KINEMATICKÁ ANALÝZA PARALELNÉHO MECHANIZMU

Uvažuje sa rovinný paralelný mechanizmus, kde pohyblivá platforma je ku báze pripojená tromi vodiacimi reťazcami (obr. 1). Ako vidieť, vodiace reťazce nemajú rovnakú štruktúru - dva sú typu RTR, prostredný reťazec je typu RRR.

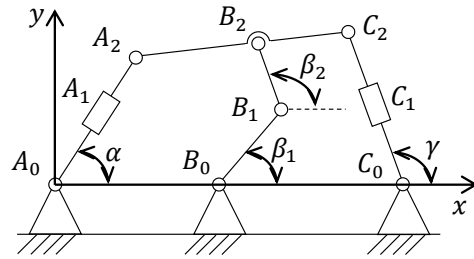
Najsôr sa určí pohyblivosť mobilnej platformy. Umiestnenie súradnicovej sústavy je na obr. 2.

Os z je kolmá na rovinu xy, orientovaná v zmysle pravidla pravej ruky. Dĺžky jednotlivých členov sú  $|A_0A_1| = L_1$   $|A_1A_2| = L_2$   $|A_0B_0| = H_0$   $|B_0B_1| = L_3$   $|B_1B_2| = L_4$   $|B_0C_0| = H_1$   $|C_0C_1| = L_5$   $|C_1C_2| = L_6$

Uhly, ktoré zvierajú jednotlivé vodiace reťazce, sú vyznačené na obr. 2.



Obr. 1. Rovinný paralelný mechanizmus



Obr. 2. Súradnicová sústava pre rovinný mechanizmus

Pohyblivosť mobilnej platformy  $A_2B_2C_2$  sa určí ako prienik pohyblivosti vodiacich reťazcov (18), respektíve ako zjednotenie väzbových systémov (19). Jednotlivým väzbám sa priradia pohybové skrutky podľa typu väzby.

Reťazec  $A_0A_1A_2$ :

$$\begin{aligned} \$_{A_0} &= (0,0,1|0,0,0), \\ \$_{A_1} &= (0,0,0|L_1 \cos \alpha, L_1 \sin \alpha, 0), \\ \$_{A_2} &= (0,0,1|(L_1 + L_2) \sin \alpha, -(L_1 + L_2) \cos \alpha, 0). \end{aligned} \quad (29)$$

Reťazec  $B_0B_1B_2$ :

$$\begin{aligned} \$_{B_0} &= (0,0,1|0, -H_0, 0), \\ \$_{B_1} &= (0,0,1|L_3 \sin \beta_1, -(H_0 + L_3 \cos \beta_1), 0), \\ \$_{B_2} &= \left(0,0,1 \left| \begin{array}{l} L_3 \sin \beta_1 + L_4 \sin \beta_2, \\ -(H_0 + L_3 \cos \beta_1 + L_4 \cos \beta_2), 0 \end{array} \right. \right). \end{aligned} \quad (30)$$

Reťazec  $C_0C_1C_2$ :

$$\begin{aligned} \$_{C_0} &= (0,0,1|0, -(H_0 + H_1), 0), \\ \$_{C_1} &= (0,0,0|L_5 \cos \gamma, L_5 \sin \gamma, 0), \\ \$_{C_2} &= \left(0,0,1 \left| \begin{array}{l} (L_5 + L_6) \sin \beta, \\ -(H_0 + H_1 + (L_5 + L_6) \cos \gamma), 0 \end{array} \right. \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Použitím rovnice (9) sa nájdu recipročné skrutky ku skrutkám jednotlivých vodiacich reťazcov. V reťazcoch  $A_0A_1A_2$  a  $C_0C_1C_2$  je riešením parametrická skrutka v tvare:

$$\$^r = (0,0, u|v, w, 0), \quad u, v, w \in R. \quad (32)$$

Po rozdelení riešenia (32) na súčet skrutiek pre jednotlivé parametre bude väzbový systém vodiacich reťazcov:

$$\begin{aligned} \$_1 &= (0,0,1|0,0,0), \\ \$_2 &= (0,0,0|1,0,0), \\ \$_3 &= (0,0,0|0,1,0). \end{aligned} \quad (33)$$

V prípade reťazca  $B_0B_1B_2$  však nastávajú dve možnosti v závislosti od toho, či:

$$\sin(\beta_1 - \beta_2) \quad (34)$$

má nulovú alebo nenulovú hodnotu. Pokiaľ platí, že  $\beta_1 \neq \beta_2$ , výraz (34) nadobúda nenulovú hodnotu. Recipročná skrutka k reťazcu  $B_0B_1B_2$  ako parametrická skrutka je v tvare (32) a teda väzbový systém je tiež v tvare (33).

Tento väzbový silový systém (33) je rovnaký pre všetky tri vodiace reťazce, preto väzbový silový systém mechanizmu, ktorý je zjednotením týchto väzbových silových systémov, je tiež v tvare (33). Pohybový systém mechanizmu sa nájde opäť vyriešením rovnice (9) ako množinu recipročných skrutiek k väzbovému silovému systému (33). Pohybový systém mechanizmu obsahuje tri skrutky:

$$\begin{aligned} \$1^m &= (0,0,1|0,0,0), \\ \$2^m &= (0,0,0|1,0,0), \\ \$3^m &= (0,0,0|0,1,0), \end{aligned} \quad (35)$$

mechanizmus má teda tri stupne voľnosti. Skrutka  $\$1^m$  určuje rotáciu okolo osi  $z$ , skrutka  $\$2^m$  určuje posuv v smere osi  $x$  a skrutka  $\$3^m$  určuje posuv v smere osi  $y$ .

Výraz (34) nadobúda nulovú hodnotu, ak  $\beta_1 = \beta_2$ , t.j. keď je rameno vystreté. V takom prípade je riešením parametrická skrutka:

$$\$^r = (t \cdot \cotg \beta_1, t, u|v, w, H_0 \cdot t), \quad t, u, v, w \in R,$$

ktorú sa môže rozdeliť na štyri recipročné skrutky:

$$\begin{aligned} \$1 &= (0,0,1|0,0,0), \\ \$2 &= (0,0,0|1,0,0), \\ \$3 &= (0,0,0|0,1,0). \end{aligned} \quad (36)$$

Zjednoteniu väzbových systémov reťazcov (33) a (36) zodpovedá práve systém (36), ktorý predstavuje väzbový systém mechanizmu. Nájdením recipročných skrutiek k (36) sa získa pohybový systém mechanizmu:

$$\begin{aligned} \$1^m &= (0,0,1|H_0 \cdot \cotg \beta_1, 0,0), \\ \$2^m &= (0,0,0|-\cotg \beta_1, 1,0). \end{aligned} \quad (37)$$

Keďže pohybový systém mechanizmu obsahuje len dve skrutky, pri  $\beta_1 = \beta_2$  stráca mechanizmus jeden stupeň voľnosti.

Pri formulácii rovnice rýchlostí je potrebné sa zaoberať len v prípade, kedy má mechanizmus tri stupne voľnosti.

#### 4.1 Úloha pre rýchlosti

Na základe (35) bude pohybovému stavu mobilnej platformy zodpovedať pohybová skrutka:

$$\$_m = (0, 0, \omega_z | v_x, v_y, 0). \quad (38)$$

Rovnice pre rýchlosti vodiacich reťazcov (20) sú potom v tvare:

$$\begin{aligned} (0, 0, \omega_z | v_x, v_y, 0) &= \omega_{A_0} \$_{A_0} + v_{A_1} \$_{A_1} + \omega_{A_2} \$_{A_2}, \\ (0, 0, \omega_z | v_x, v_y, 0) &= \omega_{B_0} \$_{B_0} + \omega_{B_1} \$_{B_1} + \omega_{B_2} \$_{B_2}, \\ (0, 0, \omega_z | v_x, v_y, 0) &= \omega_{C_0} \$_{C_0} + v_{C_1} \$_{C_1} + \omega_{C_2} \$_{C_2}. \end{aligned} \quad (39)$$

Tri stupne voľnosti znamenajú, že v mechanizme sú tri riadené kinematické dvojice. Naformulujú sa rovnice rýchlostí a vyšetria sa singularita pre niektoré kombinácie umiestnenia aktuátorov vo vodiacich reťazcoch. Predpoklad je, že v každom reťazci je riadená jedna kinematická dvojica.

Vyšetří sa kombinácia umiestnenia aktuátorov:

- $A_0, B_0, C_0$ ;
- $A_1, B_1, C_1$ .

Na nájdenie rovnice rýchlostí vo vstupno- výstupnom tvare (25) sa musia vynásobiť jednotlivé rovnice v (39) postupne skrutkami recipročnými ku pasívnym (neriadeným) väzbám. Zároveň tieto skrutky nesmú byť recipročné ku skrutkám riadených väzieb. Recipročné skrutky sú zosumarizované v tab. 1.

Tab. 1. Skrutky recipročné ku pasívnym väzbám v reťazcoch

Aktívna väzba	Recipročné skrutky
$A_0$	$(-\sin \alpha, \cos \alpha, 0   0,0, L_1 + L_2)$
$A_1$	$(\cos \alpha, \sin \alpha, 0   0,0,0)$
$B_0$	$(\cos \beta_2, \sin \beta_2, 0   0,0, H_0 \sin \beta_2 - L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2))$
$B_1$	$(L_3 \cos \beta_1 + L_4 \cos \beta_2, L_3 \sin \beta_1 + L_4 \sin \beta_2, 0   0,0, H_0(L_3 \sin \beta_1 + L_4 \sin \beta_2))$
$C_0$	$(\sin \gamma, -\cos \gamma, 0   0,0, -(H_0 + H_1) \cos \gamma - (L_5 + L_6))$
$C_1$	$(\cos \gamma, \sin \gamma, 0   0,0, (H_0 + H_1) \sin \gamma)$

Po vynásobení rovníc (39) recipročnými skrutkami pre aktívne väzby  $A_0, B_0, C_0$  bude rovnica (25) v tvare:

$$\begin{pmatrix} L_1 + L_2 & -\sin \alpha & \cos \alpha \\ H_0 \sin \beta_2 - L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2) & \cos \beta_2 & \sin \beta_2 \\ (H_0 + H_1) \cos \gamma + L_5 + L_6 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_z \\ v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 + L_2 & 0 & 0 \\ 0 & -L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2) & 0 \\ 0 & 0 & L_5 + L_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{A_0} \\ \omega_{B_0} \\ \omega_{C_0} \end{pmatrix}. \quad (40)$$

Z rovnice (57) vynásobením inverznou maticou k matici koeficientov na ľavej strane vyjde rýchlosť mobilnej platformy pre danú konfiguráciu a okamžité rýchlosti riadených členov. Po vynásobení rovnice (40) inverznou maticou k matici koeficientov na pravej strane sa získa riešenie inverznej úlohy pre rýchlosti, t.j. rýchlosti riadených kinematických dvojíc, ak je známa okamžitá rýchlosť mobilnej platformy pri danej konfigurácii.

Z rovnice (40) sa dajú určiť taktiež singulárne polohy mechanizmu. Mechanizmus má singularitu 1. druhu, ak:

$$\begin{vmatrix} L_1 + L_2 & 0 & 0 \\ 0 & -L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2) & 0 \\ 0 & 0 & L_5 + L_6 \end{vmatrix} = 0. \quad (41)$$

Keďže dĺžky  $L_1, L_3, L_5 \neq 0$ , mechanizmus môže byť v singulárnej polohe 1. druhu len, ak  $\beta_1 = \beta_2$ . Mechanizmus má singularitu 2. druhu, ak:

$$\begin{vmatrix} L_1 + L_2 & -\sin \alpha & \cos \alpha \\ H_0 \sin \beta_2 - L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2) & \cos \beta_2 & \sin \beta_2 \\ (H_0 + H_1) \cos \gamma + L_5 + L_6 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{vmatrix} = 0, \quad (42)$$

Respektíve:

$$(L_1 + L_2) \cos(\beta_2 - \gamma) + H_0 \sin \beta_2 \sin(\alpha - \gamma) - L_3 \sin(\beta_1 - \beta_2) \sin(\alpha + \gamma) - (H_0 + H_1) \cos \gamma \cos(\alpha + \beta_2) - (L_5 + L_6) \cos(\alpha + \beta_2) = 0. \quad (43)$$

Dosiahnutie singularity 2. druhu by vyžadovalo také natočenie vodiacich reťazcov, pri ktorom by rovnica (43) bola splnená. Po vynásobení rovníc (39) recipročnými skrútkami pre aktívne väzby  $A_1, B_1, C_1$  bude mať rovnica (25) tvar:

$$\begin{pmatrix} 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ H_0 B_y & B_x & B_y \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_z \\ v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_3 L_4 \sin(\beta_1 - \beta_2) & 0 \\ 0 & 0 & L_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{A_1} \\ \omega_{B_1} \\ v_{C_1} \end{pmatrix}, \quad (44)$$

kde sa označilo pre jednoduchosť:

$$\begin{aligned} L_3 \cos \beta_1 + L_4 \cos \beta_2 &= B_x, \\ L_3 \sin \beta_1 + L_4 \sin \beta_2 &= B_y. \end{aligned}$$

Mechanizmus má singularitu 1. druhu, ak:

$$\begin{vmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_3 L_4 \sin(\beta_1 - \beta_2) & 0 \\ 0 & 0 & L_5 \end{vmatrix} = 0. \quad (45)$$

Keďže dĺžky  $L_1, L_3, L_4, L_5 \neq 0$ , mechanizmus môže byť v singulárnej polohe 1. druhu len, ak  $\beta_1 = \beta_2$ . Mechanizmus má singularitu 2. druhu, ak

$$\begin{vmatrix} 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ H_0 B_y & B_x & B_y \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \end{vmatrix} = 0, \quad (46)$$

respektíve

$$H_0 B_y (\sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma) = 0. \quad (47)$$

Singularity 2. druhu môžu nastať v dvoch prípadoch: buď je priemet reťazca  $B_0 B_1 B_2$  do smeru osi  $y$  nulový, t.j.  $\beta_1 = \beta_2 = 0$  alebo  $\beta_1 = \beta_2 = \pi$ , alebo  $\alpha = \gamma$  a teda reťazce  $A_0 A_1 A_2$  a  $C_0 C_1 C_2$  sú rovnobežné.

## ZÁVER

V príspevku boli aplikované princípy *Screw theory* pri riešení kinematickej analýzy rovinného paralelného mechanizmu s tromi vodiacimi

reťazcami. Dva z reťazcov boli typu *RTR*, prostredný reťazec typu *RRR*. Určil sa počet stupňov voľnosti mechanizmu a zodpovedajúce pohyby mobilnej platformy. V závislosti od umiestnenia aktuátorov sa našiel vstupno-výstupný tvar rovnice pre rýchlosti a podmienky, za akých dosiahne mechanizmus singulárnu polohu.

## Pod'akovanie

*Táto práca bola vytvorená v rámci projektu KEGA 025ŽU-4/2024 Implementácia nových didaktických prostriedkov pre zvýšenie kvality výučby matematiky v inžinierskom stupni štúdia na technických VŠ.*

## LITERATÚRA

- [1] HARIB, K. H. et al. (2012): *Parallel, Serial and Hybrid Machine Tools and Robotics Structures: Comparative Study on Optimum Kinematic Designs, Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, Serdar Kucuk (Eds.), pp.109-124.
- [2] HUANG, Z. - LI, Q. - DING, H. (2013): *Theory of Parallel Mechanisms*. Dordrecht, Springer, 421 s. ISBN 978-94-007-4201-7.
- [3] ZHAO, J. et al. (2014): *Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robot Mechanisms*. Oxford, Academic Press, 496 s. ISBN 978-0-12-420223-8.
- [4] AMINE, S. et al. (2011): *Constraint and Singularity Analysis of Lower-Mobility Parallel Manipulators with Parallelogram Joints*. In: Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010. 34th Annual Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. Montreal, Quebec, 2, pp. 1317-1326.
- [5] GALLARDO-ALVARADO, J. (2016): *Kinematic Analysis of Parallel Manipulators by Algebraic Screw Theory*. Dordrecht, Springer, 377 s. ISBN 978-3-319-31124-1.
- [6] KARGER, A. - KARGEROVÁ, M. (2000): *Základy robotiky a prostorové kinematiky*. Praha, ČVUT, 265 s. ISBN 80-01-02183-1.
- [7] JAZAR, R. N. 2010. *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. 2. vydanie. New York, Springer, 888 s. ISBN 978-1-4419-1749-2.
- [8] ZLATANOV, D. - FENTON, R. G. - BENHABIB, B. (1994): *Singularity analysis of mechanisms and robots via a velocity-equation model of the instantaneous kinematics*. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2. s. 980-985.

---

# Analysis of the effective use of work tools

---

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.\*

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

## Branislav Mičieta, prof., Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.micieta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2701

## Martin Buzalka, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.buzalka@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2713

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

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

**Abstract:** This article deals with the analysis of the effective use of work tools in different work environments. The aim of the study is to identify the key factors influencing the use of tools and to propose recommendations for optimizing their use to increase productivity and safety. The analysis is based on worker experiences, observations and quantitative data, which reveal the importance of proper selection, maintenance and training in the use of work tools. The results indicate that the effective use of tools has a significant impact on work performance, reducing risks.

**Keywords:** work tools, *Ishikawa* diagram, industrial engineering.

---

## INTRODUCTION

The effective use of work aids plays an increasingly important role in the efforts of industrial companies to achieve higher productivity, reduce production costs and improve the quality of outputs. In the competitive environment of today's industry, where every minute of production time and every downtime can represent a significant financial loss, the optimization of each component of the production system is becoming a necessity. Work aids, such as tools, fixtures and equipment, represent key technical means that enable the efficient execution of individual production operations. Their technical condition, method of use, but also the method of their maintenance and recording directly affect the smoothness and reliability of the production process. Production aids can be characterized as specific tools that contribute to the accurate and rapid execution of production operations. Their role is to reduce the risk of errors, shorten production times and ensure consistent

product quality. Despite this, in many companies, less attention is paid to their improvement compared to the production lines or automated systems themselves. This often leads to inefficient use of work tools, unnecessary downtime, increased failure rates and costs that could be eliminated with a systematic approach. Neglecting to care for these tools can cause wear and tear on important components, unplanned downtime, premature wear of tool parts or a decrease in the quality of the resulting product. In addition, inefficient spare parts records, the absence of standardized control procedures or the absence of training for employees who handle the tools can also be a problem. All of these factors can significantly affect the operation of the production process, economic efficiency and quality parameters of production [1].

Today, ever greater demands are being placed on production technology, particularly in terms of increasing the physical effort of workers, but also by

increasing the efficiency of all means of production and production processes. As a result of close cooperation between workers and technicians, new, more economical production methods are being introduced, based primarily on the knowledge and use of the latest science and technology in rapid metalworking, pressing, forging, die casting, welding, heat treatment of metals, and so on. The main prerequisite for increasing productivity in industrial production is knowledge of modern methods and means. The most important factor in increasing production is production equipment and tools [2]. The workplace for the preparation of production aids is based on the essential requirement of ensuring a continuous supply of the necessary range of production aids to the individual production modules, in accordance with the production plan.

## 1 PRODUCTION TOOLS PREPARATION WORKPLACE

The tool set warehouse is an important initial part of the preparation of production tools. This warehouse stores all clamping, positioning and extension elements, cutting tools that are used to fulfill production plans soon. The warehouse ensures the continuous supply of *automated production systems (AVS)* with the necessary tools. Rack systems are used to store all types of tools. For each type of tool, the storage areas are adapted with special pallets or positioning cases [6].

The assembly and adjustment workplace of tool units is connected to inter-operational transport. The processes of this workplace are the overall assembly, adjustment and identification of *tool units (TU)*. This workplace contains a table for assembling and adjusting the tool unit, fixtures for rough alignment of the *TU*, an adjustment device for defining the position of the cutting edges of the tool relative to the clamping surface (*X, Y, Z* axis), a device for checking and marking code labels and the *TU* database.

*Tool units* are special tool holders that differ in the clamping method. The basic need is to identify the clamping on different machines, whether it meets automatic tool handling or tool recognition in a production system [7].

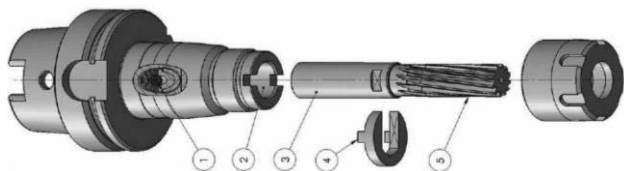


Fig. 1. Diagram of the composition of the tool unit with a tapered shank [7]

The tool input and output workstation marks the boundary between automated handling in a production system and process handling in the preparation of production aids. The transport and

relocation of tools or complete tool units is usually carried out by a transport device. The transport device is equipped with the same positioning elements as the storage rack for stable transport of the tools against damage. The clamping part of the tool must be protected by a protective sleeve during handling.

Cleaning the tool unit is the main operation before dismantling the tool unit. An ultrasonic washer is the most commonly used method of cleaning the tool unit. It removes impurities after the technological process of tool preparation, mainly from the cutting and clamping part of the tool unit. The workplace consists of a demagnetization line and an ultrasonic cleaner, where the *TU* are cleaned in *trichlor vapors (a biologically cleaner medium)* [3].

The disassembly workplace of the tool unit requires a certain allocated space at the workplace for carrying out this activity. Disassembly is partial only when replacing the cutting edges or complete when the *TU* is not needed in the next process. The accessories are located here as well as in the assembly department. The disassembled *TU* parts are sent to the interoperation warehouse for the preparation of production tools. The technical control workplace includes the inspection process, which is carried out at the inspection workplace or at the assembly and adjustment workplace if it is equipped with all the necessary tools for inspection. The inspection process includes checking the adjustment of the code plate holder against the *TU*, the length of the *TU* clamping cone, the adjustment of the cutting edges, and the correctness of the code plate marking.

## 2 ORGANIZATION OF THE PROCESS AT THE WORKPLACE FOR THE PREPARATION OF PRODUCTION TOOLS

The primary condition for organizing the work process in the preparation of production tools is a stable supply of *AVS* production tools due to multi-shift operation. Ensuring the basic set of tools according to the operational production plan. Inspection of the provision of *TU*, the tools are compared with the inventory of the necessary tool plan for *AVS*, at the same time checking the *TU* code, after completion, the *TU* is taken to the *AVS* input workplace. Return of used *TU* to the preparation of production tools and distribution of tools either for disassembly (no longer used) or replacement of the cutting part and return to the production system. Part of the preparation of production tools includes technical control and quality of various processes of picking by preparation for production, whether it is control of a tool, measuring instrument or product, in which qualitative parameters are observed to achieve a certain quantity of manufactured pieces. Technical control of product parameters has 3 phases: input,

continuous and output, continuous is determined according to the importance of the given operation after a certain range of cycles. Control of measuring instruments is determined from the expiration of the measuring instrument or damage to the measuring instrument, where it is replaced. The tool is selected after a technical error or end of the tool's life, where it is checked for the next tool. Control is performed by the operator even in a fully automated production system [4].

The factors affecting the accuracy of the machined surface are shown in Fig. 2.

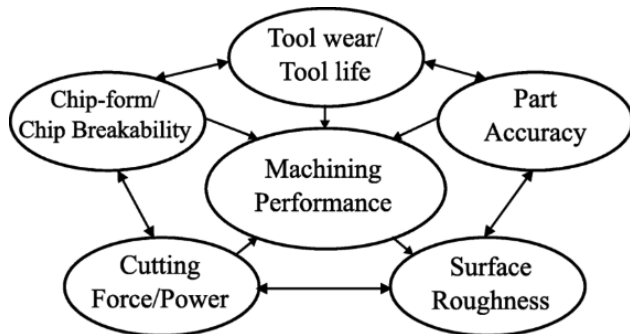


Fig. 2. Factors affecting the accuracy of the machined surface [3]

Product parameters are influenced by technological factors. The part after processing must have its shape and dimensions according to technological documentation (drawing, technological procedure), which affect the quality of the product. The measured values differ from the prescribed ones because the values prescribed by the technological documentation are not implemented in the daily value, but there are deviations that are within the norm or show confusion. Deviations are systematic consequences of recurring errors that arise from a certain source or cause in the production or control process. Random deviation affects the production system less than systematic deviations that occur irregularly and unpredictably. Deviations are given by factors affecting the quality of production, their analysis and design of the optimal control method, it is necessary to examine these factors. By improving processes and the most serious factors affecting production, we will eliminate incorrectly manufactured pieces of products and thus improve product production. Factors affecting the quality of production have technological processes that cannot be eliminated because the origin of the error is given by the technology, but it is possible to modernize or replace it with another. The creation of a control program serves for CNC machines and how these programs affect the quality and accuracy of the machined surface. The control program is a sequence of instructions that determine the movements of the machine tools, cutting speed, feeds, and other parameters necessary to produce parts according to the required geometry. Factors when creating a

control program that fall into consideration, such as the accuracy of the control program, machine settings and its calibration, dynamic properties, feed and cutting speed.

### 3 METHODOLOGY OF QUALITY CONTROL AND MANAGEMENT IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS

Control and quality in production processes are governed by factors affecting production accuracy and production quality. The analysis of factors affecting production quality shows that factors affecting production accuracy occur. Due to factors affecting production accuracy, technical controls are introduced in production systems. Technical quality control is essential for quality management in all automated production processes, which includes technical control of design preparation of production, technological preparation of production, accuracy of the manufactured machine, production of components, assembly and function of products.

Technical control in the design preparation of production is created by a suitable design solution of the component, which is important in achieving high accuracy and product quality in production systems. It includes the second part of the control - control of the metrologicality of the structure, which the given design of the components provides within the application of measurement principles. During this control, tolerance connections, shape deviations, surface arrangement and their quality are assessed, production accuracy levels should be determined with regard to the available measurement options, production accuracy levels are determined with regard to the available measurement options as well as justification of the prescribed levels of production accuracy, setting the accuracy of control and determining measuring instruments and devices for performing precise measurements, ensuring the required control of machines for a certain accuracy of work performance. Technical control in technological preparation of production is the pre-production part of the preparation of automated production and is based on the creation of control instructions for machine operators, which include all parameters and data on production accuracy (which dimensions to measure, how and with what to check, when to check these dimensions and how often). Instructions for the operation of technical control is a binding document for the operator of technical control, in which the quality and accuracy of production are maintained. This manual defines dimensions, tolerances, gauges, who checks it, where the check is carried out. Checking the created program for machining a part on all machines is the main point of control for production. The coded program of all technological

operations for all machines must be checked and fine-tuned before the first batch is manufactured. Technical control of the accuracy of production machines begins with its implementation at the machine manufacturer according to special standards and after installation in the user's production system. The correctness of the inspection is recorded in the acceptance protocol. The next part of the inspection is the verification of the stability of the production accuracy. The correctness of this inspection is determined by the *PCA (process Copability Analysis)* procedure. Technical inspection of the production of parts on automated machines is a quality inspection affecting the part and thus the production system. The quality factors for the part are the quality of the program, tools and their sharpening, tool units, the quality of semi-finished products and its technological process.

## CONCLUSIONS

Technical inspection of materials and semi-finished products is checked before entering the line before further processing of the material by visual inspection. Some semi-finished products are checked according to the need and accuracy of the semi-finished product on measuring machines. Technical inspection of the geometry of the tool blade and the accuracy of their alignment is clearly defined; the operator always checks the tool parameters and the position of the tool in the machine before the tool enters production. Sharpening and picking of tools is carried out in the tool room with the appropriate equipment for sharpening tools. Alignment of tools for automated production systems is determined by the accuracy of the devices and is always carried out outside the machine. Technical inspection of the alignment of technological pallets and clamping fixtures is a check of the clamping of the part for which technological pallets of various characters are used. These fixtures allow the production operator to clamp the workpiece outside the machine or directly in the machine. A specific fixture is made for each type of workpiece, which is mostly checked with templates or conventional types of gauges. Technical inspection of machined parts is carried out according to the inputs of factors into production. Inspection of the first piece, which is carried out according to the inspection instructions, is always carried out at the change of shift or a new type of manufactured part to check the parameters of the machined surfaces. After changing the tool, the first machined piece of the part is checked to check the setting of the tool and its axis. When the tool is broken in and replaced, additional factors that can affect the accuracy and quality of production are detected by checking the piece. Inspection by post-operational measurement on technological equipment or technological process is

the main point of workpiece quality, where all machined surfaces and their parameters are checked on prepared measuring instruments. Output inspection is a visual inspection of the product quality. The final inspection determines whether the product is compliant or not, if not, the product is withdrawn from the line and the extent of repair or disposal is determined. It eliminates the human factor of the previous inspection of components.

## Acknowledgement

*This work was supported by project contract No. VEGA 1/0633/24 and by project contract No. KEGA 011ŽU-4/2025.*

## REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, M. - FURMANNOVA, B. (2021): *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: *Transportation Research Procedia*, 55, 503-509.
- [2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: *InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZGAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: *Technologie, procesy i systemy produkcyjne*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. - FURMANNOVÁ, N. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: *Applied Sciences*, 12(5), pp. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: *Transcom 2021*. Virtual conference 26 May – 28 May, Slovakia. *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 142.
- [7] SERJE, D. - PACHECO, J. - DIEZ, E. (2020): *Micromilling research: Current trends and future prospects*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(7), 1889-1916.

---

# Study of local mechanical properties and deformation mechanisms of the soft zone of welded joints of high-strength steels

---

## Jakub Harvanec, Ing.\*

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

## Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

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

## Martin Frátrik, Ing., PhD.

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

**Abstract:** High-strength steels (*HSS*) are crucial in the production of lightweight structures. Their welding creates a distinct heterogeneous heat-affected zone (*HAZ*) in which a softened zone with locally lower mechanical properties forms. This critical zone acts as a weak point, concentrates strain, and can initiate failure, thereby compromising the structural integrity of the welded joint. Detailed understanding of the local behaviour of this zone is insufficiently investigated. Standard tests provide only basic data, which limits the reliability of simulations and the integrity assessment of steel structures. The article deals with the characterization of the local mechanical properties and deformation behaviour of the *HAZ* softened zone using the *DIC* (*Digital Image Correlation*) and nanoindentation techniques. The combined approach enables a comprehensive understanding of the mechanical properties of the *HAZ* subzones, crucial for assessing the reliability and integrity of welded structures.

**Keywords:** DIC analysis, nanoindentation, *HAZ*, soft zone, *HSLA* steel.

---

## INTRODUCTION

Fusion welding, a widely employed technique in the manufacturing of critical engineering components, introduces significant microstructural and mechanical inhomogeneity within the *heat-affected zone (HAZ)* of welded joints. This localized region, situated adjacent to the weld fusion zone, experiences complex thermal cycles that induce variations in grain size, phase transformations, and residual stresses. A thorough understanding of the local changes in mechanical properties within the *HAZ* is essential for ensuring the reliability and integrity of welded structures, as its properties often govern the joint's overall performance and failure resistance. The performance of welded joints is of particular concern in high-strength steels (*HSS*), which are increasingly used in critical applications such as pipelines, bridges, and vehicle construction due to their high strength-to-weight ratio and improved toughness. However, the welding process can significantly alter the mechanical

properties of the *HAZ* in these steels, leading to potential weaknesses and creating initiation sites for failure.

## 1 DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) ANALYSIS

*Digital Image Correlation (DIC)* is a non-contact optical technique that tracks the deformation of a material surface by comparing digital images of the surface before and after deformation. *DIC*'s ability to characterize local deformation and correlate it with microstructures makes it particularly suitable for analyzing welded joints with inhomogeneous microstructures. The heterogeneity of the *Heat-Affected Zone (HAZ)* in welded joints necessitates the use of techniques that can accurately measure local variations in mechanical properties. Traditional methods, such as tensile testing, provide average properties over a relatively large gauge length, failing to capture the localized variations within the *HAZ*

subzones. This limitation highlights the need for more refined techniques capable of characterizing the mechanical behavior at smaller length scales [1-8].

The fundamental principle of *DIC* analysis involves applying a random pattern of small spots (a speckle pattern) onto the sample's surface. This pattern is precisely monitored by a high-resolution camera during a tensile test. The first image, referred to as the reference image, is divided into small, overlapping subsets. The *DIC* algorithm then searches for the corresponding location of each subset in the subsequent deformed images. By tracking the movement of these subsets and comparing their new positions to their original ones, the *DIC* software calculates a displacement field [1-3].

There are two primary configurations of *DIC* analysis, each suitable for samples of different geometries. The first is *2D DIC*, which uses a single camera oriented perpendicular to the sample surface. This approach is suitable for planar samples, e.g., metal or plastic sheets. The second is *3D DIC*, which uses two cameras positioned to view the sample from different angles. This configuration is necessary for non-planar (e.g., curved) or complex-shaped samples. These two configurations are illustrated in Fig. 1.

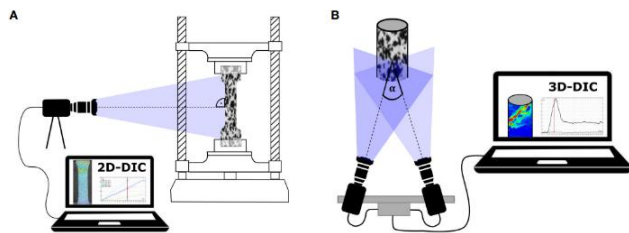


Fig. 1. Types of *DIC* analysis, a) *2D* analysis, b) *3D* analysis [13]

The usefulness of *DIC* for analysing welded joints is based on its capability to determine local strain fields, local strain rates, and to precisely localize the zone of plastic deformation onset. Furthermore, it is possible to track how the initiation and evolution of plastic deformation depend on the loading rate and the type of load applied to the sample.

Mohsen Amraei *et al.* [14] investigated the influence of heat input on the mechanical properties of butt-welded *high-strength steel* (HSS) and ultra-high-strength steel (UHSS) plates. Both *GMAW* and laser welding were employed. Figure 2 shows the stress distribution on an HSS weld sample at the point of failure, as measured by *3D DIC*. Failure of the weldment occurred in the *base material* (BM), characterized by the localization of shear bands at a 30° fracture angle.

*DIC* data can also validate numerical models of welded structures by comparing measured strain and displacement fields with model predictions, thereby assessing the accuracy of the models. The technique

is also suitable for high-temperature applications, allowing for the study of welded joint behavior under elevated temperature conditions, relevant in industries such as power generation and aerospace.

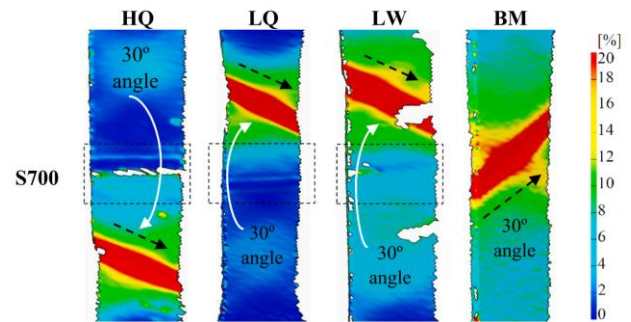


Fig. 2. *DIC* optical measurements showing distribution of strains across the specimens of weld joint of HSLA steel at the time of failure: HQ - *GMAW* with lower heat input, LQ - *GMAW* with higher heat input, LW - laser beam welding, BM - base material, dashed box - welded area [14]

## 2 NANOINDENTATION TECHNIQUE

In addition to *DIC*, nanoindentation is a technique used to evaluate localized mechanical properties at the micro- and nanoscale. Unlike traditional mechanical testing methods, which assess the bulk response of a material, nanoindentation allows for the determination of properties such as hardness and Young's modulus. This is achieved by pressing an indenter tip into the material under a controlled load while continuously measuring the resulting penetration depth. The process typically uses a diamond *Berkovich indenter*, and the displacement is precisely measured by a three-plate capacitive transducer. This technique is particularly valuable for characterizing inhomogeneous materials, thin films, and hard materials [9-12].

The basic nanoindentation process is divided into three stages:

- *approach and loading*,
- *hold*,
- *unloading*.

The process consists of three stages: loading, holding (or hold phase), and unloading (Fig. 3). During the loading stage, the indenter tip approaches the sample. Once the tip makes contact with the surface, a controlled load is applied until it reaches a predetermined maximum value. The hold phase then begins, during which the maximum load is maintained for a set period while the material may continue to deform (creep) and the displacement is measured. Finally, during the unloading stage, the load is gradually removed, and the tip is moved to the next measurement location.

The previously described load-hold-unload cycle is just one common testing procedure in nanoindentation. Other methods are also employed,

such as partial unloading, *XPM*, or roughness mapping. Each method has its specific applications.

The intended use of nanoindentation on welded joints is to determine the precise boundaries of each heat-affected zone (*HAZ*), identify its mechanical properties, and precisely localize the "soft zone". The "soft zone" in the welds of high-strength steel (*HSS*) is a region within the *HAZ* that experiences a reduction in hardness and strength compared to the base metal and the weld metal. This localized softening arises from the thermal cycle of the welding process, which induces microstructural changes in the *HAZ*.

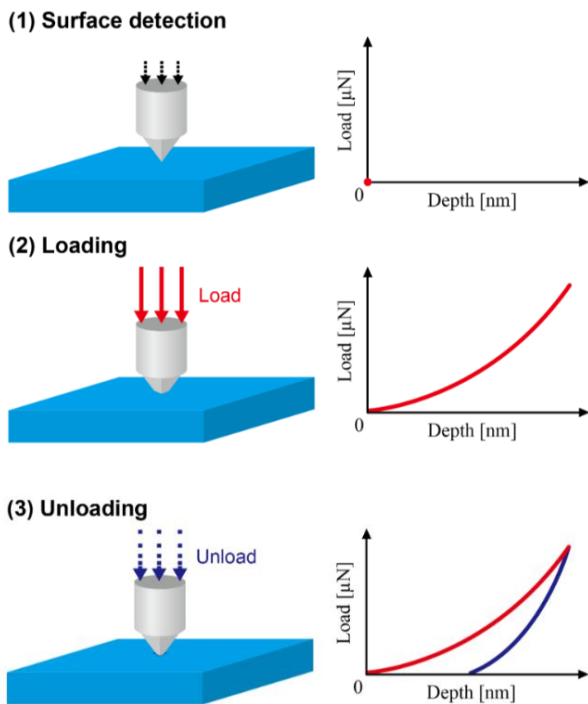


Fig. 3. Principle of nanoindentation testing [15]

The presence of a soft zone is significant, especially in the highest grades of *HSS* steels, because it can act as the weak link, reducing the overall strength of the welded joint, particularly under transverse loading. Failure is consequently more likely to initiate in this region. The width of the soft zone is influenced by welding parameters like heat input and cooling rate; higher heat input generally widens the soft zone and increases softening. The relative thickness of the soft zone compared to the base material is also a critical consideration. When the soft zone is sufficiently narrow, constraint effects from the surrounding stronger material can make it mechanically insignificant, causing the joint to behave as if the soft zone were not present.

GAO et al. [16] used nanoindentation methods to determine the *Young's modulus*, yield strength, and strain hardening exponent of individual zones in the welded joint. Nanoindentation test was performed at room temperature using the *iMicro nanoindenter* of

*KLA* company, which has a diamond *Berkovich indenter* with an elastic modulus of 1141 GPa and *Poisson's ratio* of 0.07. In all indentation tests, the fixed maximum load is 25 mN with a constant indentation strain rate of 0.2 /s, and the maximum depth is about 500 nm. Taking into account the inhomogeneity of the local mechanical properties in the welded joint, three sets of indentation tests (labelled Zone 1, Zone 2 and Zone 3) were carried out in the base metal, the heat-affected zone and the molten pool, respectively, each set of which consisted of 5×5 indenting points matrix (Fig. 4).

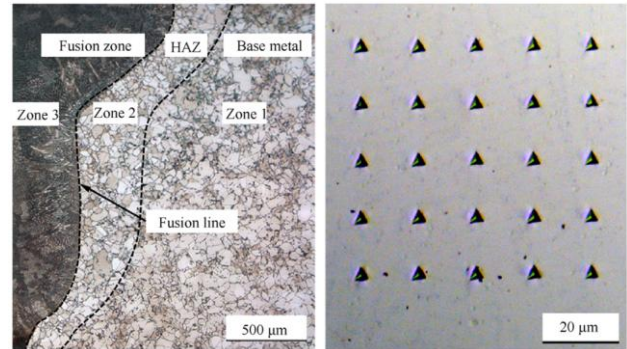


Fig. 4. Subdivided zones in a welded joint and expected indent positions on the sample surface (left), 5×5 indenting points matrix in the Zone 1 (right) [16]

The distribution of the average nanohardness value in individual weld zones is shown in Fig. 5. The lowest nanohardness value is achieved in the weld metal.

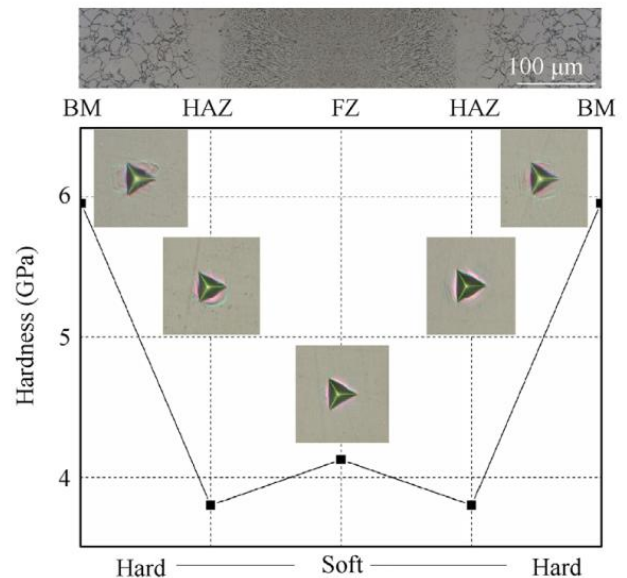


Fig. 5. Distribution of the average nanohardness value in individual weld zones [16]

## CONCLUSION

Combining *DIC* with nanoindentation provides valuable information about the behaviour of the sub-zones within the *HAZ*, especially the soft zone, which is crucial for the application of *HSS* steels. The sub-zones can be defined more precisely, and their

dependence on factors like heat input and cooling rates can be studied at the micro- and nanoscale. This understanding facilitates the optimization of welding cycles, aiming to produce welds with mechanical properties that match those of the base material.

The conclusions can be stated as follows:

- DIC can be used to determine local strain fields, local strain rates, and to precisely localize the zone of plastic deformation onset, providing key information about the mechanical properties of the sub-zones,
- DIC analysis makes it possible to track stress concentrations, identify the precise initiation point of plastic deformation, and monitor the entire deformation process,
- the use of nanoindentation on welded joints allows for the determination of precise boundaries of each heat-affected zone, the identification of its mechanical properties, and a more precise localization of the "soft zone".

## LITERATURE

- [1] YANG, R. Y. - ZENG, LI. D. - GUO P. (2021): *Deep DIC: Deep Learning-Based Digital Image Correlation for End-to-End Displacement and Strain Measurement*. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 32, pp. 117474.
- [2] WANG, S. - WANG, B. - MU, S. - ZHANG, J. - ZHANG, Y. - GONG, X. (2025): *Study on the Approach to Obtaining Mechanical Properties Using Digital Image Correlation Technology*. In: Materials, Vol. 18, No. 8, pp. 1875.
- [3] QUANJIN, M. - REJAB, M.R.M. - HALIM, Q. - MERZUKI, M.N.M. - DARUS, M.A.H. (2020): *Experimental Investigation of the Tensile Test Using Digital Image Correlation (DIC) Method*. In: Materials Today Proceedings, Vol. 27, pp. 757-763.
- [4] VALERI, G. - KOOHBOR, B. - KIDANE, A. - SUTTON, M. A. (2016): *Determining the Tensile Response of Materials at High Temperature Using DIC and the Virtual Fields Method*. In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 91, pp. 53-61.
- [5] OBID, Š. - STARMAN, B. - UREVC, J. - HALILOVIĆ, M. (2024): *Extraction of Uniaxial Stress–Strain Curve from Bending Test Using DIC Measurements*. In: Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 106, pp. 105346
- [6] NGUYEN, V.-T. - KWON, S.-J. - KWON, O.-H. - KIM, Y.-S. (2017): *Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method*. In: Procedia Engineering, Vol. 184, pp. 381-389.
- [7] ZHANG, S. - LIU, X. - ZHOU, X. - WANG, X. - QIU, L. - GU, Z. - XIE, H. (2024): *Spatial-Temporal Response and Precursor Characteristics of Tensile Failure on Disc Coal Samples of Different Sizes Combining AE, EMR and DIC Techniques*. In: Engineering Fracture Mechanics, Vol. 309, pp. 110418.
- [8] WANG, C. - WANG, S. - XIE, L. - LIU, Y. - DENG, J. - HE, W. (2023): *Fatigue Crack Growth Behavior of Marine Steel under Variable Amplitude Loading-Combining DIC Technique and SEM Observation*. In: International Journal of Fatigue, Vol. 170, pp. 107508.
- [9] MAHMOUD, Z.H. - AL-SALMAN, H.N.K. - KIANFAR, E. (2024): *Nanoindentation: Introduction and Applications of a Non-Destructive Analysis*. In: Nano TransMed, pp. 100057
- [10] CAO, D. - WALKER, C.C. - HACKETT, B.L. - PHARR, G.M. (2025): *Insights into the Origins of Friction in Hard Materials via Two-Axis Nanoindentation*. In: Journal of Materials Research [online].
- [11] WANG, D.-Q. - ZHU, M.-L. - XUAN, F.-Z. (2017): *Correlation of Local Strain with Microstructures around Fusion Zone of a Cr-Ni-Mo-V Steel Welded Joint*. In: Materials Science and Engineering A., Vol. 685, pp. 205-212.
- [12] BRUKER, (2025): *Bruker TI Premier User Manual*. USA: Bruker.
- [13] MYLO, M. D. - POPPINGA, S. (2024): *Digital image correlation techniques for motion analysis and biomechanical characterization of plants*. In: Frontiers in Plant Science, Vol. 14, pp. 1335445, ISSN 1664-462X.
- [14] AMRAEI, M. - AHOLA, A. - AFKHAMI, S. - BJÖRK, T. - HEIDARPOUR, A. - ZHAO, X.-L. (2019): *Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels*. In: Engineering Structures, Vol. 198, pp. 109460
- [15] ELIONIX INC. [nedatované]. *What is Nanoindentation Tester?* [online]. [cit. 2025-06-05]. Dostupné z: [https://www.elionix.co.jp/english/keisoku\\_en/what\\_is\\_ENT](https://www.elionix.co.jp/english/keisoku_en/what_is_ENT)
- [16] GAO, K. - LIU, Z. - SHEN, X. - LANG, L. - DONG, S. (2023): *Integration of nanoindentation and finite element method for interpretable tensile properties: A cross-scale calculation method of uneven joints*. In: Chinese Journal of Aeronautics, vol. 36, No. 6, pp. 233-248, ISSN 1000-9361.

---

# Progress in advanced industrial engineering

---

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.\*

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

## Branislav Mičieta, prof. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.micieta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2701

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

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

## Ján Zuzík, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.zuzik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2710

**Abstract:** Industrial engineering continuously evolves to meet the demands of modern manufacturing and service systems. With the integration of new technologies and innovative methodologies, advanced industrial engineering plays a crucial role in optimizing processes, increasing efficiency, and reducing costs. This article explores recent developments, key trends, and future prospects within this dynamic field.

**Keywords:** *Ishikawa* diagram, industrial engineering.

---

## INTRODUCTION

Industrial engineering is a discipline dedicated to optimizing complex systems, processes, and organizations. Over recent decades, it has undergone a substantial transformation driven by technological innovations and a deeper understanding of system dynamics. Advanced industrial engineering combines traditional methods with cutting-edge technologies such as automation, data analytics, and sustainability practices.

These developments enable industries to operate more efficiently, flexibly, and sustainably, addressing the contemporary challenges of global competition, environmental concerns, and workforce management. This article aims to provide a comprehensive overview of the latest trends, innovations, and future directions shaping advanced industrial engineering.

What makes *Industry 4.0* so exciting is that it integrates digital, physical, and biological systems into the smart manufacturing process. Biological systems, representing a relatively new and emerging

component of the *Industry 4.0* revolution, refer to the employment and integration of natural and organic materials, structures, and processes in the manufacturing process. Whether replicating systems and processes based on biological models from nature or leveraging organic material to improve material sustainability, effectiveness, and utility, biological systems are playing an increasingly important role in the evolving manufacturing processes.

As a result of the integration of these three systems, this highly automated and data-driven industrial sector can perform real-time monitoring, improve product and process effectiveness and sustainability, and control production processes. This allows companies to maximize efficiency, productivity, and customization while gaining a wealth of data that can be used to optimize these processes further [1].

## 1 TECHNOLOGICAL INNOVATIONS

Automation, powered by robotics and intelligent control systems, allows repetitive and dangerous tasks

to be performed consistently and accurately, reducing human error and safeguarding workers. The *Internet of Things (IoT)* facilitates interconnected devices that generate a constant stream of data, enabling real-time process monitoring and control. Advanced manufacturing techniques such as additive manufacturing (3D printing) provide customized solutions and rapid prototyping, accelerating product development cycles. Additionally, *augmented reality (AR)* and *virtual reality (VR)* tools support training, maintenance, and quality control, making workflows more interactive and efficient. These technological innovations collectively contribute to a smarter, more connected industrial environment, often referred to as *Industry 4.0*.



Fig. 1. Technologies driving *Industry 4.0* [15]

One of the most exciting aspects of *Industry 4.0* is the change it can offer to one of the biggest manufacturing crises in recent years: global supply chain management issues. The disruptions of the *COVID-19* pandemic caused delays across the world, with electronics manufacturers taking the biggest hit as they tried to keep up with the increased demand for chips and electronic components. In addition, the restrictive lockdown and shut-in mandates instituted in *China* exacerbated and accelerated concerns over *Chinese* manufacturing dependence, which had already received its fair share of supply scrutiny from the West, given geopolitical concerns. *China*, in contrast, is investing billions in *Mexico* to supply the *U.S.* from closer ports [2].

Smart factories” are where *Industry 4.0* is at its fullest effect. Sometimes referred to as a “cyber-physical” system, a smart factory makes use of all the innovations that combine both machine and digital operations for a fully streamlined manufacturing approach [3].

The basic structure of a smart factory relies on three main factors: data acquisition, data analysis, and

intelligent factory automation. The technology we’ve discussed, such as *IoT*, *AI*, *Machine Learning*, and *5G*, make up the parts of a smart factory and smart machines and allow it to reach a level of productivity, efficiency, and in many cases, sustainably that no other factory model has yet accomplished. They are the ultimate product of *Industry 4.0* and all the innovations it’s brought to manufacturing.

## 2 KNOWLEDGE AREAS OF INDUSTRIAL ENGINEERING

Figure 1 depicts the 14 knowledge areas of the industrial engineering discipline. These knowledge areas are also representative of the industrial and systems engineering discipline, as they are shared in the Industrial and Systems Engineering Body of Knowledge (ISEBoK Authors, 2021).

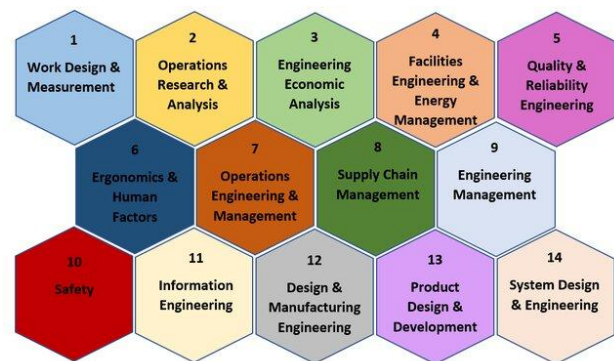


Fig. 2. The 14 knowledge areas of the industrial engineering discipline, adapted from the *Industrial and Systems Engineering Body of Knowledge* [4]

The rise of big data analytics and *artificial intelligence (AI)* has enabled industrial engineers to shift from reactive to predictive and prescriptive decision-making. By collecting data from sensors, machines, and enterprise systems, engineers can develop complex models that forecast future performance, identify potential failures, and optimize resource utilization. Machine learning algorithms can detect patterns not evident through conventional analysis, leading to proactive maintenance and reduced downtime. Additionally, simulation tools help evaluate different scenarios without disrupting actual operations, supporting strategic planning. This data-driven approach results in increased productivity, reduced operational costs, and enhanced agility in responding to market changes [4].

Modern industrial engineering increasingly emphasizes environmental sustainability. Techniques such as *life cycle assessment (LCA)* evaluate the environmental impact of products and processes from raw material extraction to disposal. Energy-efficient machinery, renewable energy integration, and waste minimization strategies help industries meet stricter environmental regulations and reduce their carbon footprint [6]. Circular economy concepts encourage

reuse, recycling, and redesign for durability, promoting resource conservation.

*Eco-design* principles incorporate sustainability at the early stages of product development, ensuring that environmental considerations are integral rather than supplementary. These practices not only help organizations achieve compliance but also enhance brand reputation and long-term viability [7].

While automation and digitalization are at the forefront, the role of humans remains vital. Modern industrial engineering emphasizes ergonomic design to improve safety and comfort for workers, reducing injury rates and enhancing productivity [8]. User-centered interfaces and decision support systems help operators better understand and manage complex processes. Moreover, skill development and training programs are critical as new technologies require a workforce skilled in digital literacy, troubleshooting, and maintenance [9].

Collaboration between humans and machines—often referred to as cobots—maximizes efficiency while maintaining a focus on worker well-being. Recognizing human factors ensures that technological advancements are inclusive and beneficial for the entire workforce [10].

Looking ahead, advanced industrial engineering is poised to leverage emerging technologies such as artificial intelligence, blockchain, and *cyber-physical systems (CPS)* to create highly resilient and flexible industrial ecosystems [11]. *AI* will further enhance autonomous decision-making, predictive analytics, and adaptive manufacturing processes. *Blockchain* technology can improve transparency, traceability, and security in supply chains, fostering trust and compliance. *CPS* integrates computation, networking, and physical processes, enabling seamless coordination across the entire production lifecycle [12, 13].

Additionally, resilience and cybersecurity will become focal points, ensuring that industrial systems can withstand disruptions from cyberattacks, natural disasters, or geopolitical tensions [14]. As industries pivot toward sustainability, digital transformation will continue to be a central driver of innovation, improving quality, efficiency, and environmental responsibility [15].

## CONCLUSIONS

The trajectory of advanced industrial engineering indicates a future where digital technologies, sustainability, and human-centric principles merge to create intelligent and adaptable systems. Progress in these areas enhances productivity and competitiveness while addressing critical societal challenges such as climate change and workforce development. Continuous research, investment, and

collaboration among academia, industry, and policymakers are essential to harness the full potential of these innovations. Ultimately, advanced industrial engineering is key to building a resilient, sustainable, and technologically advanced industrial landscape for the future.

Other industrial engineering literature, such as handbooks of industrial engineering, also provide representations of the industrial engineering discipline's knowledge base or knowledge areas. As mentioned previously, two prominent industrial engineering handbooks are the *Handbook of Industrial Engineering* [10] and *Maynard's Industrial Engineering Handbook* [16]. Both of these handbooks provide representations of the knowledge base of industrial engineering. These representations can be related to the *IEBoK's* representation, but they also provide unique insights into the knowledge base of the discipline.

One of the most important ways that industrial engineering stands out from other engineering disciplines is the breadth of its knowledge base and its interdisciplinarity. While most engineering disciplines fall within the hard sciences [13], the interdisciplinarity of industrial engineering extends to the soft sciences too (H. To depict the industrial engineer's broadness and interdisciplinarity, the *Handbook of Industrial Engineering* by Salvendy (2001) created a *Venn Diagram* to show how many disciplines *industrial and systems engineering (ISE)* interfaces with. The diagram also applies to industrial engineering by itself, as is evident from industrial engineering's definitions and other literature.

*Maynard's Industrial Engineering Handbook* (2001) [16] has a chapter titled "*Fundamentals of Industrial Engineering*" which covers the application areas, procedures, and methods of industrial engineering. The chapter also discusses industrial engineering's interface with the hard sciences and the soft sciences. Some elements of the hard sciences would be physical entities (such as equipment and buildings) and informational entities (such as time and space) [8]. The soft elements are considered to be the management-related factors of work, such as motivation, improvement, and participation (Hicks, 2001).

The evolution of the industrial engineering discipline may seem like a series of historic events, but it is actually an ongoing process continuing into the 21st century. Also, industrial engineering, despite its inherent broadness, is broadening even more with time (Greene, 2001). Thus, researchers are often trying to "capture" the state of industrial engineering at a certain point in time or in a certain area – whether that is by conducting a census on industrial engineers or analysing the trends emerging within the discipline.

## Acknowledgement

This work was supported by project contract No. VEGA 1/0633/24 and by project contract No. KEGA 011ŽU-4/2025.

## REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, M. - FURMANNOVA, B. (2021): *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: Transportation Research Procedia, 55, 503-509.
- [2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humnistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZNDAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] VAVRIK, V. - FUSKO, M. - BUČKOVÁ, M. - GASO, M. FURMANNOVÁ, N. - STAFFENOVA, K. (2022): *Designing of machine backups in reconfigurable manufacturing systems*. In: Applied Sciences, 12(5), pp. 1-27, ISSN 2076-3417.
- [5] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom 2021. Virtual conference 26 May – 28 May, Slovakia. Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [6] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 142.
- [7] ISEBoK Authors (2021): *Industrial and Systems Engineering Body of Knowledge*.
- [8] HICKS, P. E. (2001): *Fundamentals of Industrial Engineering*, in *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5th edn. McGraw-Hill Education.
- [9] GREENE, T. J. (2001): *The Future of Industrial Engineering - One Perspective*, in *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5th edn. McGraw-Hill Education.
- [10] SALVENDY, G. (2001): *Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management*. 3rd edn. Edited by G. (Purdue U. Salvendy).
- [11] HUMAN FACTORS ENGINEERING (2001): (IE Solutions, cited in Zandin and Maynard 2001) Ergonomics and Human Factors (Lima et al., 2017) Ergonomics (Savory, 2005)
- [12] DEMMEL, J. - SILLITTO, H. (2021): *Systems Engineering and Industrial Engineering*. Available at: [https://www.sebokwiki.org/wiki/Systems\\_Engineering\\_and\\_Industrial\\_Engineering](https://www.sebokwiki.org/wiki/Systems_Engineering_and_Industrial_Engineering) (Accessed: 13 June 2021).
- [13] US DEPARTMENT OF LABOR (2009): *Occupational Outlook Handbook*. Skyhorse Publishing Inc.
- [14] DARWISH, S. (2021): *Mapping the job potential of the industrial engineer: a web-investigation*. Doctoral dissertation, North-West University (South Africa)
- [15] VATIONVENTURES (2025): Available at: <https://www.vationventures.com/research-article/how-technology-is-changing-the-manufacturing-industry>
- [16] BILLINGS, C. - JUNGUZZA, J. J. - POIRIER, D. F. - SAEED, S. (2001): *The Role and Career of the Industrial Engineer in the Modern Organization in Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5th edn. McGraw-Hill Education

## RECENZIA

Do rúk sa mi dostala zaujímavá kniha s názvom *Platónska a archimedovská tělesa, geometrie prostoru*, ktorú napísal *Daud Sutton*. Vydalo vydavateľstvo *Pergamen Praha*, 2023. Keďže ide o zaujímavý text, tak som a rozhodol záujemcov oboznámiť s obsahom tejto knihy. Keď na povrchu gule zvolíme jeden bod, môžeme vo vzťahu k nemu určiť ďalšie body. Najjednoduchší a najzjavnejší vzťah je k bodu, ktorý leží oproti. Nájde ho tak, že úsečku do stredu gule predĺžime na druhú stranu. Zoberme tretí bod a umiestnime trojicu tak, aby body ležali najďalej od seba-vznikne takto rovnostranný trojuholník. Tieto tri body ležia na kružnici s polomerom zhodnom s polomerom gule. Táto kružnica má s guľou ten istý stred- je to príklad maximálne možnej kružnice na guľi, ktorej sa hovorí hlavná kružnica. Bod je bezrozmerný, krivka má jeden rozmer a trojuholník zaberá dva rozmery. Na vymedzenie nezakriveného trojrozmerného útvaru sú potrebné aspoň štyri body. Kocka (*hexaéder*) má šesť stien a pozná ju každý. Ostatné *Platónske telesá* majú svoje pomenovania odvodené od počtu stien. Steny troch z týchto telies tvoria rovnostranné trojuholníky: štvorsten (*tetraéder*) sa skladá zo štyroch, osemsten (*oktaéder*) z ôsmich a dvadsať stien (*ikosaéder*) z dvadsiatich. Stenami dvanásťstenu (*dodekaédra*) je dvanásť pravidelných päťuholníkov. Takisto autor preberá *zlatý rez*. Rozdeleniu úsečky na dve časti v rovnakom pomere ako má dlhšia časť k celku sa hovorí *zlatý rez*. Je to iracionálne číslo, ktoré sa nedá vyjadriť ako jednoduchý zlomok. Jeho hodnota je jedna plus odmocnina z piatich delené dvomi-približne 1,618. Označuje sa gréckym písmenom  $\varphi$  alebo niekedy aj  $\tau$ . Číslo  $\varphi$  má blízky vzťah k jednotke:  $\varphi$  vynásobene sebou samým sa rovná  $\varphi + 1$  (2,618) a jedna delené  $\varphi$  sa rovná  $\varphi - 1$  (0,618). Ďalej autor uvádza informácie a obrázky *Keplerových* a *Poinsotových* telies. *Archimedovské telesá* predstavujú súbor päťdesiatich troch nekonvexných polopravidelných mnohostenov. *Archimedovské telesá* spolu s *Platónskymi* a *Keplerovsko-Pointsovými* telesami tvoria množinu sedemdesiatich piatich pravidelných telies. Autor publikuje aj rozviny týchto telies, *Archimedovskú symetriu*, rozvoj a vzorce potrebné pre zvládnutie tejto problematiky. Na stranách 56-57 sú tabuľky hodnôt dvadsiatich dvoch telies. Publikáciu by som odporučil každému záujemcovi, nielen matematikom, ale aj technikom. Kniha je vyhotovená v peknej grafickej úprave s prebalom a pripojený je aj zoznam odporúčanej literatúry.

JM

## Magazin TECHNOLOG

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

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

**Evidenznummer MK SR-2800/08.**

**ISSN 1337-8996**

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

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

**Fax: +421 (0) 41-513 1535**

**Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk**

## Журнал ТЕХНОЛОГ

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

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

**Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.**

**ISSN 1337 – 8996**

**Адрес редакции: Žilinská univerzita, strojnická fakulta, Univerzitná 1, 01026 Žilina**

**Telefón: 041-513 2764, 513 2814**

**Fax: 041-513 1535**

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

**ISSN 1337-8996**

**DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2025.2>**