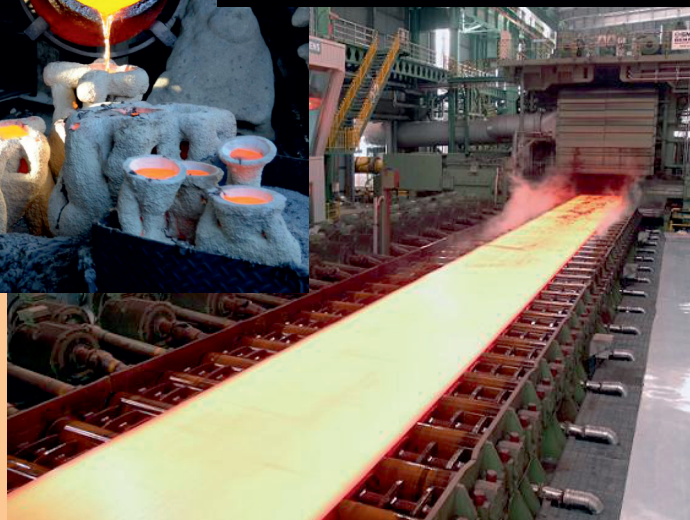
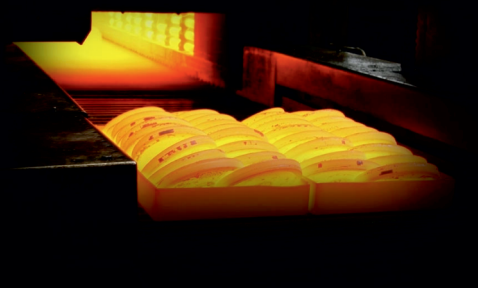
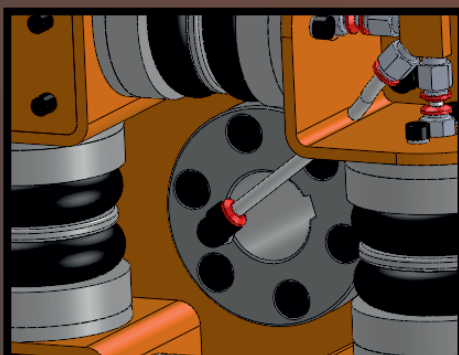
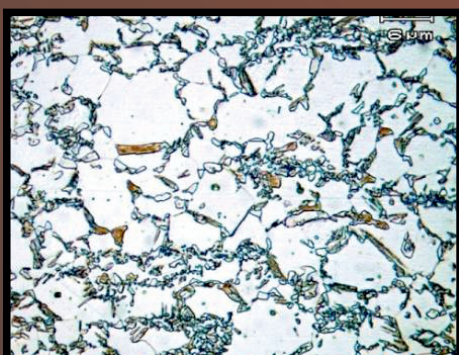
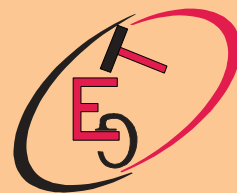


ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Strojnícka
fakulta

TECHNOLÓG



Ročník 17
október 2025

3/2025

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.

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

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

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD.

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc.

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc.

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD.

prof. Ing. Emil EVIN, CSc.

prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD.

(SK)

(SK)

(UA)

(SK)

(SK)

(CZ)

(SK)

(SK)

(SK)

(SK)

(SK)

OBSAH

ZOZNAM RECENZENTOV	4
EDITORIÁL	5
ERNST FLORENS FRIEDRICH CHLADNI	6
SÚČASNÉ MATERIÁLOVÉ RIEŠENIA PRE OZUBENÉ KOLESÁ <i>Daniela Kepeň Harachová, Silvia Maláková</i>	10
EXPLOZÍVNE TVÁRNENIE DIELCOV A JEHO PODSTATA <i>Ján Moravec, Borislav Melo</i>	17
INTERAKCIA MEDZI MATERIÁLOM, TEPELNÝM SPRACOVANÍM A PEVNOSTNÝM VÝPOČTOM V NÁVRHU OZUBENÝCH PREVODOV <i>Silvia Maláková, Daniela Kepeň Harachová</i>	23
HOW HEAT TREATMENT AFFECTS TOOL STEELS <i>Elena Kantoríková</i>	30
NOVÉ PROTOTYPY PNEUMATICKÝCH PRUŽNÝCH HRIADEĽOVÝCH SPOJOK A ICH OČAKÁVANÉ VLASTNOSTI <i>Matej Urbanský, Robert Grega, Lucia Žul'ová, Jozef Krajňák</i>	34
TECHNOLOGICKÉ RIEŠENIA VÝROBY KOMPONENTU KOLAJOVÉHO VOZIDLA <i>Martin Bučko, Vladimír Samaš, Patrik Slušňák, Oleksandr Kravchenko</i>	39
RECENZIA <i>Ján Moravec</i>	43

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD.
doc. Ing. Miroslav BLATNICKÝ, PhD.
prof. Ing. Lubomír HUJO, PhD.
doc. Ing. Róbert LABUDA, PhD.
Ing. Pavol LUKÁŠIK, PhD.
prof. Ing. Augustín SLÁDEK, PhD.
Ing. Roman STROKA, 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: “ *Veda bez viery je chromá, viera bez vedy je slepá.* ”

Albert Einstein

Tak, a opäť sa stretávame (aspoň virtuálne) v čísle 3/2025 časopisu *Technológ*. V tomto čísle časopisu *Technológ* sú publikované príspevky z rozličných oblastí vedy, čo je iste na prospech najmä čitateľov a záujemcom o tu prezentované poznatky. Príspevky majú iste čo povedať záujemcom a odborníkom. Pokiaľ ide o potrebné informácie z uvedených článkov vo vedeckom časopise *Technológ*, tieto sa dajú pohodlne vyhľadať v elektronickej verzii, čím sa uľahčil prístup k potrebným informáciám. *Technológ* patrí medzi časopisy, kde je aplikované takéto riešenie. Zaradené príspevky sú skontrolované a recenzované anonymne dvomi recenzentmi. Okrem toho má redakcia právo na redakčnú úpravu textov. Do tohto čísla je zaradený príspevok o významnom fyzikovi so *slovenskými* koreňmi *Ernestovi Chladnom*. Za týmto nasledujú vedecké príspevky, ktoré ponúkajú veľa zdrojov, poznatkov a riešení pre nasledujúce využitie. V čísle je zaradená aj recenzia publikácie s názvom *Kniha geometrických kouzel, matematická expedice*, od autora *Davida Achesona*.

Všetkým prajem mnoho zdravia a pekných zážitkov pri čítaní časopisu *Technológ*.

Ján Moravec
šéfredaktor a editor



Ernst Florens Friedrich CHLADNI

(*30. november 1759, *Wittenberg* –
†3. apríl 1827, *Vratislav*)

Tento príspevok je venovaný menej známemu vedcovi *slovenského* pôvodu, resp. jeho rod pochádzal z územia dnešného *Slovenska* z *Kremnice*, a preto právom patrí do tohto súboru našich významných učencov. Jeho pôvodné priezvisko bolo s istotou *Chladný*.

Ernst Florens Friedrich Chladni bol *nemecký* (môžeme o ňom hovoriť aj ako o potomkovi *slovenských* exulantov) fyzik a hudobník. Jeho dôležitá práca obsahuje výskum vibrujúcich dosiek a kalkulácií rýchlosti zvuku v rozdielnych plynných prostrediach. Preto sa niekedy takisto nazýva „*Otec akustiky*“. Bol priekopníkom pri štúdiách meteoritov a preto býva nazývaný aj „*Otec meteoritiky*“. Ako jeden z prvých bádateľov obhajoval mimozemský pôvod meteoritov, čo v tom čase nebola obvyklá myšlienka.

Ernest Chladni pochádzal zo vzdelanej rodiny akademikov a učencov. *Chladniho* praded, exulant *Georg Chladni* (1637-1692) bol evanjelik, ktorý musel z *Kremnice* ujsť 19. októbra 1673 v čase protireformácie. *Chladni* sa narodil v *nemeckom Wittenbergu*. *Chladniho* rodina bola čiastočne z *Kremnice*, z hlavného banského mesta v *Uhorsku* a z časti z okolitých končín. Predkovia *Ernsta Chladniho* boli *slovenského* pôvodu, zrejme ich meno bolo „*Chladný*“. Preto bol v rozličných literárnych zdrojoch označovaný nielen ako *Nemec*, príp. *Maďar* a takisto aj *Slovák*. *Ernst Florens Friedrich Chladni* sa narodil vo *Wittenbergu* 30. novembra 1756.

Podľa jeho vlastných slov bol, ako jediné dieťa svojich rodičov, vychovávaný láskavo, a niekedy až veľmi prísne. Je o ňom známe, že keď sa naučil čítať, najviac miloval zemepis a čítanie cestopisov. Medzi rokmi 1771 a 1774 študoval na vojvodskom gymnáziu svätého *Augustína* v *Grimme* neďaleko *Lipska* a potom na otcovo želanie študoval právo vo *Wittenbergu* a v *Lipsku*. Radšej by bol študoval medicínu, ale otec trval na právnickom štúdiu práv. Doktorské tituly z filozofie a z práv získal na univerzite v *Lipsku* v r. 1782, podľa iných prameňov už v r. 1780. O jeho matke sa pramene nezmieňujú.

Chladniho starý otec *Martin Chladni* (1669-1725) sa v roku 1710 stal profesorom na *Wittenberskej univerzite* a v rokoch 1702-1721 bol dekanom teologickej fakulty, neskôr sa stal aj jej rektorom. *Chladniho* strýko *Justus Georg Chladni* (1701-1765) bol takisto na tejto univerzite profesorom práva. Druhý strýc *Johann Martin Chladni* (1710-1759) bol teológ, historik a profesor na univerzite v *Erlangene* a v *Lipsku*. *Chladniho* otec, *Ernst Martin Chladni* (1715-1782) bol profesor práva a rektor na *Wittenberskej* univerzite. Ako bolo vtedy zvykom polatinčil si meno na *Chladienus*. Nesúhlasil, aby jeho jediný syn študoval medicínu a trval na jeho právnickej kariére. Na základe otcovho želania *Chladni* študoval filozofiu a právo vo *Wittenbergu* a *Lipsku*, kde získal tituly. Keď jeho otec roku 1782 zomrel, venoval sa vlastným záujmom, prírodným vedám a hudbe.

Chladni fascinuje predovšetkým umelcov, pretože im poskytuje neprebernú sadu vzorov, ktoré je možné výtvarne zobraziť. Ďalej sú to hudobníci, ktorí rovnako ako *Ernst Chladni* vytvárajú nové hudobné nástroje a hrajú na nich. Zatiaľ je ďalšie využitie skôr začínajúce a tušené - z hľadiska liečenie hudbou - muzikoterapie, v prípade riadeného naladenia tónu či akordu na postihnuté miesta v tele, aj keď pochopiteľne aj v tomto odbore nadšenci už sú.

Ďalšou zvláštnosťou *Chladného* vedeckej práce bolo to, že sa o jej výsledky podieľal nielen vo vedeckých kruhoch, ale predovšetkým v širokej verejnosti.

METEORITIKA

Ak hmota alebo jej úlomky prežijú, padnú na povrch. Mnoho ľudí môže vidieť ohnivú guľu a počuť výbuch, ale len zriedka sú ľudia dostatočne blízko, aby videli meteorit dopadať na zem.

Po tisíce rokov ľudia vo všetkých častiach sveta hlásili takéto javy, ktoré často považovali za božské predzvesti. Vedecky naklonení navrhli, že skaly boli zdvihnuté vzdialenými sopkami alebo hurikánmi, alebo možno stuhli z atmosférických výparov pod vplyvom bleskov. Nikto si nepredstavoval, že ich pôvod je mimo Zeme. Koncom osemnásteho storočia vedecký názor odrážajúci ducha osvietenstva spochybňoval vierohodnosť zázrakov hlásených neškolenými pozorovateľmi. Celá téma skál z neba bola odmietnutá ako obyčajná povera.

V roku 1794 vydal *Ernst Chladni* malú knihu, v ktorej tvrdil, že masy železa a skál skutočne padajú z neba a vytvárajú ohnivé gule, keď sa zahrievajú trením o vzduch. Práca mala názov *Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen un anderer ihr ähnlicher Eisenmassen*. Bola vydaná v Lipsku aj v Rige vo vydavateľstve *J. F. Hartknoch*. (O pôvode železnej hmoty a inej jej podobnej, nájdenej Pallasom). *Chladni* v knihe dospel k záveru, že to musia byť kozmické objekty, možno trosky vyvrhnuté z planét výbuchmi alebo kolíziami. Reakcie na knihu sa pohybovali od skepticizmu až po výsmech. Ako môžu byť vo vesmíre skaly? Okrem hviezd, planét, mesiacov, komét a možno aj pár vychádzajúcich z ich atmosfér každý vedel, že samotný priestor je prázdny. Povedali to už *Aristoteles* aj *Newton*. A predsa mal *Chladni* pravdu. Dnes je považovaný za zakladateľa meteoritiky.

Chladniho záujem o meteority podnietil v roku 1793 rozhovor s *Georgom Lichtenbergom*, profesorom fyziky na univerzite v *Göttingene*. *Lichtenberg* bol svedkom ohnivej gule a myslel si, že takéto javy môžu byť spôsobené vstupom kozmických telies do zemskej atmosféry. *Chladni* začal svoje vyšetovanie tým, že v literatúre hľadal svedectvá očitých svedkov ohnivých guľí a skál z neba. Počas troch týždňov v univerzitnej knižnici zostavil podľa neho najspoľahlivejšie správy očitých svedkov. Zoznam zahŕňal dvadsaťštyri ohnivých guľí a osemnásť spadnutých skál hlásených z rôznych krajín počas mnohých storočí. Podobnosti týchto správ zapôsobili na *Chladniho*, ktorého právnické vzdelanie ho pripravilo na vyhodnotenie svedectiev očitých svedkov. Dospel k záveru, že svedkovia museli opisovať skutočný fyzikálny jav.

Chladni našiel početné prípady, keď po ohnivých guliach nasledoval pád skalných alebo železných más na zem. Napríklad kus železa s hmotnosťou sedemdesiatjeden libier spadol z neba nad *Chorvátskom* v roku 1751. Poslali ho cisárskemu prírodovednému kabinetu vo *Viedni* spolu s prísahným svedectvom siedmich svedkov v široko vzdialených mestách, ktorí opisali veľkolepú ohnivú guľu na oblohe a hlasné výbuchy.

Analýzou popisov ohnivých guľí bol *Chladni* schopný odhadnúť rýchlosť telies vstupujúcich do atmosféry. Tieto rýchlosti boli obrovské, rýchlejšie, než by ich dokázala vyprodukovať samotná zemská gravitácia, a boli možné len pre objekty kozmického pôvodu. Ďalším dôkazom bol ohorený vzhľad samotných telies. Boli dostatočne zahriate, aby sa ich vonkajšie vrstvy roztavili.

Keď *Chladni* v roku 1794 publikoval svoju knihu, mnohí vedci túto prácu okamžite zamietli, pretože sa opierali o výpovede očitých svedkov. Udalosti v nasledujúcich rokoch však zmenili váhu názorov v prospech *Chladniho*.

Dva mesiace po vydaní knihy sa na oblohe neďaleko *Sieny* v *Taliansku* objavil veľký oblak dymu. Iskriaci a dunivý oblak sa zmenil na jasne červenú a kamene padali na zem. Niektoré kamene boli nájdene a popisy udalosti boli publikované a široko diskutované.

O rok neskôr spadol 56-kilogramový meteorit neďaleko *Wold Cottage* v *Anglicku*. Svedkovia ohlásili zvuk výbuchu zo vzduchu. Jeden farmár skutočne videl, ako čierna skala dopadla na zem. Na základe týchto príhod začala s prieskumom aj londýnska Kráľovská spoločnosť. K prieskumu dal pokyn jej význačný člen *Sir Joseph Banks* (1743-1820), prírodovedec, sprevádzajúci predtým *Cookove výpravy*. *Chemickú analýzu vykonával mladý chemik Edward Howard* (1774-1816). *Howard* čítal *Chladniho* knihu a ďalšie správy a začal získavať vzorky kameňov a železných hmôt. V spolupráci s francúzskym mineralógom *Jacquedom-Louisom de Bournonom* urobil prvú dôkladnú vedeckú analýzu meteoritov. Vedci zistili, že kamene mali tmavú lesklú kôru a obsahovali drobné „gul'ôčky“ (chondruy), ktoré sa nepodobajú ničomu, čo možno vidieť v pozemských horninách. Všetky železné masy obsahovali niekoľko percent niklu, rovnako ako zrnká železa v padnutých kameňoch. V železe zo Zeme sa nikdy nič také nenašlo. Tu bol presvedčivý dôkaz, že železá a kamene boli mimozemského pôvodu. *Howard* publikoval tieto výsledky v roku 1802.

Medzitým bol v roku 1801 objavený prvý asteroid *Ceres* a nasledovali mnohé ďalšie. Existencia týchto obrovských hornín v slnečnej sústave naznačovala pravdepodobný zdroj meteoritov. Priestor napokon nebol prázdny.

Napokon v roku 1803 boli dedinčania v *Normandii* svedkami ohnivej gule, po ktorej nasledovali búrlivé dozvuky a veľkolepá sprška niekoľkých tisícok kameňov. *Francúzska vláda* vyslala mladého fyzika *Jeana-Baptista Biota*, aby to vyšetril. Na základe rozsiahlych rozhovorov so svedkami *Biot* stanovil trajektóriu ohnivej gule. Zmapoval

aj oblasť, kam kamene dopadli: bola to elipsa s rozmermi 10×4 kilometre, s dlhou osou rovnobežnou s trajektóriou ohnivej gule. *Biotova* správa presvedčila väčšinu vedcov, že skaly z oblohy sú skutočne mimozemské. Konečne bola spustená veda o meteoritoch, štúdium vzoriek z iných svetov z prvej ruky. V r. 1809 podľa niektorých prameňov *Chladni* nechal vytlačiť katalóg meteoritov.

PRÁCE Z AKUSTIKY

V roku 1794 sa *Chladni* zaoberal meraním rýchlosti zvuku a tým aj určovaním výšky tónov vo vzduchu a v rôznych plynných médiách. Ako prvý presne zmeral frekvencie tónov. Výsledky svojich pokusov, vrátane názorných tabuliek, uverejnil v pojednaní *O pozdĺžnom kmitaní strún a prútov (Über die Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe)*, Erfurt 1796.

Chladni je známy svojou prácou v akustike a vynálezom metódy na vizualizáciu vzorcov vibrácií na mechanických povrchoch. Stavajúc na priekopníckej práci, ktorú vykonal *Robert Hooke* (1635-1703) v Oxforde koncom 17. storočia, *Chladni* odhalil vzorce vibrácií pomocou jemného piesku, ktorý sa usadzuje v uzlových líniách (oblastiach s nulovým posunom) a vytvára pozoruhodné a krásne tvary. *Chladniho* demonštrácie vzbudili záujem francúzskeho cisára a amatérskeho vedca *Napoleona Bonaparteho* (1769-1821), ktorý bol natoľko ohromený, že financoval preklad *Chladniho* hlavného diela *Die Akustic* do francúzštiny, ktoré vyšlo v roku 1809 (obr. 1).

Chladni tiež uskutočnil niektoré z prvých výskumov ladičiek, čím pripravil cestu k dokonalosti týchto nástrojov ako hudobných a vedeckých nástrojov.

CHLADNIHO PLATNE: PRVÝ KROK K VIZUALIZÁCI ZVUKU

Chladniho platne, ktoré vynašiel *Ernst Chladni* koncom 18. storočia, sa používajú na demonštráciu zložitých vzorcov vibrácií stojatých vln, ktoré sa môžu vyskytnúť v dvojrozmerných objektoch. *Whippleova* zbierka obsahuje dva príklady z *King's College London*, vyrobené a používané v laboratóriu fyzika sira *Charlesa Wheatstonea* (1802-1875). Bolo možné zviditeľniť zvukové vlny, posypaním prášku na kovový alebo sklenený tanier a trením okraja taniera husľovým sláčikom. Vibrácie dosky spôsobili, že sa prášok hromadil v symetrických vzoroch, ktoré sa teraz nazývajú *Chladniho* obrazce.

Doštičky *Whipple* sú vyrobené zo železa a rozochvievajú sa hladením husľovým sláčikom. Pri pohladení bude daná platňa rezonovať na jednej zo svojich vlastných frekvencií. Experimentátor potom posype jemným pieskom, ktorý poskakuje po tanieri, až kým sa neusadí v uzlových bodoch (oblastiach s nulovým pohybom), čím vytvorí zložité vzory. Túto techniku vizualizácie *Chladni* a zdokumentoval vo svojej knihe *Die Akustic* (1802).

Teoreticky má každá platňa nekonečne veľa možných vibračných režimov, z ktorých každý zodpovedá určitej frekvencii zvuku. Každý režim vytvára jedinečný vzor, ktorého zložitosť sa zvyšuje s frekvenciou vibrácií. Tvar vzorov vyrobených na danej platni závisí od iných faktorov, vrátane tvaru samotnej platne.

Chladni viedol korešpondenciu s vedeckými kapacitami vtedajšej doby a stretával sa s významnými fyzikmi i ďalšími významnými osobnosťami tej doby (*Goethe*, *Napoleon*). V roku 1794 sa *Chladni*, napriek námietkam k jeho názorom na meteority, stal korešpondujúcim členom *Akadémie vied a umení v Petrohrade*. Na svojich cestách po Európe zhromaždil zbierku meteoritov, ktorú odkázal prírodovednému múzeu v Berlíne. Na prvej stránke „*Traité d'Acoustique*“ je uvedené, v ktorých vedeckých organizáciách bol *Chladni* členom: *Kráľovskej spoločnosti Harlem v Holandsku*, člen *Spoločnosti prírodovedcov v Berlíne (Gesellschaft der Naturforscher)*, *Krajskej spoločnosti vied a umenia sídliacej v Mohuči (Société Départementale des Scie v Erfurte (Akadémia für verwandten Wissenschaften)*. Bol tiež členom ďalších spoločností v *Mníchove* a *Göttingene*. Takisto aj vo francúzskej vedeckej spoločnosti, *La Société philomatique*, (Spoločnosť milovníkov vedy). *Chladni* bol aj členom *holandskej Batavskej spoločnosti v Rotterdame*.

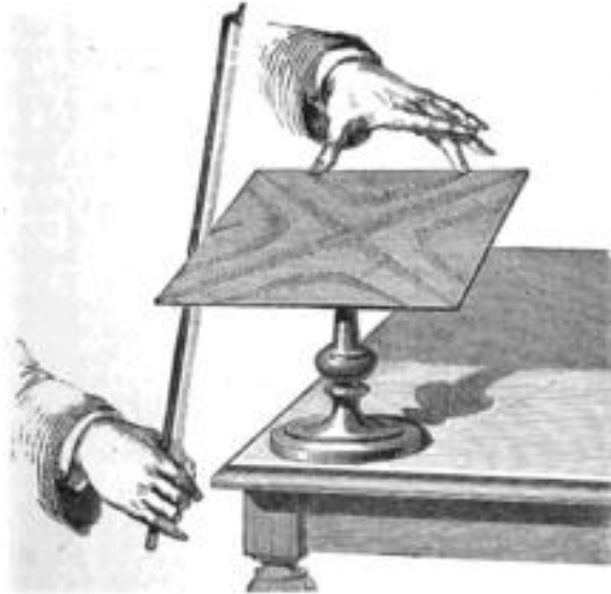
ZAÚJÍMAVOSTI

Podľa zápiskov dvanásťročného hudobného skladateľa *Felixa Mendelssohna-Bartholdyho* (1809-1847), ktorý *Chladniho* v jeho byte r. 1821 navštívil, žil tento vo veľmi stiesnených podmienkach: v jednej miestnosti, ktorá bola súčasne spálňou, dielňou i kresliarňou. Vydával sa odtiaľto ďalej na svoje cesty.

V r. 1824 vyšlo v Lipsku v zborníku „*Anály fyziky*“ zaujímavé pojednanie „*O tvorení ľudskej hovorenej reči*“ (*Über die Hervorbringung der menschlichen Sprachlaute*). Tu *Chladni* popísal tvorbu samohlások i spoluhlások vo vzťahu k nemčine. Veľmi starostlivo si všimol tvorbu hlások v iných jazykoch, obzvlášť hlások, ktoré iné národy nemajú. Popisoval činnosť jednotlivých častí hovoridiel. Zaoberal sa aj *slovanskými* jazykmi.

Počas *napoleonských* vojen bol v roku 1813 vypálený *Chladniho* byt vo *Wittenbergu*, následkom čoho *Chladni* prišiel o väčšinu svojich denníkových záznamov a poznámok k pokusom. Od tej doby žil v neďalekom *Kenbergu*. *Chladni* zomrel 3. apríla 1827 vo *Vratislavi (Breslau)* počas jednej zo svojich ciest. Bol pochovaný na tamom veľkom cintoríne, miesto jeho hrobu nie je známe.

Je po ňom pomenovaný kráter *Chladni* na *Mesiaci* a *asteroid č. 5053 Chladni*.



Obr. 1. Chladniho doska

LITERATÚRA

- [1] SOCHA, V. (2017): *Velké vymírání na konci křídy*. Červený Kostelec: Pavel Mervart, str. 28-29, ISBN 978-80-7465-259-2.
- [2] LEBROVÁ, D. (2024): *Ernst Florens Friedrich Chladni – 255. výročí narození*. www.pozitivni-noviny.cz [online]. Pavel Loužecký, 2011-11-30 [cit. 2024-07-26].
- [3] RÜKL, A. (1991): *Atlas Měsíce*. Praha: Aventinum, Kapitola Triesnecker, s. 92/33, ISBN 80-85277-10-7.
- [4] Crater Chladni on Moon, *Gazetteer of Planetary Nomenclature*, IAU,ISGS, NASA.
- [5] RUMANOVSKÝ, I. - STADTRUCKER, I. (1965): *E. F. F. Chladný, otec akustiky a meteoritiky*. Osveta Bratislava.

Súčasná materiálové riešenia pre ozubené kolesá

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.*

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

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.

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

Current material solutions for gear wheels

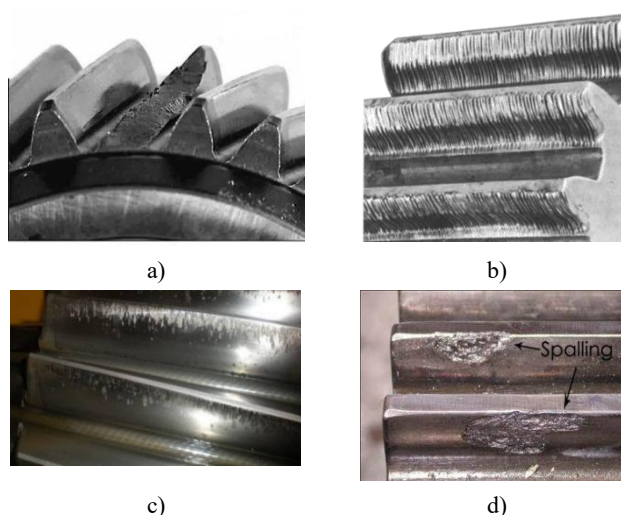
Abstract: Gears are very common machine components that enable precise transmission of rotational motion and power transmission from shaft to shaft. High demands are placed on the function of gears in operation. They must enable precise, uniform transmission, must not cause noise, often have to transmit large forces, etc. Gears are manufactured from a variety of materials and with different performance specifications depending on the industrial application. Gear materials are required to have high strength, toughness and wear resistance because gears rely on their own design size and material strength to withstand external loads. Material manufacturability is also necessary due to the complex shape of the gear and the high precision requirements of the gear. This study highlights trends in gear materials that are moving towards ultra-high strength, high wear resistance, high temperature resistance, corrosion resistance, and low weight.

Keywords: gears, material, surface treatment, composite materials, hybrid gears.

ÚVOD

Ozubené kolesá sú dôležitými mechanickými súčastami mnohých strojov a zariadení, ako sú priemyselné stroje, textilné stroje, obrábacie stroje, elektronické zariadenia, automobily a mnoho ďalších zariadení. Pri zábere dvoch ozubených kolies zapadajú zuby jedného kolesa do zubových medzier druhého kolesa, pričom sa zaberajúce zuby dotýkajú svojimi bokmi. Tým prenášajú krútiaci moment (výkon) z hnacieho hriadeľa na hnaný pri konštantnom prevodovom pomere spoluzaberajúcich kolies bez sklzu. S rozvojom priemyslu sa materiály ozubených kolies vyvíjajú smerom k ultra vysokej pevnosti, vysokej odolnosti voči opotrebovaniu, odolnosti voči vysokým teplotám, odolnosti voči korózii a nízkej hmotnosti. Existuje množstvo problémov, ktorým odborníci zvyčajne čelia pri výrobe ozubených kolies. Opatrenie opotrebovanie ozubených kolies je postupná strata materiálu v dôsledku relatívneho pohybu zaberajúceho povrchu zubov. Šírenie opotrebovania ozubených kolies skracuje životnosť povrchu ozubeného kolesa, zhoršuje kontaktné mazanie zaberajúcich ozubených kolies, zvyšuje trenie/hluk a vedie k tvorbe koncentrácií napätia. Medzi najčastejšie poruchy patria:

opotrebenie, náraz, deformácia profilu zubov, praskliny, lomy zubov, odlupovanie povrchovej vrstvy, jamková korózia atď. (obr. 1).



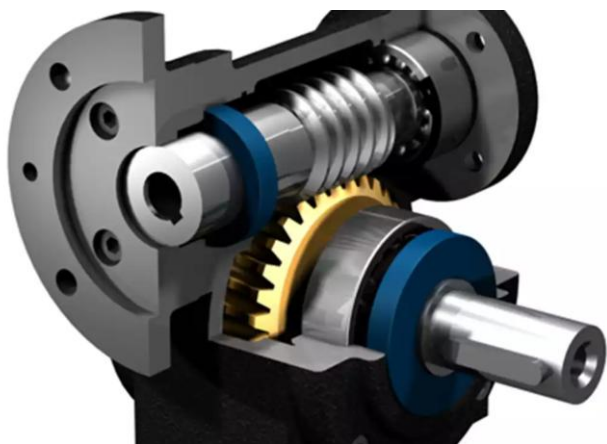
Obr. 1. Príklad opotrebovania ozubeného kolesa:
a) únavový lom v koreni zuba, b) opotrebovanie ozubeného kolesa, c) odieranie, d) štiepenie

Povrch zuba by mal mať vysokú odolnosť voči opotrebovaniu, bodkovej korózii a koreň zuba by mal mať vysokú odolnosť voči lomu. Materiál ozubených

kolies je primárne určený mechanickým namáhaním v konkrétnej aplikácii. Medzi bežne používané materiály patrí oceľ, liatina, hliník, rôzne plasty a kompozity. Mnohé priemyselné odvetvia čelia problému, zvolenia správneho materiálu, ktorý by bol pevný a flexibilný, ale zároveň ľahký. Kompozitné materiály môžu tento problém vyriešiť. Môžu kombinovať silné stránky rôznych materiálov, aby sa dosiahli lepšie a efektívnejšie výsledky. Kompozitné materiály sa používajú v odvetviach, ako je letecký a kozmický priemysel, automobilový priemysel, stavebníctvo atď. Kompozitné materiály poskytujú dostatočnú pevnosť pri zníženej hmotnosti a ukázali sa ako lepšia alternatíva k nahradeniu kovových ozubených kolies.

1 VÝBER SPRÁVNEHO MATERIÁLU OZUBENÝCH KOLIES

Návrh a výroba materiálu ozubených kolies je komplikovaný. Návrh materiálu bude závisieť o aký typ ozubeného kolesa sa bude vyrábať a kde sa bude používať. Vždy je potrebné vyhodnotiť kompatibilitu s materiálom, chemickým zložením, mechanickými vlastnosťami a cenou protíľahkého ozubeného kolesa. Pri navrhovaní jednotlivého ozubeného kolesa alebo ozubeného súkolesia [9] bude výber materiálu buď primárnym faktorom, na ktorom je založená geometria ozubeného kolesa, alebo výkon ozubeného kolesa bude určovať správny výber materiálu. Výber materiálu ovplyvňuje nielen schopnosť prevodovky prenášať výkon, ale aj jej odolnosť voči opotrebovaniu a environmentálnym faktorom. Výber správneho materiálu na obrábanie ozubených kolies je kľúčový, pretože priamo ovplyvňuje výkon, životnosť a účinnosť výroby ozubených kolies.



Obr. 2. Výber správnych materiálov ozubených kolies

Pri výbere materiálu prevodovky je veľmi dôležité zvážiť nasledujúce faktory:

- a) *Pevnosť* - ozubené kolesá sú počas prevádzky vystavené značnému zaťaženiu. Zvolený materiál musí mať dostatočnú pevnosť, aby odolal týmto silám bez deformácie alebo zlomenia.

- b) *Odolnosť proti opotrebovaniu* - ozubené kolesá sú v neustálom kontakte, čo vedie k opotrebovaniu v priebehu času. Výber materiálu hrá dôležitú úlohu pri minimalizácii opotrebovania a maximalizácii životnosti prevodovky.
- c) *Odolnosť proti únave* - ozubené kolesá sú vystavené opakovaným cyklom namáhania. Materiál musí vykazovať dobrú odolnosť proti únave, aby sa zabránilo praskaniu a prípadnému zlyhaniu.
- d) *Hmotnosť* - v závislosti od aplikácie môže byť hmotnosť rozhodujúcim faktorom. Výber ľahkého materiálu môže zvýšiť účinnosť a znížiť celkovú hmotnosť systému.
- e) *Náklady* - na materiál sú významným faktorom, najmä pri veľkoobjemovej výrobe. Dosiahnutie rovnováhy medzi výkonom a nákladmi je nevyhnutné.
- f) *Podmienky zaťaženia* - veľkosť a typ zaťaženia ozubeného kolesa ovplyvní maximálnu pevnosť a odolnosť materiálu proti opotrebovaniu.
- g) *Prevádzkové prostredie* - vystavenie extrémnym teplotám, korozívnym prvkom alebo vlhkosti môže ovplyvniť výber materiálu.
- h) *Požiadavky na hlučnosť* - niektoré materiály môžu počas prevádzky generovať viac hlučnosť ako iné.
- i) *Tepelná stabilita* - materiál by si mal zachovať svoje vlastnosti aj pri vysokých prevádzkových teplotách.
- j) *Odolnosť proti korózii* - v špecifických prostrediach je táto vlastnosť nevyhnutná na predĺženie životnosti prevodovky.
- k) *Typ aplikácie* - vysokorýchlostné prevody v pretekárskych aplikáciách vyžadujú odlišné vlastnosti v porovnaní s pomaly sa pohybujúcimi prevodmi v dopravníkovom systéme.

1.1 Typy materiálov ozubených kolies

Materiál ozubeného kolesa a tepelné spracovanie majú veľký vplyv na kvalitu a výkon ozubeného kolesa.

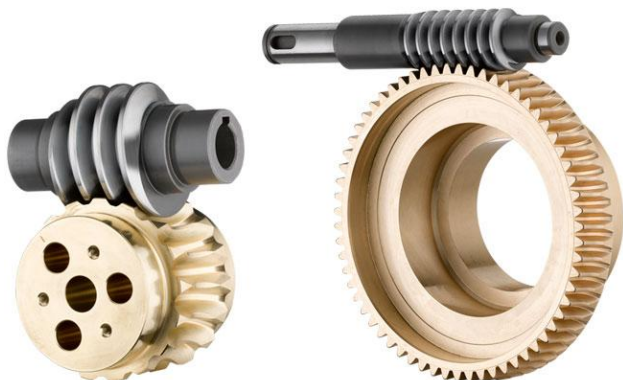
Základné požiadavky na vlastnosti materiálov zubov ozubených kolies sú:

- povrch zuba musí byť tvrdý,
- jadro zuba musí byť húževnaté.

Pri navrhovaní ozubeného kolesa, ktoré bude vystavené korozívnemu prostrediu alebo musí byť nemagnetické, je zvyčajne najlepšou voľbou Cu zliatina (obr. 3).

Tri najbežnejšie zliatiny medzi používané pri ozubení sú *mosadz*, *fosforový bronz* a *hliníkový bronz*. *Mosadz* je zliatina *medi* a *zinku*. Nízky obsah *zinku* udržuje vysokú úroveň ťažnosti v *mosadznej* zliatine,

zatiaľ čo vyššia koncentrácia zinku znižuje ťažnosť zliatiny. Medený základ mosadzných zliatin prispieva k jeho ľahkému obrábaniu a antimikrobiálnemu prínosu. Ozubené kolesá zvyčajne vyrábané z mosadzných zliatin sú čelné ozubené kolesá a ozubené kolesá, ktoré sa budú používať v prostrediach s nízkym zaťažením [12].



Obr. 3. Ozubené koleso zo zliatiny medi

Hlinikový bronz je ďalšia Cu zliatina, ktorá sa nachádza v prevodovkách. Táto zliatina kombinuje med' s Al, Fe, Ni a Mn. Zliatiny hliníka a bronzu majú vyššiu odolnosť proti opotrebovaniu ako zliatiny fosforu a bronzu a majú tiež vynikajúcu odolnosť proti korózii. Pridanie železa zlepšuje odolnosť tejto zliatiny proti opotrebovaniu. Zliatiny hliníka a bronzu odolávajú korózii v dôsledku oxidácie, vystavenia slanej vode a organickým kyselinám. Dodatočná odolnosť týchto zliatin proti opotrebovaniu umožňuje konštrukciu ozubených kolies, ktoré zvládnu podstatne väčšiu záťaž ako ozubené kolesá podobnej veľkosti vyrobené zo zliatin fosforového bronzu.

Keď konštrukcia ozubeného kolesa vyžaduje vynikajúcu pevnosť materiálu, najlepšou voľbou sú zliatiny železa. Oceľ je zliatina železa, uhlíka a iných stopových prvkov. Existujú štyri hlavné označenia oceľovej zliatiny. Je to uhlíková oceľ, legovaná oceľ, nehrdzavejúca oceľ a nástrojová oceľ. Zliatiny uhlíkovej ocele sa používajú na takmer všetky typy ozubení, pretože sa ľahko obrábajú, majú dobrú odolnosť proti opotrebovaniu, dajú sa kaliť, sú široko dostupné a sú relatívne lacné. Zliatiny nehrdzavejúcej ocele majú minimálny obsah chrómu 11 % a sú zliatinou mnohých stopových prvkov vrátane Mn, Ni, Si, P, S a N. Delia sa na feritické nehrdzavejúce ocele, ktoré sú magnetické, austenitickú nehrdzavejúcu oceľ, ktorá je nemagnetická, martenzitická a precipitačne kalená.

Hlinikové zliatiny sú dobrou alternatívou k zliatinám železa v aplikáciách, ktoré potrebujú vysoký pomer pevnosti k hmotnosti, pretože majú zvyčajne jednu tretinu hmotnosti oceľových zliatin rovnakej veľkosti.



Obr. 4. Ozubené kolesá vyrobené zo zliatiny hliníka

Povrchová úprava známa ako pasivácia chráni hlinikové zliatiny pred oxidáciou a koróziou. Je to podobné ako hrdza na oceľových zliatinách; pokrýva však povrch a chráni ho pred ďalším poškodením. Hlinikové zliatiny sú drahšie ako uhlíková oceľ, ale lacnejšie ako nehrdzavejúca oceľ. Ľahko sa však obrábajú, čím kompenzujú nárast nákladov na materiál. Hlinikové zliatiny nemožno použiť v prostredí s vysokou teplotou, pretože sa začínajú deformovať pri 400°F. Ozubené kolesá vyrobené z hlinikových zliatin zahŕňajú čelné ozubené kolesá, špirálové ozubené kolesá, kuželové kolesá s rovnými zubami a ozubené kolesá.

Termoplasty sú najlepšou voľbou pre prevody, kde je najdôležitejším kritériom hmotnosť. Ozubené kolesá vyrobené z plastov (obr. 5) môžu byť obrábané ako kovové ozubené kolesá.



Obr. 5. Nylonové ozubené koleso

Niektoré termoplasty sú však vhodnejšie na výrobu vstrekovaním. Jedným z najbežnejších

vstrekaných termoplastov je *acetal*. Tento materiál je tiež známy ako *polyacetal* alebo *polyoxymetylén (POM)*. Výhodou *POM* je jeho rozmerová stabilita vo veľkých teplotných rozsahoch, nízky koeficient trenia a odolnosť proti tečeniu. Je to vynikajúci materiál pre opotrebitelné povrchy, pretože je samomazací, ale *POM* je zlý materiál pre aplikácie vystavené nárazovému zaťaženiu kvôli svojej krehkosti.



Obr. 6. Materiál je známy ako *unobtainium*

1.2 Najčastejšie používané materiály ozubených kolies

S45C (uhlíková oceľ) - je jednou z najčastejšie používaných ocelí, obsahujúcou mierne množstvo uhlíka (0,45 %). *S45C* je ľahko dostupný a používa sa pri výrobe čelných ozubených kolies, špirálových ozubených kolies, ozubených hrebeňov, kuželových ozubených kolies a závitokvových prevodov .

SCM440 (*Cr-Mo* legovaná oceľ) - legovaná oceľ obsahujúca mierne množstvo uhlíka (0,40 %). Obsahuje *chróm/molybdén*. *SCM440* má väčšiu pevnosť ako *S45C* a používa sa pri tepelnej rafinácii, alebo indukčnom kalení na výrobu ozubených kolies.

SCM415 (*Cr-Mo* oceľ) - je jednou z najčastejšie používaných *nízkouhlíkových* legovaných ocelí (*C* = 0,15 %). Má väčšiu pevnosť ako *S45C* alebo *SCM440*. Tvrdosť povrchu by mala byť pri medzi 55 a 60 HRC.

SUS303 (nehrdzavejúca oceľ 18*Cr-8Ni*) - keďže sa nazýva „nehrdzavejúca oceľ“, je to oceľ odolná voči korózii. Táto *eutentická* nehrdzavejúca oceľ je v pod. Pre tieto typy aplikácií je lepšou voľbou *nylon* (obr. 5). *Nylon 6/6* je *polyamid*, ktorý sa skladá z dvoch monomérov so šiestimi atómami uhlíka. *Nylon* výborne absorbuje vibrácie, ale pri vystavení vlhkosti sa stáva rozmerovo nestabilným. *Nylon* je vynikajúcim materiálom pre všetky typy ozubených kolies vrátane závitokvových kolies, ozubených kolies, čelných ozubených kolies a kuželových ozubených kolies s rovnými zubami.

Existuje jeden materiál pre ozubené kolesá, ktorý ešte nie je vyvinutý. Je to ideálny materiál pre všetky konštrukcie prevodov. Tento materiál je známy ako *unobtainium* [13] (obr. 6). Tento materiál je extrémne ľahký, má tvrdosť väčšiu ako prírodný *diamant*, má

koeficient trenia 0,001, je rozmerovo stabilný vo všetkých prostrediach, nekoroduje ani nehrdzavie, je ľahko opracovateľný a má náklady na surovinu 1 cent za libru.

SUS303 (nehrdzavejúca oceľ 18*Cr-8Ni*) - keďže sa nazýva „nehrdzavejúca oceľ“, je to oceľ odolná voči korózii. Táto *autentická* nehrdzavejúca oceľ je v podstate *nemagnetická*. Najčastejšie sa používa pre ozubené kolesá v aplikáciách, kde je kontaminácia

hrdzou nežiaduca, napríklad v potravinárskych strojoch. Existuje podobná nehrdzavejúca oceľ s názvom *SUS304*, ktorá má väčšiu odolnosť proti korózii ako *SUS303*.

2 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Kompozity sú moderné, ale nie univerzálne materiály. Vždy sú navrhované pre veľmi konkrétne použitie s cieľom maximálneho využitia ich hmoty. Moderné kompozitné materiály majú množstvo výhod oproti iným materiálom, ako je oceľ. Azda najdôležitejšie je, že kompozity majú oveľa nižšiu hmotnosť. Odolávajú tiež korózii, sú flexibilné a odolné proti pretlačeniu. To znamená, že vyžadujú menšiu údržbu a majú dlhšiu životnosť ako tradičné materiály.

Kompozitný materiál sa považuje za materiál, ktorý je zložený najmenej z dvoch alebo viacerých zložiek odlišujúcich sa chemickým zložením - matrica a spevňujúca zložka, ktoré sú od seba oddelené výraznou hranicou, pričom výsledný materiál má úplne odlišné vlastnosti ako obe východiskové zložky.

Spevňujúca zložka + matrica = kompozit



Základná hmota, čiže matrica, má funkciu spojiva.

Funkciu matrice je:

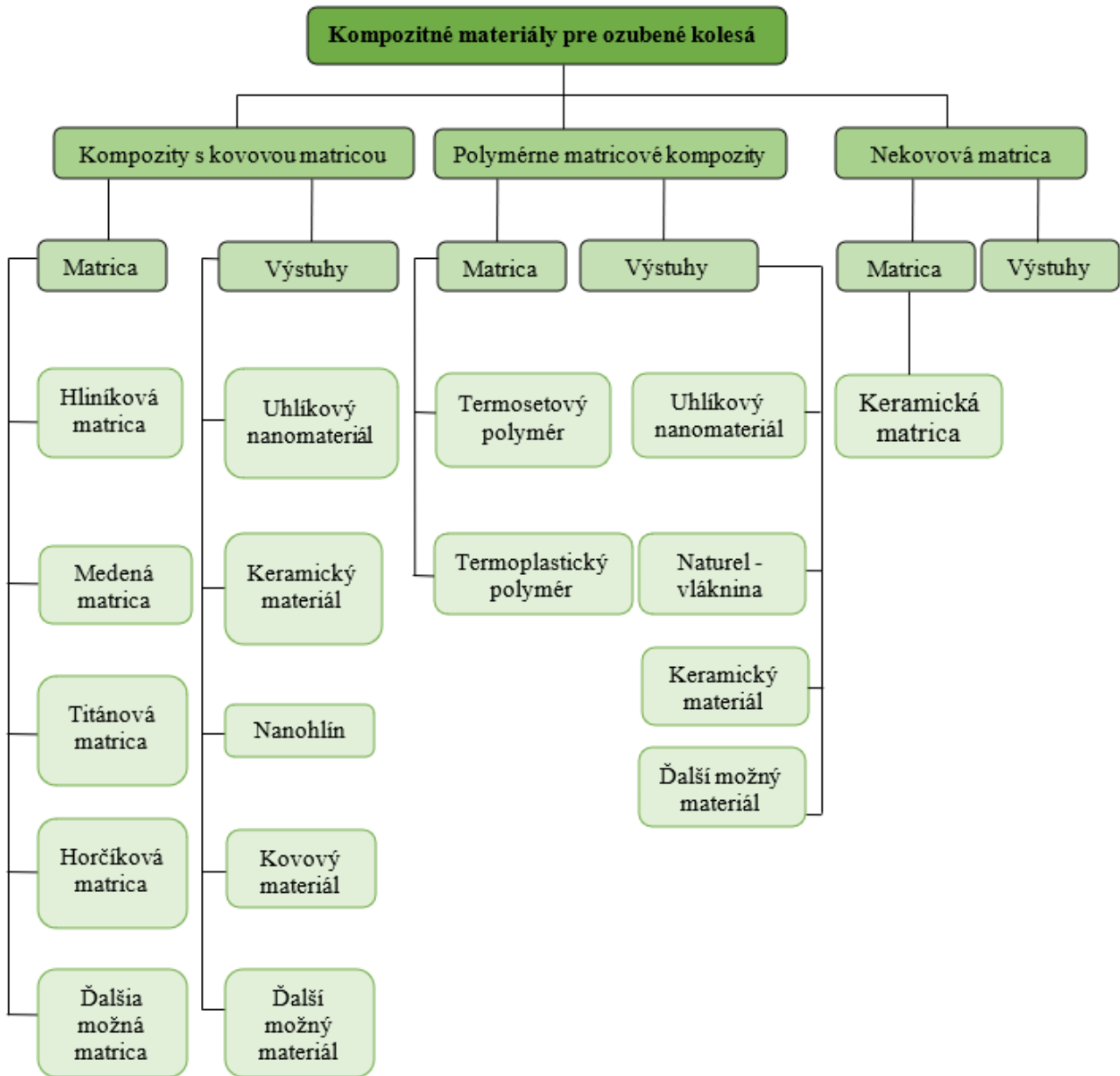
- prenos vonkajšieho zaťaženia na spevňujúcu zložku,
- má mať nižší bod tavenia ako je bod tavenia vlákien, ktoré ich spevňujú,
- má byť ťažnejšie ako vlákna, mať nižší modul pružnosti,

- ochrana vlákien.

Druhá zložka, vložená fáza (armatúra), plní funkciu výstuže, ktorá má najčastejšie spevňujúci účinok.

Pojem „armujúci“ (vystužujúci, plniaci) znamená zavedený do materiálu s cieľom zmeny jeho vlastností (nejde nutne o „spevňujúci“).

- *tlmiaci účinok* - pre mnohých je rozhodujúcim faktorom tichosť celého procesu. Kompozitné materiály môžu poskytnúť lepšie tlenie hluku a vibrácií, čo znižuje hluk prevodových mechanizmov. Komplexné profily zubov a integrované tlmiace prvky sa dajú vyrobiť



Obr. 7. Prehľad kompozitných materiálov pre ozubené kolesá

2.1 Kompozitné materiály pri výrobe ozubených kolies

Kompozitné materiály sú čoraz viac uznávané ako vynikajúca možnosť pre ozubené kolesá oproti kovu v rôznych aplikáciách, a to vďaka niekoľkým kľúčovým výhodám [7] ako - znížená hmotnosť, nižšie náklady, lepšia flexibilita dizajnu a zvýšená odolnosť proti korózii .

Charakteristika výhod kompozitných ozubených kolies:

jednoduchšie v porovnaní s kovovými ozubenými kolesami. Okrem toho hybridné kovovo-kompozitné konštrukcie môžu kombinovať pevnosť kovu s vlastnosťami kompozitov tmiť hluk, čím ponúkajú vyvážené riešenie, najmä v automobilovom priemysle, elektronike alebo presnom strojárstve,

- *odolnosť proti korózii* - na rozdiel od kovových ozubených kolies, ktoré môžu byť náchylné na hrdzavenie a koróziu, kompozitné ozubené kolesá ponúkajú inherentnú odolnosť proti

korózii [6]. Vďaka tomu sú obzvlášť vhodné pre prostredia vystavené chemikáliám alebo vlhkosti, ako sú námorné alebo priemyselné aplikácie,

- *zníženie hmotnosti* - kompozity môžu byť ľahšie ako tradičné kovové materiály, čo vedie k zníženiu celkovej hmotnosti ozubených kolies. Toto je obzvlášť dôležité v aplikáciách, ako sú automobilové ozubené kolesá alebo letecké systémy, kde je potrebné minimalizovať hmotnosť, aby sa zlepšil výkon a účinnosť,
- *cenová efektívnosť* - kompozitné ozubené kolesá môžu tiež poskytnúť ekonomickejšie riešenie. Ich výrobné procesy, ako je lisovanie alebo extrúzia, sú vo všeobecnosti rýchlejšie a menej energeticky náročné ako tie, ktoré sa používajú na kovové ozubené kolesá. Eliminujú tiež potrebu drahých zliatin alebo špecializovaných úprav, čo vedie k celkovo nižším výrobným nákladom.

Kompozitné ozubené kolesá sa delia do troch skupín na základe typu matrice:

- a) ozubené kolesá z polymérnej matrice (*PMC*),
- b) ozubené kolesá z kovovej matrice (*MMC*),
- c) ozubené kolesá z nekovovej matrice (*NMMC*).

Spomedzi nich sú *PMC* najpoužívanejšie a výrobný proces je relatívne vyspelý.

Zároveň, v porovnaní s inými kovmi, viskoelastické vlastnosti polymérov môžu potlačiť vibrácie, znížiť údržbu a znížiť celkové náklady [1]. Medzi bežne používané kompozitné výstuže patrí *karbid kremíka (SiC)*, *karbid volfrámu (WC)*, *uhlíkové vlákno (CF)*, sklenené vlákno (*GF*), *nanoil*, *grafén* a *uhlíkové nanotrúbice (CNT)*. Keďže polymérne kompozity vystužené uhlíkovými vláknami majú lepšiu odolnosť proti nárazu a pomer pevnosti k hmotnosti, očakáva sa, že nahradia tradičné kovové materiály v mnohých aplikačných oblastiach, ako sú automobily a lietadlá. Kompozity vystužené *uhlíkovými* nanomateriálmi, ako je grafén, preukázali veľký potenciál v mnohých priemyselných aplikáciách vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, tepelným vlastnostiam a odolnosti voči korózii [10]. Okrem toho sa na kompozitné ozubené kolesá neustále používajú aj ekologické materiály, ako sú prírodné vlákna [14]. Matricové materiály a výstuže bežne používaných kompozitných ozubených kolies sú znázornené na obr. 7.

3 HYBRIDNÉ PREVODY

S požiadavkou na zlepšenie odolnosti prevodovky a zníženie spotreby energie pri vysokom zaťažení sa vyvíjajú hybridné kovovo-kompozitné prevody kombináciou výhod kovových a kompozitných prevodov. Koncept hybridnej prevodovky prvýkrát

predstavil v roku 2012 tím z výskumného centra *NASA Glenn Research Center* a *Army Research Laboratory* (obr. 8a). Vyvinutá hybridná prevodovka dokáže prenášať rovnakú veľkosť krútiaceho momentu ako celokovová tradičná prevodovka. Typický hybridný kovovo-kompozitný prevod (obr. 8b) pozostáva z kovových zubov, kovového ráfiku, kovového náboja a kompozitného pásu. Aby sa zabezpečila dostatočná pevnosť a tuhosť hybridného ozubeného kolesa ako celku, kompozitná stojina je upevnená s kovovým ráfikom a nábojom v obvodovom smere pomocou drážkovaných upevňovacích konštrukcií.

Hybridné oceľovo-kompozitné ozubené kolesá, ktoré kombinujú oceľové zuby s kompozitným jadrom, sú rýchlo sa rozvíjajúcou technológiou na zníženie hmotnosti.

Najbežnejší prístup k odľahčeniu ozubených kolies je založený na odstraňovaní materiálu, napríklad vytvorením otvorov v tele ozubeného kolesa.

Handschuh a kol. [2] navrhli zníženie hmotnosti navrhnutím hybridnej kovovo-kompozitnej konštrukcie, v ktorej je teleso vyrobené z triaxiálneho opleteného kompozitu, zatiaľ čo zuby sú vyrobené z ocele. Autori preukázali zníženie hmotnosti približne o % v porovnaní s kovovým ozubeným kolesom s rovnakou makrogeometriou.

Táto štúdia bola vykonaná s cieľom preskúmať súčasný stav materiálov ozubených kolies s cieľom zlepšiť ich životnosť.

V budúcnosti bude cieľom práce ukázať, ako použitie kompozitného telesa ovplyvňuje správanie hybridných kovovo-kompozitných ozubených kolies počas záberu.

ZÁVER

Ozubené kolesá sú dôležitými mechanickými komponentmi mnohých strojov a zariadení. Ako kľúčové prvky v technológii a priemysle zabezpečujú prenos pohybov a síl z jedného hriadeľa na druhý. Ozubené kolesá sa delia na rôzne typy podľa ich konštrukcie a funkcie, a materiály sa vyberajú podľa konkrétnych aplikácií. Materiál ozubeného kolesa má veľký vplyv na výkon ozubeného kolesa. Preto je potrebné vhodné zvolenie jeho materiálu. Výber konkrétnych materiálov ozubených kolies je určený najmä veľkosťou zaťaženia počas prevádzky ozubeného kolesa, úrovňou rýchlosti a požiadavkami na presnosť ozubeného kolesa. Mnohé problémy s ozubenými kolesami sa vyriešia kompozitnými materiálmi. Kompozity sú kompozitné materiály vytvorené fyzikálnym spojením rôznych jednoduchých materiálov. Sú moderné, ale nie univerzálne materiály. Jednou z hlavných výhod

kompozitných ozubených kolies je ich výrazne nižšia hmotnosť v porovnaní s kovovými ozubenými kolesami. Na rozdiel od kovových ozubených kolies, ktoré môžu byť náchylné na hrdzavenie a koróziu, kompozitné ozubené kolesá ponúkajú inherentnú odolnosť voči korózii. Tento typ ozubených kolies ponúka presvedčivú alternatívu ku kovovým ozubeným kolesám, najmä ak je kritické zníženie hluku, úspora hmotnosti a flexibilita dizajnu. Zatiaľ čo ich počiatočné náklady môžu byť vyššie, dlhodobé výhody z hľadiska zníženej údržby, účinnosti a výkonu často prevažujú nad týmito počiatočnými investíciami. S neustálym pokrokom v materiáloch sa kompozity stávajú čoraz atraktívnejšou možnosťou pre konštrukciu prevodov, poskytovaním tichého chodu a výkonu, ktoré mnohé priemyselné odvetvia hľadajú.

PodĎakovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov:

KEGA 037TUKE-4/2024 - Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie.

KEGA 044TUKE-4/2024 - Aplikácia virtuálnej a rozšírenej reality vo vzdelávaní s cieľom inovácie študijných programov.

VEGA 1/0573/25 - Výskum, vývoj a testovanie ladičov torzných vibrácií.

LITERATÚRA

- [1] DENG, X., LI, D. - YOU, Y. (2013): *Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites*. In: Mater. and Design., Vol. 46, No. 12, pp. 809-815, ISSN 0261-3069.
- [2] HANDSCHU, R. F. et al. (2014): *Hybrid gear*. In: Tech Briefs, NASA Glenn Research Center, November 2014, Refer to LEW-18516-1.
- [3] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. In: MM Science Journal. - Praha (CZ): MM Publishing, roč. 2022-November, pp. 6014-6019 [print, online], ISSN 1803-1269.
- [4] JARRETT, W. et al. (2023): *The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: a review*, Composite Structures, Vol. 320, 117203, ISSN 0382-5238.
- [5] BORYSOVSKA, K. - VERBYLO, D. - PODREZOV, Y. - SZAFRAN, M. (1995): *The structural optimization of ceramic-organic*

composites. In: Archives of Metallurgy and Materials, 54, 4, pp. 875-879.

[6] JEONG, S. - LEE, S. G. (1995): *Development of the composite flexspline for a cycloid-type harmonic drive using net shape manufacturing method*. In: Composite Structures 32, pp. 557-565.

[7] KUMA, V. S. et al. (2021): *Design and Analysis of Composite Spur Gear*. In: Journal of Physics : Conference Series, pp 2-14, Conf. Ser. 1964 062100.

[8] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from modelmaterial*. In: MMS 2017 MATEC Web of Conference, pp. 157.

[9] MALÁKOVÁ, S. et al. (2021): *Influence of the shape of gear wheel bodies in marine engines on the gearing deformation and meshing stiffness*. In: Journal of Marine Science and Engineering. Basel (Ch): Multidisciplinary Digital Publishing Institute Yer. 9, no. 10, pp. 1-22, [online], ISSN 2077-1312.

[10] MOHAN, V. B. - LUA, K. - HUI, D. - BHATTACHARY, D. (2018): *Graphene-based materials and their composites*. In: A review on production, applications and product limitations, Vol. 142, 1, pp. 200-220, ISSN 0152-2636.

[11] MANTIČ, M. - KUEKA, J. (2022): *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam (NL), Elsevier, roč. 141, pp. 1-12, [print, online], ISSN 1350-6307.

[13] MONKOVA, K. et al. (2019): *Effect of the Weight reduction of a Gear Wheel on Model Characteristics*. In: MATEC Web Conf., 2, Vol. 299, pp. 1-6.

[14] PAIRGEARS (2024): *Perfect Gear Pairing*. In: Choosing the Right Material for Gears: And Overview, https://www.pairgears.com/blog/Choosing-the-Right-Material-for-Gears-An-Overview_b961.

[15] SHEN, X. - JIA, J. - CHEN, C. - LI, Y. - KIM, J. (2014): *Enhancement of mechanical properties of natural fiber composites via carbon nanotube addition*. In: Journal of Mater. Sci., 49, No. 8, pp. 3225-3233.

[16] ZHANG, J. et al. (2016): *A comparison of the effects of traditional shot peening and micro-shot peening on the scuffing resistance of cerburized and quenched gear steel*, Vol. 368-369, pp. 253-257, ISSN 0255-3898.

Explozivne tvárnenie dielcov a jeho podstata

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

Explosive forming of parts and its essence

Abstract: The article focuses on explosive forming of metals, in this case pipes, where the text provides the necessary information about the process of this type of forming. In the second part, based on knowledge from the theory of metal forming, a theoretical analysis of the process is given.

Keywords: pipe, explosive forming, safety, forming technology, loading.

ÚVOD

Explozivne tvárnenie je technológia, ktorá využíva energiu chemickej reakcie výbuchu na formovanie a úpravu kovov. Je to proces, pri ktorom sa využívajú výbuchy na deformáciu materiálu, konkrétne kovových rúrok, do požadovaného tvaru. Tento proces sa často používa na výrobu rúrok, ktoré majú byť schopné odolávať veľmi vysokým tlakom alebo teplotám, ako aj v prípadoch, keď je potrebné vytvoriť materiály s špecifickými mechanickými vlastnosťami [1-3]. Historicky spadajú počiatky tejto technológie do konca 19. storočia, čiže ide o relatívne dlhodobý známy spôsob výroby. Prišlo sa na to, že kovy aj veľmi málo tvárne a pevné sa dajú s úspechom tvárniť (deformovať) pri zaťažovaní veľkou rýchlosťou. Veľké rýchlosti sa technicky najjednoduchšie dosiahnu výbuchom, pri ktorom sa uvoľní veľká energia. V zozname literatúry sú diela, ktoré možno hodnotiť ako klasické. Uvádžeme niektoré z nich, ktoré si dodnes podržali vysoký podiel potrebnej výpovednej hodnoty. Ide o tieto bazálne práce, v ktorých sú uvedené nielen teoretické analýzy, ale aj technologické riešenia a potrebné poznatky o procese explozivneho tvárnenia kovov: Reinhart, F. (1968), Eder, F. X., Wisotzki, H. J. (1967), Smrčka, J., Václavek, M. (1964), Beránek, J. (1964), Pásek, V. a kol. (1964).

1 ZÁKLADY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

- *princíp procesu:* explozivne tvárnenie vychádza z využitia mechanických účinkov výbuchu na deformáciu materiálu. Pri výbuchu sa uvoľní

obrovské množstvo energie, ktorá spôsobí rýchlu expanziu vzduchu, a tým tlakové vlny, ktoré sa šíria v materiáli a deformujú ho. Tento proces umožňuje získať veľmi presné a kvalitné tvarovanie kovov [2, 3].

- *súčasť procesu:* proces explozivneho tvárnenia zahŕňa nasledujúce kroky:
 - *príprava materiálu:* kovové dielce sú pripravené na spracovanie.
 - *umiestňovanie nálož:* na vonkajšiu alebo vnútornú stranu výtvarku sa umiestni výbušnina.
 - *výbuch:* výbušnina sa detonuje, čím vzniká tlaková vlna, ktorá deformuje výrobok do požadovaného tvaru.
 - *ochladzovanie:* po výbuchu sa materiál ochladí a stabilizuje.

2 TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ V EXPLOZÍVNOU TVÁRNENÍ

Existuje niekoľko variantov explozivneho tvárnenia, ktoré sa využívajú v rôznych odvetviach:

- *explozivne zváranie:* aplikuje sa pri zváraní kovových materiálov, kde sa rúrky alebo plechy spájajú výbuchom, čo umožňuje vytváranie pevných a odolných spojov,
- *explozivne formovanie:* pri takomto type sa používajú výbuchy na formovanie rúrok do špecifických tvarov. Tento proces je obzvlášť užitočný v prípadoch, keď je potrebné vytvoriť veľmi tenké alebo extrémne silné materiály,

- *explozívna konsolidácia*: proces sa používa na zlepšenie hustoty materiálov, kde sa rúrky komprimujú za pomoci explózie do požadovaného tvaru bez potreby použitia dodatočných nástrojov.

3 VÝHODY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

- *vyššia pevnosť a odolnosť*: explozívne tvárnenie umožňuje dosiahnuť materiály s veľmi vysokou pevnosťou, odolnosťou proti nárazom a vyššími mechanickými vlastnosťami,
- *zníženie nákladov na výrobu*: proces môže znížiť náklady na výrobu niektorých produktov, ktoré by boli inak veľmi nákladné, ak by sa vyrábali tradičnými metódami,
- *rýchlosť procesu*: explozívne tvárnenie je rýchle a efektívne, čo je výhodné v prípade, ak je potrebné vyrábať veľké množstvo produktov v krátkom čase,
- *vytváranie tvarov, ktoré sú inak ťažko dosiahnuteľné*: výbuchom sa môžu dosiahnuť veľmi komplikované tvary, ktoré sú nedajú vyrobiť klasickými metódami, ako je trieskové obrábanie.

4 APLIKÁCIE EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA RÚROK

Explozívne tvárnenie rúrok nachádza uplatnenie v rôznych priemyselných oblastiach [4-7]:

- *ropa a plyn*: rúrky používané v ropných a plynových vrtov sú často vystavené extrémnym podmienkam. Explozívne tvárnenie zabezpečuje, že tieto materiály budú mať potrebnú odolnosť a flexibilitu.
- *letecký priemysel*: rúrky, ktoré sa používajú v leteckých motoroch, musia byť extrémne pevné a odolné. Explozívne tvárnenie poskytuje ideálne riešenie.
- *jadrový priemysel*: v jadrových elektrárnach sa používajú rúrky, ktoré musia odolávať vysokým teplotám a tlakom. Tento proces umožňuje vytváranie rúrok s optimálnymi vlastnosťami pre tieto náročné aplikácie.
- *automobilový priemysel*: v automobiloch, najmä v komponentoch motorov a výfukových systémoch, sa používajú rúrky s vysokou odolnosťou. Explozívne tvárnenie pomáha dosiahnuť požadovanú odolnosť pri zachovaní optimálnej hmotnosti.

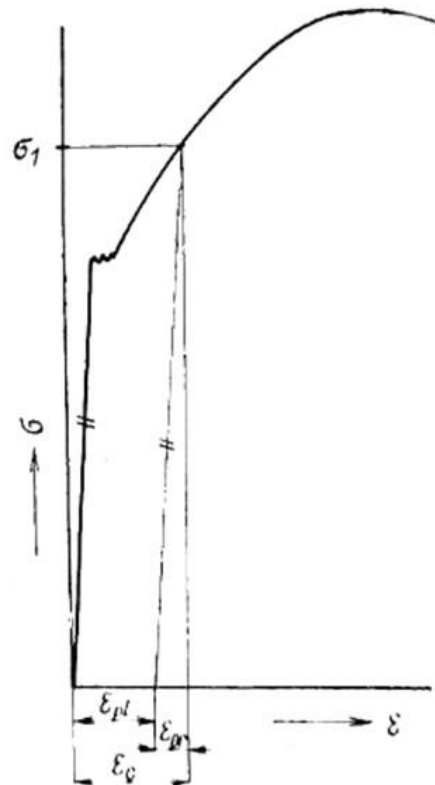
5 VÝHODY A NEVÝHODY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

Aj keď explozívne tvárnenie prináša množstvo výhod, existujú aj určité obmedzenia [5, 6]:

- *vysoké náklady na zariadenie*: počiatočné náklady na zariadenia potrebné pre explozívne tvárnenie môžu byť vysoké, čo môže odrádzať od aplikácie spôsobu tvárnenia.
- *bezpečnosť*: výbušniny a manipulácia s nimi predstavujú riziká, ktoré musia byť dôsledne kontrolované.
- *kontrola kvality*: napriek veľkej efektívnosti procesu sa vyžaduje presná kontrola, aby bola zabezpečená kvalita vyrobených produktov.

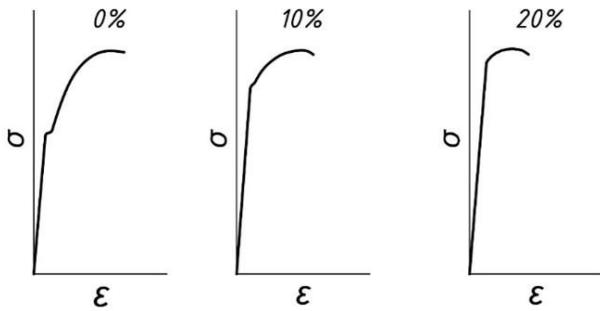
6 POZNATKY O PROCESE VÝBUCHOVÉHO TVÁRNENIA KOVOV

Aplikácia technológie tvárnenia explóziou je spojená s podstatne odlišným spôsobom zaťažovania tvárneného materiálu a nástrojov, než ako je to pri tvárnení na tvárniacich strojoch. Pretože rázové pôsobenie sily na kov môže spôsobiť, že sa pri nesprávnom využití explozívneho spôsobu tvárnenia, čiže nesprávnom a nevhodnom aplikovaní explozívnej sily na kov môže spôsobiť, že sa poruší tvárnený materiál, je potrebné sa zamerať nielen na vypracovanie technológie explozívneho tvárnenia, teda na stanovení veľkosti a rozložení výbušnej nálože. Pri tomto je potrebné zistiť vplyv rázového pôsobenia sily na zmenu mechanických vlastností tvárneného materiálu. (obr. 1). V tomto odseku je pozornosť zameraná na zmenu a charakter pôsobenia rázovej sily na kov [8-10].



Obr. 1. Veľkosť pomernej deformácie pri zaťažení na hodnotu napätia σ_1 pomerná plastická deformácia, celková pomerná deformácia ϵ_c , pružná pomerná deformácia ϵ_{pr}

6.1 Vplyv rýchlosti deformácie na mechanické vlastnosti materiálu



Obr. 2. Sprevnenie materiálu po tvárnení za studena

Pri zvyšovaní rýchlosti deformácie sa priebeh diagramu σ - ε mení, a to najmä vo svojej časti nad medzou klzu a hodnota medze klzu sa zvyšuje (obr. 2). Zvyšovanie medze klzu je dôležité z hľadiska tvárnenia, pretože má vplyv na veľkosť potrebnej deformačnej sily. Medza klzu sa dá, ako je známe, stanoviť podľa používaného *Becker-Owovanovho* vzťahu:

$$\sigma_k = \sigma_p \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}} \cdot \log a - \log \varepsilon' \right]. \quad (1)$$

V rovnici (1) je σ_k medza klzu pri deformačnej rýchlosti $\dot{\varepsilon}$ a σ_p je medza pevnosti pri statickom namáhaní. Hodnota $\sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}}$ je pre určitý materiál

konštantou (pri predpoklade $t = \text{konšt.}$) a hodnota $\log a$ je druhá konštanta materiálu. Pre ocel s 0,05 % C udávajú *Ederer a Wisotzki* [6] túto hodnotu konštant:

$$\sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}} = 0,21, \quad \log a = 2,65 \quad (2)$$

Medza klzu sa zvyšuje pre rôzne materiály v závislosti od rýchlosti deformácie aj nad medzu pevnosti. Pri predpoklade, že napätie a deformácia materiálu sú rovnomerne rozložené, v tom prípade sa deformačná rýchlosť rovná:

$$\varepsilon' = \frac{u}{h}. \quad (3)$$

V prípade, ak sa deformujúci nástroj pohybuje rýchlosťou u , urazí za krátky čas Δt dráhu:

$$\Delta s = \Delta t \cdot u. \quad (4)$$

Táto dráha je vlastne hodnota stlačenia Δh . Dosadením do vzťahu:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\Delta t} = \frac{\Delta t \cdot u}{\Delta t \cdot h} = \frac{u}{h}. \quad (5)$$

vyplynie, že rýchlosť deformácie pre takýto prípad sa rovná pomeru rýchlosti k výške deformovaného materiálu. Z uvedeného sa dá odvodiť, že pri rovnakej rýchlosti nástroja bude deformačná rýchlosť pri odlišne vysokých vzorciach rozličná. Rýchlosť

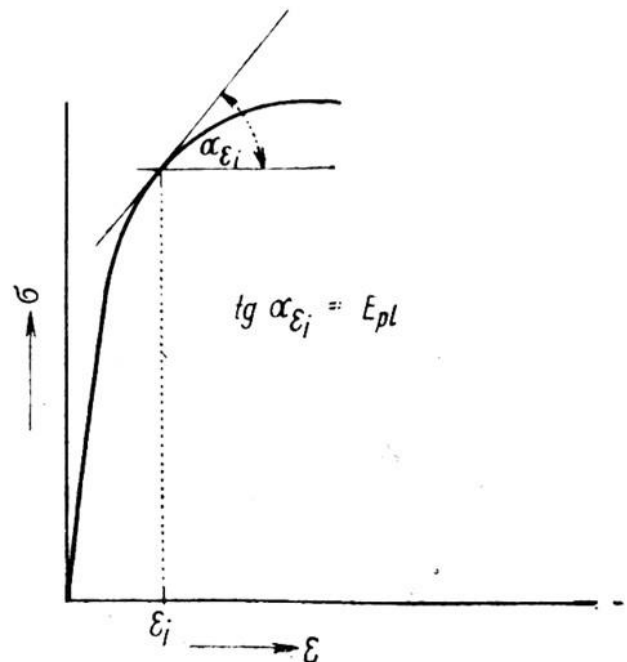
deformácia sa takto mení v širokých medziach len vplyvom výšky deformovaného materiálu, a následkom tohto sa mení medza klzu a deformačný odpor.

6.2 Rýchlosť šírenia plastickej deformácie

Pri prekročení medze klzu sa vytvárajú plastickej deformácie. Tieto deformácie sa šíria v materiáli určitou rýchlosťou, ktorá je však závislá od veľkosti príslušnej deformácie. Uvažuje sa prípad, kedy dlhá tyč je namáhaná ťahom rázom, a to rýchlosťou väčšou, než odpovedá medzi klzu. Podľa *Th. Kármána*, ktorý odvodil vzorce pre šírenie plastickej deformácie, sa vznikajúca plastickej deformácia šíri v materiáli rýchlosťou, ktorá je daná výrazom:

$$D_p \cdot L = \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \cdot \rho. \quad (6)$$

Člen v čitateli zlomku rovnice (6) sa nazýva modul plasticity E_{pl} . Je to vlastne tangens uhla, ktorý zvierá dotyčnica vedená v bode ε_1 ku krivke σ - ε s osou ε . Na obr. 3 je táto dotyčnica naznačená pre veľkosť pomerného predĺženia.



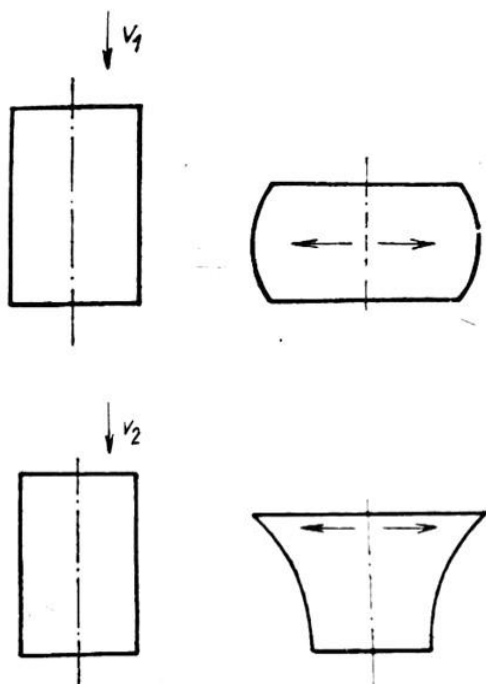
Obr. 3. Znárodnenie modulu plasticity pre hodnotu pomerného predĺženia ε_1

Z priebehu krivky σ - ε (obr. 3) je vidno, že modul plasticity pre vyššie hodnoty pomerného predĺženia sa neustále znižuje. To znamená, že rýchlosti, ktorými sa budú tieto deformácie šíriť budú stále nižšie. Výpočtami aj experimentálne bolo zistené, že pri určitej nárazovej rýchlosti opäť vzniká určitá konštantná deformácia, ktorá však pozvoľna prechádza čelom plastickej vlny do oblasti nedeformovaného materiálu. Veľkosť tejto pomerného deformácie v závislosti od rýchlosti je daná výrazom:

$$u = \int_0^\varepsilon \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot d\varepsilon} \cdot d\varepsilon \quad (7)$$

Pretože však výraz pod odmocninou závisí od všeobecnej krivky σ - ε nedá sa rovnica riešiť výpočtom a je nutné ε_{\max} stanoviť graficky. Hľadané ε_{\max} je horná medza integrálu.

Na obr. 4 sú schematicky naznačené tvary valčekov po klasickej a vysokorýchlostnej deformácii.



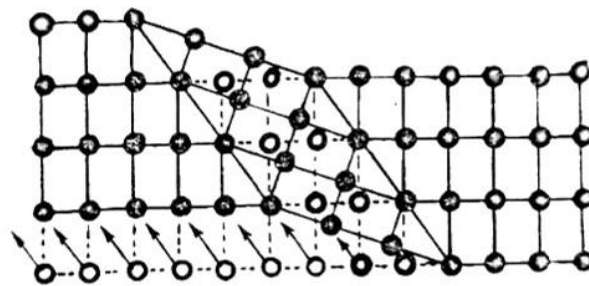
Obr. 4. Tvar valčekov po deformácii pomalou rýchlosťou v_1 (hore) a deformácia vysokou rýchlosťou $v_2 \gg v_1$ (dole)

6.3 Mikroskopické zmeny materiálu pri tvárnení výbuchom

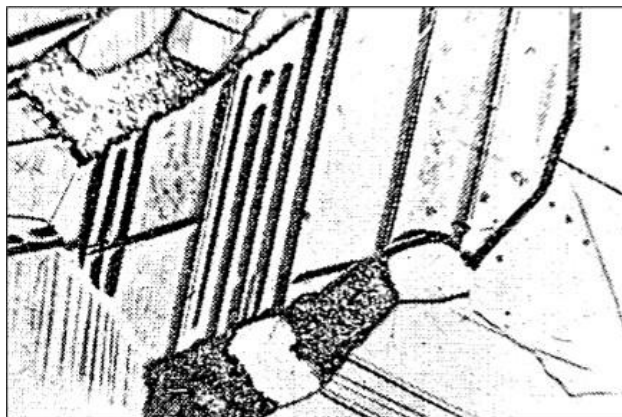
Na obr. 5 až obr. 7 sú zachytené zmeny materiálu po deformácii výbuchom.



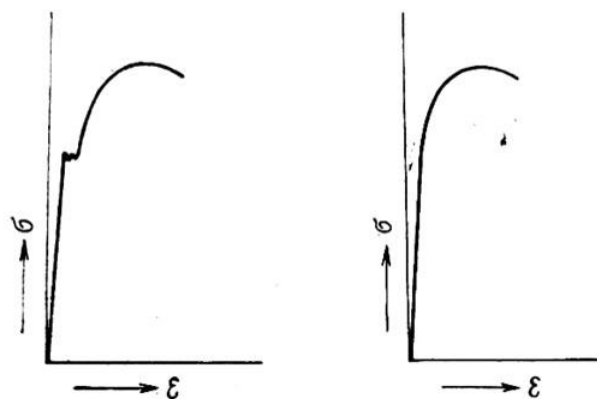
Obr. 5. Vzhľad klzných čiar v mikroštruktúre ocele (zv. 300x)



Obr. 6. Schéma dvojčatenia, kedy sa vrstva atómov natočí a tak umožní deformáciu



Obr. 7 Vzhľad radu dvojčiat v mikroštruktúre bežnej ocele (zv. 1 500x)



Obr. 8. Vplyv pôsobenia silnej rázovej vlny na priebeh diagramu σ - ε : a) oceľ 11 373 v normálnom stave, b) oceľ 11 373 ovplyvnená explóziou

ZÁVER

Explozívne tvárnenie rúrok je inovatívny a efektívny proces, ktorý sa používa na výrobu vysoko odolných materiálov pre rôzne priemyselné aplikácie. Aj keď tento proces vyžaduje vysoké technologické vybavenie a dodržiavanie bezpečnostných opatrení, jeho výhody v podobe vyššej pevnosti, rýchlosti výroby a schopnosti formovať zložité tvary sú nezanedbateľné. S rastúcimi požiadavkami na kvalitné materiály v náročných podmienkach, explozívne tvárnenie bude aj naďalej zohrávať dôležitú úlohu v rozvoji moderných technológií.

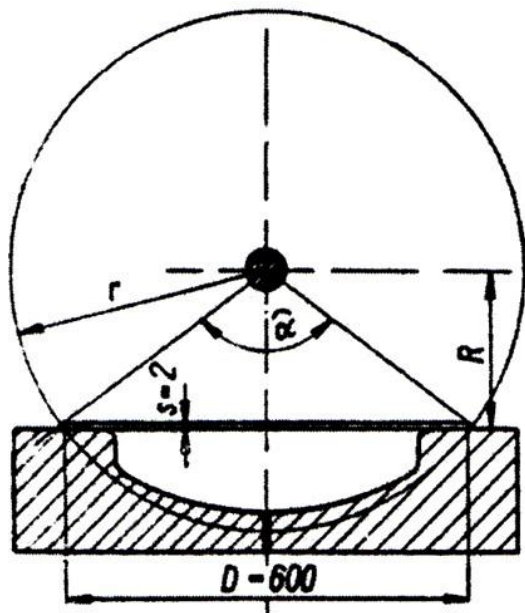
LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. - BÍLIK, J. (2022): *Technológia tvárnenia v 99 heslách*. EDIS vydavateľstvo UNIZA.
- [2] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metódy tvárnenia*. EDIS vydavateľstvo UNIZA.
- [3] ŽÍDEK, M. - DĚDEK, V. - SOMMER, B. (1988): *Tváření oceli*. SNTL-ALFA, Praha.
- [4] BLAŠČÍK, K. - POLÁK, K. (1985): *Teória tvárnenia*. ALFA- SNTL Bratislava.
- [5] REINHART, F. (1968): *On fractures caused by Explosions and Impacts*. Golden, Colorado.
- [6] EDER, F. X. - WISOTZKI, H. J. (1967): *Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf Lage und Ausbildung der Streckgrenze bei Stahl*. Z. Metallkunde heft 48, No. 10.
- [7] SMRČKA, J. - VÁCLAVEK, M. (1964): *Explozivní tváření plechů a trub*. Knižnice strojírenské výroby, SNTL Praha.
- [8] BERÁNEK, J. (1964): *Tváření výbuchem*. Práce Praha.
- [9] PÁSEK, V. a kol. (1964): *Pokrokové způsoby tváření*. SNTL Praha.
- [10] FARLÍK, A. - ONDRÁČEK, E. (1968): *Teorie dynamického tváření*. SNTL Praha.

DODATOK

Výpočet množstva nálože

Na obr. 9 je schéma usporiadania explozívneho tvárnenia pre tvárnenie kotlového dna [1, 2, 4, 7, 8].



Obr. 9. Geometrické údaje pre výpočet nálože pri tvárnení kotlového dna

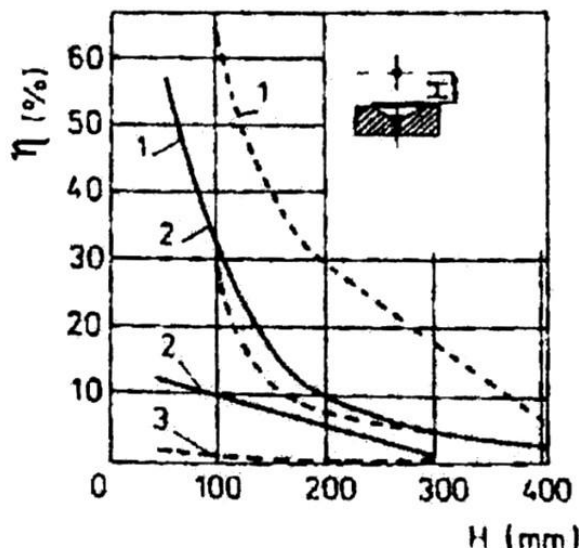
Pri tejto technologickej operácii dochádza k stratám v prenosovom prostredí (plyn, kvapalina, sypký materiál) a využitie je iba pri určitom uhle α (obr. 9).

Skutočná potrebná hmotnosť výbušniny m_s sa určí z rovnice:

$$m_s = \frac{A_{krit}}{Q \cdot \eta} \quad (8)$$

kde: A_{krit} - merná deformačná energia,
 Q - energia trhaviny,
 η - účinnosť.

Hodnoty účinnosti η v závislosti od parametrov procesu výbušniny sú na obr. 10.



Obr. 10. Závislosť účinnosti η od vzdialenosti výbušniny H a druhu prenosového média: 1 - voda, 2 - piesok, 3 - vzduch

Uvedené údaje slúžia na doplnenie tejto zložitej problematiky. Matematické vyjadrenie v_{kr} je dané vzťahom:

$$v_{kr} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot \int_0^{\epsilon_{max}} \sqrt{\frac{d\sigma}{d\epsilon}} \cdot d\epsilon. \quad (9)$$

Pre výpočty v priemyselných aplikáciách bol stanovený nasledujúci vzťah medzi v_{kr} a maximálnou mernou deformačnou prácou a_{kr} :

$$v_{kr} = \sqrt{2 \cdot \frac{a_{kr}}{\rho}}. \quad (10)$$

Pri výpočte nálože sa musia rešpektovať:

- kvalita materiálu v_{kr} [$m \cdot s^{-1}$],
- rozmer materiálu, t. j. plocha S [m^2], objem V [m^3],
- druh výbušniny - trhaviny (výbuchové teplo Q [$kJ \cdot kg^{-1}$]),
- tvar výbušniny (stupeň priestorového využitia α [%]),
- prenosové prostredie (celková účinnosť tvárniaceho procesu η_c [%]),

- celkové geometrické usporiadanie (α [%]).

Má sa určiť A_{kr} , hmotnosti m'' a m' , $v_{kr} = 60,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pre oceľ 12 010.

1. Z rovnice pre $v_{kr} \Rightarrow a_{kr} = \frac{1}{2} \cdot v_{kr}^2 \cdot \rho = 150 \text{ J}$.
2. Kruhový prístrih $\varnothing D = 600 \text{ mm}$, $t = 2 \text{ mm}$ má objem $V = \frac{\pi}{4} \cdot 60^2 \cdot 0,2 = 0,000656 \text{ m}^3$.
3. Kritické množstvo deformačnej práce je $A_{kr} = a_{kr} \cdot V = 81,3 \cdot 10^2 \text{ J}$.
4. Priemyslová výbušnina má výbuchové teplo $Q = 2100 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Hmotnosť nálož je zodpovedajúca požiadavke je $m'' = \frac{A_{kr}}{Q} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$.

5. Nálož m'' je ideálna, neuvažuje so stratami. Pre tento prípad je $\eta_c = 7 \%$.

$$\eta_c = \eta_{ch} \cdot \eta_t$$

η_{ch} - chemická účinnosť tvárniaceho procesu,

η_t - technologická účinnosť tvárniaceho procesu,

$$m' = \frac{m''}{\eta_c} = 5,45 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$$

Pri tvárnení sa využije iba časť energie z m'' obsiahnutá v priestore α . Pri guľovom tvare nálož sa predpokladá tvar rázovej vlny guľový a tzv. stupeň priestorového využitia a je daný pomerom objemu guľového výseku s vrcholovým uhlom $\hat{\alpha}$ k objemu poglobule s polomerom r . Pre tento prípad je $\alpha = 11^\circ$. Hmotnosť nálož:

$$m = \frac{m'}{\alpha} = \frac{A_{kr}}{Q \cdot \alpha \cdot \eta_c} = 0,496 \text{ kg}$$

Hmotnosť nálož m je maximálna hodnota, ktorá teoreticky zaručuje plastický stav materiálu určeného na tvárnenie, uloženého voľne na lisovnici.

Interakcia medzi materiálom, tepelným spracovaním a pevnostným výpočtom v návrhu ozubených prevodov

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.*

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

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.

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

Interaction between Material, Heat Treatment, and Strength Calculation in Gear Transmission Design

Abstract: This paper investigates the complex interaction between material selection, heat treatment processes, and strength calculation methodologies in the design of gear transmissions. The mechanical performance and durability of gears are highly dependent on the choice of base material and the subsequent thermal treatments applied to optimize their microstructure and mechanical properties. We analysed how different heat treatment techniques, such as carburizing, quenching, and tempering, influence the microstructural characteristics and fatigue strength of common gear materials. Furthermore, the study evaluates how these material and heat treatment factors are integrated into strength calculation models used in gear design to predict operational lifespan and reliability. Experimental data and numerical simulations are employed to validate the correlation between processing parameters and gear performance. The findings highlight the critical role of a holistic design approach that considers material properties, heat treatment parameters, and accurate strength calculations to enhance gear transmission efficiency and longevity.

Keywords: gear transmission, material selection, heat treatment, strength calculation, fatigue life, Design, thermal processing.

ÚVOD

Ozubené prevody patria k najstarším a zároveň najrozšírenejším mechanickým prvkom používaným na prenos pohybu a krútiaceho momentu medzi rôznymi časťami strojov. Ich história siaha až do staroveku, keď už v starovekom Grécku a Ríme používali jednoduché mechanizmy s ozubenými kolesami na prenášanie pohybu v rôznych strojoch, napríklad v hodinách alebo mlynských zariadeniach. S nástupom priemyselnej revolúcie v 18. a 19. storočí sa použitie ozubených prevodov výrazne rozšírilo a zdokonalilo, čím sa stali nevyhnutnou súčasťou prakticky všetkých moderných strojov a zariadení - od automobilov cez letecké pohonné systémy až po presné priemyselné stroje. V súčasnosti sú ozubené prevody považované za najpoužívanejší a najspoľahlivejší prevodový mechanizmus v strojárstve vďaka ich schopnosti prenášať veľké

krútiace momenty s vysokou účinnosťou a presnosťou.

Spoločnosť a životnosť prevodového mechanizmu však nezávisia len od jeho správneho geometrického návrhu, ktorý zabezpečuje optimálne prevodové pomery a zníženie strát, ale aj od vhodného výberu materiálu a následného tepelného spracovania jeho komponentov. Materiál a jeho spracovanie zásadne ovplyvňujú mechanické vlastnosti ozubených kolies, ako sú tvrdosť, húževnatosť, odolnosť proti opotrebeniu a únave materiálu [1, 2]. Tieto vlastnosti následne určujú schopnosť prevodu odolávať namáhaniu počas prevádzky a zabraňujú vzniku porúch, ktoré by mohli viesť k zlyhaniu celej mechanickej sústavy. Preto je výber materiálu a správne nastavenie tepelného spracovania nevyhnutné pre dosiahnutie optimálnej kombinácie mechanických vlastností, ktoré zabezpečia spoľahlivý

a dlhodobý chod ozubených prevodov v rôznych pracovných podmienkach.

Pevnostný výpočet ozubených kolies predstavuje základný nástroj pre správne dimenzovanie a návrh prevodov. Tento výpočet umožňuje určiť dovolené napätia a únosnosť jednotlivých prvkov ozubeného prevodu tak, aby sa minimalizovalo riziko vzniku trhlín, únavových porúch alebo nadmerného opotrebenia. Historicky sa pevnostné výpočty vykonávali na základe empirických vzorcov a jednoduchých materiálových tabuliek, ktoré často vychádzali z obmedzených experimentálnych dát a skúseností z prevádzky. V posledných desaťročiach však došlo k významnému pokroku v oblasti materiálovej vedy, numerických metód a simulácií, čo umožňuje oveľa presnejšie modelovanie a hodnotenie pevnostných vlastností ozubených prevodov.

Moderné pevnostné výpočty integrujú detailné informácie o mechanických vlastnostiach materiálov vrátane vplyvu rôznych metód tepelného spracovania na tvrdosť, mikroštruktúru a únavové správanie. Často využívajú *metódy konečných prvkov (FEM)* a pokročilé simulačné techniky, ktoré umožňujú komplexne hodnotiť vplyv prevádzkových podmienok a materiálových parametrov na životnosť ozubených kolies. Tento prístup optimalizuje návrh prevodov nielen z hľadiska geometrie, ale aj materiálových vlastností, čím zvyšuje spoľahlivosť a efektívnosť prevodových systémov.

V odbornej literatúre bola v posledných desaťročiach venovaná značná pozornosť vplyvu techník tepelného spracovania na únavové vlastnosti ocelových ozubených kolies [3]. Tepelné spracovanie zásadne ovplyvňuje mikroštruktúru materiálu a jeho mechanické vlastnosti, ako tvrdosť, húževnatosť a odolnosť proti opotrebeniu a únavovému poškodeniu.

Medzi najpoužívanejšie techniky patria *kalenie, cementovanie, nitridovanie a indukčné kalenie* [4, 5]. Každá metóda prináša odlišné mikroštruktúralne a mechanické vlastnosti, ktoré ovplyvňujú výkon a spoľahlivosť prevodov [6]. *Cementovanie* vytvára tvrdý povrch s odolnosťou voči opotrebeniu, zatiaľ čo jadro zostáva húževnaté, čo je dôležité pre absorbovanie dynamických namáhání [7]. *Nitridovanie* poskytuje tvrdý povrch s vynikajúcou odolnosťou voči únavovým poškodeniam, no s menšou hĺbkou účinku [8].

Správna kombinácia materiálu a tepelného spracovania významne zlepšuje únavovú životnosť ozubených kolies [9]. Experimenty ukazujú, že vhodne spracované diely dosahujú podstatne vyšší počet cyklov do vzniku únavovej poruchy v porovnaní s dielmi bez tepelných úprav alebo s nevhodným spracovaním [10].

Okrem výberu metódy kladú autori dôraz na kontrolu technologických parametrov - teploty, doby

spracovania, rýchlosti ochladzovania a atmosféry, ktoré ovplyvňujú kvalitu povrchu, hrúbku kalenej vrstvy a homogenitu mikroštruktúry. Nedostatočná kontrola môže viesť k vnútorným napätiam, mikrotrhlinám a nerovnomernej tvrdosti, predpokladom predčasného zlyhania [11].

Návrh a výroba ozubených prevodov je interdisciplinárna úloha kombinujúca poznatky materiáloveho inžinierstva, výrobnéj technológie a konštrukcie mechanických systémov [12]. Zahnutie materiálových vlastností po tepelnom spracovaní do pevnostných výpočtov a simulácií je dôležité pre spoľahlivejší a ekonomicky efektívny návrh prevodov [13].

Z pohľadu konštruktéra je dôležité pochopiť vzájomné prepojenie medzi materiálom, spôsobom jeho spracovania a výpočtovým modelom. Len komplexný prístup umožní optimalizovať ozubený prevod tak, aby bol nielen pevnostne spoľahlivý, ale aj ekonomicky výhodný, ľahší a energeticky efektívnejší.

Cieľom tejto práce je analyzovať interakciu medzi materiálovými vlastnosťami, spôsobom tepelného spracovania a výpočtovými postupmi používanými pri návrhu ozubených prevodov. Práca sa zameriava na ukážku toho, ako tieto tri faktory navzájom ovplyvňujú konečný výsledok výpočtu a prevádzkovú spoľahlivosť prevodového mechanizmu.

1 ZÁSADY PEVNOSTNÉHO DIMENZOVARIA OZUBENÝCH PREVODOV

Pevnostný výpočet ozubených kolies vychádza z analytických metód popísaných v medzinárodných a národných normách, ktoré stanovujú postupy na hodnotenie únosnosti zubov pri rôznych druhoch namáhania, najmä pri kontakte (*pitting*) a ohybovom namáhaní (zlomenie zuba). Medzi najpoužívanejšie normy patrí v rámci Európskej únie norma *STN EN ISO 6336*, ktorá predstavuje jednotný štandard na vyhodnocovanie pevnosti ozubených prevodov a stanovuje kritériá pre kontaktné a ohybové napätia, bezpečnostné faktory a dovolené hodnoty materiálových napätí v rámci daných prevádzkových podmienok.

Je však potrebné dodať, že mechanizmus pevnostného výpočtu môže do istej miery závisieť od krajiny či regiónu, kde sa prevod vyrába alebo používa, pretože rôzne krajiny môžu akceptovať či preferovať odlišné normy. Napríklad v Spojených štátoch sa bežne používa norma *AGMA 2101-D04*, ktorá má podobný cieľ, no mierne odlišné metodiky hodnotenia únosnosti a bezpečnostných kritérií. V Japonsku sú zas používané normy *JIS (Japanese Industrial Standards)*, ktoré reflektujú špecifiká tamjšieho priemyslu. Tento rozdiel v normách poukazuje na

rôzne prístupy k návrhu a hodnoteniu ozubených prevodov podľa regionálnych požiadaviek a štandardov.

Spôľahlivosť pevnostného výpočtu ozubených kolies je výrazne podmienená presnosťou údajov o použitom materiáli. Nominálne materiálové vlastnosti, ako je medza klzu, tvrdosť, modul pružnosti či únavová pevnosť, tvoria základ vstupných parametrov pre výpočet. Avšak reálne správanie ozubeného zuba pri prevádzkovom zaťažení závisí aj od mikroštruktúry materiálu a technologických procesov, ktorými bol komponent vystavený, vrátane tepelného spracovania a povrchových úprav. Tieto faktory môžu výrazne ovplyvniť únosnosť, životnosť a spoľahlivosť prevodov.

V rámci Európskej únie platí norma EN ISO 6336, ktorá bola vypracovaná na základe konsenzu medzinárodných expertov a je harmonizovaná s normami ISO platnými globálne. Táto norma sa stala východiskom pre veľkú časť súčasného výskumu a praxe v oblasti pevnostných výpočtov ozubených prevodov. Norma definuje podrobný metodický rámec pre výpočet kontaktnej únosnosti, ohybovej únosnosti, a ďalších relevantných parametrov, pričom zohľadňuje rôzne prevádzkové a výrobné podmienky. Tento štandard predstavuje základ pre navrhovanie spoľahlivých, efektívnych a bezpečných ozubených prevodov používaných v priemysle.

2 MATERIÁLOVÉ FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE PEVNOSŤ OZUBENÝCH KOLIES

Pevnosť ozubených kolies je jedným z kľúčových aspektov pri ich návrhu a dimenzovaní. Okrem geometrických parametrov (ako sú modul, šírka zuba, tvar koreňa a pod.) zohrávajú rozhodujúcu úlohu aj materiálové vlastnosti, ktoré výrazne ovplyvňujú životnosť a spoľahlivosť prevodových mechanizmov.

Medzi hlavné materiálové faktory, ktoré ovplyvňujú pevnosť ozubených kolies, patria najmä:

- pevnosť v ohybe a ťahu,
- tvrdosť povrchu,
- únavové vlastnosti,
- tepelné spracovanie,
- modul pružnosti.,
- húževnatosť materiálu.

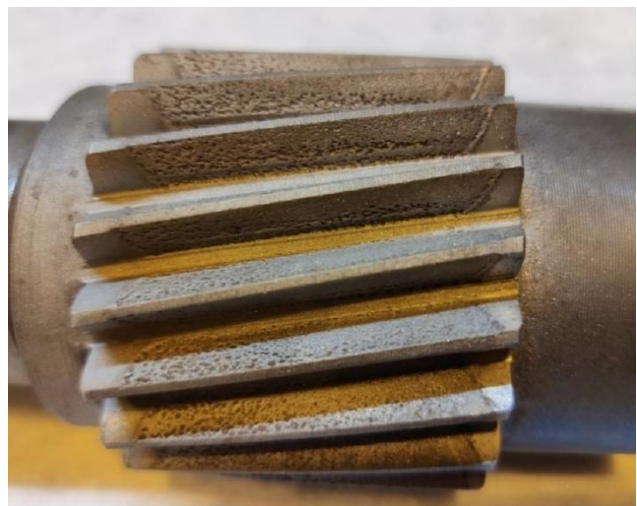
Pevnosť v ohybe a ťahu patrí medzi kľúčové mechanické vlastnosti materiálu, ktoré určujú jeho schopnosť odolávať pôsobeniu zaťaženia bez porušenia. V prípade ozubených kolies je táto vlastnosť mimoriadne dôležitá najmä v oblasti koreňa zuba, kde dochádza k sústredeniu napätia a ktoré je často vystavené únavovému namáhaniu. Nedostatočná pevnosť v týchto oblastiach môže viesť

k vzniku trhlín a následnému lomu zuba (obr. 1). Naopak, vyššia pevnosť materiálu znižuje pravdepodobnosť vzniku takéhoto poškodenia a prispieva k celkovej spoľahlivosti a životnosti prevodového mechanizmu [14].



Obr. 1. Poškodenie zuba lomom

Tvrdosť povrchu je dôležitým parametrom ovplyvňujúcim odolnosť ozubených kolies voči opotrebeniu, ako aj voči bodovému poškodeniu povrchu zubov, známemu ako *pitting* (obr. 2). Tvrdší povrch znižuje riziko poškodenia pri kontakte zubov počas prevádzky, čím sa predlžuje ich životnosť. Požadovaná tvrdosť sa zvyčajne dosahuje pomocou tepelno-chemického spracovania, ako je *cementovanie*, *nitridovanie* alebo *kalenie*, ktoré zabezpečujú tvrdý povrch pri zachovaní húževnatého jadra.

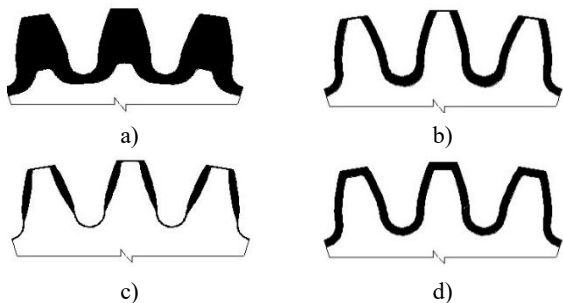


Obr. 2. Pitting na ozubení

Únavové vlastnosti materiálu sú taktiež kľúčové, keďže ozubené kolesá pracujú v podmienkach opakovaného cyklického zaťaženia. Materiál musí byť schopný dlhodobo odolávať únavovému namáhaniu bez vzniku trhlín. Veľký vplyv na vznik únavových porúch má aj kvalita povrchu - najmä prítomnosť mikrotrhlín alebo vrubov, ktoré môžu slúžiť ako iniciačné body pre poruchu.

Tepelné spracovanie zohráva významnú úlohu pri formovaní konečných mechanických vlastností materiálu ozubeného kolesa [15]. Má zásadný vplyv na mikroštruktúru materiálu, jeho tvrdosť, zvyškové napätia, ako aj húževnatosť [16]. Jedným z najčastejšie využívaných postupov je *kalenie*, ktorého cieľom je výrazne zvýšiť povrchovú tvrdosť zubov. Treba však brať do úvahy, že táto úprava môže súčasne znížiť húževnatosť jadra, čo je potrebné zohľadniť najmä pri návrhu komponentov vystavených rázovým zaťaženiám.

Veľmi účinnou metódou v tejto oblasti je povrchové *kalenie*, pri ktorom sa dosahuje tvrdý a voči opotrebeniu odolný povrch zubov, zatiaľ čo jadro zostáva relatívne mäkké a húževnaté (obr. 3). Pre túto úpravu sa používajú ocele s obsahom uhlíka približne 0,3 % až 0,5 % C, čo umožňuje účinné *zakalenie* povrchu bez nadmerného ovplyvnenia jadra. Ohrev prebieha indukčne alebo plameňom. V závislosti od rozmerov ozubeného kolesa sa *kalenie* realizuje buď jednorazovo (pri menších dieloch), zub po zube, alebo medzerovo - čo je výhodnejšia metóda pre ozubenie s väčšími modulmi (zvyčajne nad 6 mm). Z hľadiska ohybovej pevnosti je práve medzerové *kalenie* výrazne efektívnejšie než samostatné *kalenie* jednotlivých zubov. Takto spracované ozubenie dosahuje tvrdosť povrchu v rozmedzí HRC 45 až 55, čo významne prispieva k jeho odolnosti voči opotrebeniu a únave.



Obr. 3. Tvary tvrdenej vrstvy ozubenia: a - hlboké prekalenie, b - kalenie zub po zube, c - medzerové kalenie, d - obrysové kalenie cementovanej vrstvy

Modul pružnosti (*Youngov* modul) určuje mieru pružnej deformácie materiálu pri zaťažení. V prípade ozubených kolies má zásadný vplyv na rozloženie napätia v zuboch a na presnosť prenosu krútiaceho momentu. Materiály s vyšším modulom sú menej náchylné na elastickú deformáciu, čo prispieva k vyššej prevádzkovej presnosti a stabilite pohonu.

Húževnatosť vyjadruje schopnosť materiálu pohltiť energiu pred porušením, tzn. kombináciu pevnosti a plastickej deformácie. V kontexte ozubených kolies je dôležitá z hľadiska:

- odolnosti voči náhlym rázovým zaťaženiám, ktoré sa môžu vyskytnúť pri nepravidelnej prevádzke (napr. nábehy, zastavenia, kolízie, záseky),

- prevencie krehkého lomu, ktorý by mohol viesť k náhlej a fatálnej poruche celého mechanizmu bez predchádzajúceho varovania,
- zabezpečenia integrity koreňa zuba, ktorý býva najcitlivejším miestom na vznik poruchy.

Vyváženie húževnatosti a tvrdosti je kľúčové - napríklad kalené ocele majú síce tvrdý povrch (odolný voči opotrebeniu), ale zároveň musia mať dostatočne húževnaté jadro, aby odolalo rázovým silám a únavovému poškodeniu.

4 REALIZÁCIA ŠTÚDIE A ANALÝZA VÝSLEDKOV

4.1 Výber materiálov

Pre účely analýzy boli vybrané tri typické ocele často používané pri výrobe ozubených kolies:

C45 (nelegovaná uhlíková oceľ) - táto oceľ je charakteristická stredným obsahom uhlíka (~0,45 % C), čo jej zabezpečuje dobrú pevnosť a tvrdosť po tepelnom spracovaní. *C45* je relatívne cenovo dostupná a vhodná pre výrobu ozubených kolies, kde nie sú kladené extrémne nároky na mechanické vlastnosti a odolnosť voči opotrebeniu. Používa sa najmä tam, kde je možnosť povrchového kalenia alebo cementovania na zvýšenie tvrdosti zubov.

16MnCr5 (legovaná oceľ na cementovanie) - ide o legovanú nízkouhlíkovú oceľ s prídavkom mangánu a chrómu, optimalizovanú pre cementovanie - proces, pri ktorom sa povrch materiálu obohacuje uhlíkom, čím sa dosahuje tvrdý a odolný povrch pri zachovaní húževnatého jadra. Táto oceľ je veľmi často používaná pre ozubené kolesá vystavené vysokým zaťaženiám, kde je požadovaná kombinácia odolnosti proti opotrebeniu a dostatočnej húževnatosti.

18CrNiMo7-6 (nízkouhlíková legovaná oceľ pre kalenie a popúšťanie) - táto oceľ obsahuje chróm, nikel a molybdén, čo jej poskytuje veľmi dobrú kombináciu pevnosti, húževnatosti a tvrdosti po tepelnom spracovaní kalením a popúšťaním. Je ideálna pre výrobu náročných ozubených prevodov, kde sú požiadavky na dlhú životnosť, vysokú pevnosť a odolnosť voči únave mimoriadne vysoké. Vďaka svojej mikroštruktúre a vlastnostiam umožňuje presnejšie a odolnejšie spracovanie oproti bežným uhlíkovým oceliam.

4.2 Parametre ozubeného súkolesia

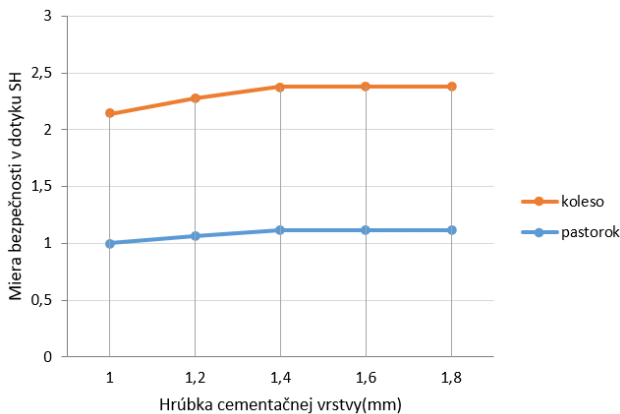
Problematika bola riešená pre čelné ozubené súkolesie so šikmými zubami a pre tieto parametre: prevodovku s výkonom $P = 800$ kW a požadovanou životnosť ozubenia 25000 hod. Parametre čelného prevodu prvého prevodového stupňa sú:

- počet zubov pastorka $z_1 = 22$,
- počet zubov kolesa $z_2 = 58$,

- uhol záberu $a = 20^\circ$,
- normalizovaná hodnota modulu $m_n = 10\text{mm}$,
- uhol sklonu ozubenia $\beta_1 = 27,266^\circ$,
- osová vzdialenosť $a = 450\text{ mm}$,
- výkon $P = 800\text{ kW}$,
- stupeň presnosti výroby IT8,
- vstupné otáčky $n_1 = 330\text{ min}^{-1}$.

4.3 Vplyv hrúbky cementačnej vrstvy

Najčastejšie sa zuby ozubených kolies *cementujú* a následne *kalia*, čím sa dosahuje kombinácia tvrdého, odolného povrchu a húževnatého jadra. V štúdiu bol kladený zvláštny dôraz na vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na pevnostný výpočet ozubenia. So zväčšovaním hrúbky *cementačnej* vrstvy rastie aj miera bezpečnosti z hľadiska pevnosti, avšak norma pre pevnostný výpočet ozubenia stanovuje maximálny limit tejto vrstvy.



Obr. 4. Vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na mieru bezpečnosti v dotyku

Pre geometrické rozmery typické pre ozubené súkolesie, kde je modul $m_n = 10\text{ mm}$, norma uvádza maximálnu hrúbku *cementačnej* vrstvy na úrovni 2 mm, čo však nie je optimálna hodnota z hľadiska výkonu a presnosti.

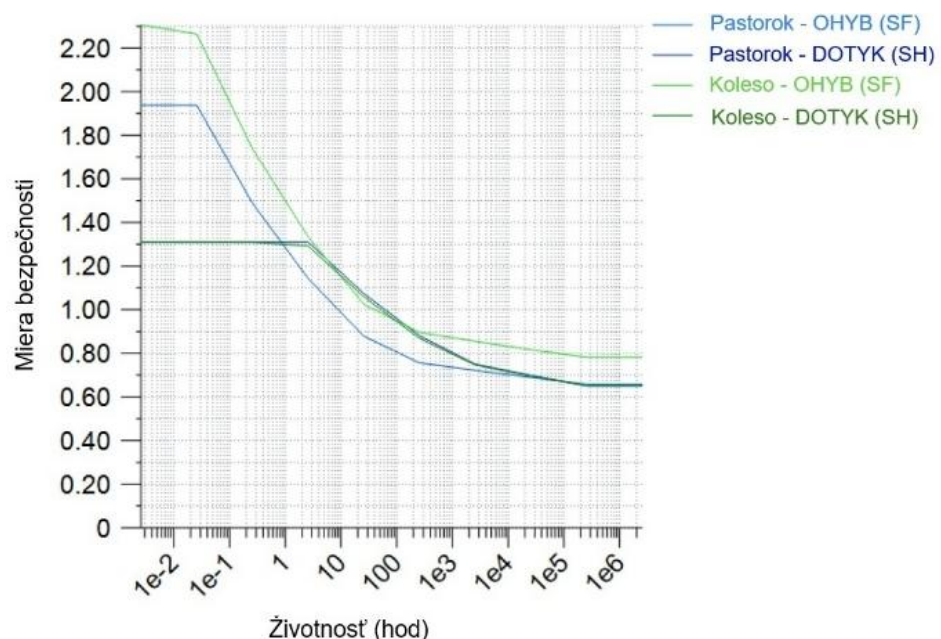
Podmienkou pre dosiahnutie smerodajných hodnôt časových pevností *cementovaného* materiálu je dodržanie dostatočnej hĺbky *cementačnej* vrstvy. Podľa normy by mala byť hrúbka vrstvy po konečnom opracovaní v rozmedzí 1,6 mm až 1,8 mm. Keďže *cementácia* nie je bezdeformačný proces, konečné spracovanie je potrebné voliť s ohľadom na požadovaný stupeň presnosti ozubenia. Po dosiahnutí požadovanej hrúbky *cementačnej* vrstvy je nevyhnutné zabezpečiť, aby pri brúsení zubov nedošlo k vzniku vrubov alebo k zbrúseniu *cementačnej* vrstvy v oblasti päty zuba, pretože tieto vplyvy znižujú únosnosť zubov v ohybe aj v dotyku. Na obr. 4. je znázornený vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na mieru bezpečnosti v dotyku „SH“.

4.4 Výsledky výpočtu pevnosti ozubeného kola

Na obr. 5 je znázornený priebeh súčiniteľov bezpečnosti pre ozubené súkolesie vyrobené z materiálu 18CrNiMo6-7, ktoré bolo tepelne spracované *cementovaním* a následným *kalením*. Hrúbka *cementačnej* vrstvy bola 1,6 mm, čo zabezpečuje požadovanú tvrdosť povrchu a zároveň dostatočnú húževnatosť jadra.

Zobrazené sú dva hlavné súčinitele bezpečnosti:

- S_F - súčiniteľ bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v koreňovej oblasti zuba,



Obr. 5. Vypočítaná bezpečnosť ozubených kolies z ocele 18CrNiMo7-6

- S_H - súčiniteľ bezpečnosti proti únavovému poškodeniu bokov zubov (*pittingu*).

Z grafu je zrejmé, že priebehy oboch súčiniteľov - pre pastorok aj ozubené koleso - sú si veľmi podobné, čo naznačuje vyvážené namáhanie oboch členov súkolesia. Táto symetria priebehov poukazuje na kvalitný návrh prevodového stupňa z hľadiska rozloženia zaťaženia aj výrobných tolerancií.

Podľa normy ISO 6336, ktorá sa bežne používa pri hodnotení únosnosti ozubených prevodov, sa za minimálne prípustné hodnoty súčiniteľov bezpečnosti považujú:

- $S_F \geq 1,4$ súčiniteľ bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v koreňovej oblasti zuba,
- $S_H \geq 1,1$ súčiniteľ bezpečnosti proti únavovému poškodeniu bokov zubov (*pittingu*).

Tieto hraničné hodnoty slúžia ako kritérium pre posúdenie spoľahlivosti súkolesia v prevádzke.

Takýmto spôsobom boli vyhodnotené aj priebehy súčiniteľov bezpečnosti pre ozubené súkolesia vyrobené z materiálov 16MnCr5 a 18CrNiMo7-6. Výpočty umožnili porovnať správanie sa jednotlivých materiálov z hľadiska odolnosti voči únave a identifikovať kritické oblasti namáhania.

Je zrejmé, že pevnosť materiálu ovplyvňuje očakávanú životnosť, no zároveň má vplyv aj na samotný mechanizmus porušenia. Koreň zuba prvého ozubeného kolesa z materiálu 18CrNiMo7-6 má jednoznačne najnižšiu životnosť v porovnaní s bokom zuba alebo s koreňom a bokom druhého ozubeného kolesa. Pri zmene na oceľ s nižšou pevnosťou sa ukazuje, že pevnosť koreňa zuba druhého kolesa zostáva relatívne vyššia v porovnaní s jeho bokom. To naznačuje, že pri nižších pevnostiach materiálu sa pomer medzi odolnosťou voči ohybovému a kontaktnému namáhaniu mení v prospech koreňovej oblasti.

ZÁVER

Správny návrh ozubených prevodov si vyžaduje komplexné zohľadnenie viacerých vzájomne prepojených faktorov. Kľúčovú úlohu zohráva výber materiálu, jeho následné tepelné spracovanie a pevnostný výpočet, ktoré spolu vytvárajú základ pre dosiahnutie požadovanej životnosti, únosnosti a spoľahlivosti prevodového mechanizmu.

Z vykonaných analýz vyplýva, že interakcia medzi použitým materiálom a jeho tepelným spracovaním významne ovplyvňuje výsledné mechanické vlastnosti ozubených kolies, predovšetkým ich odolnosť voči únave spôsobenej namáhaním na ohyb a dotyk. Napríklad vysokolegované ocele (ako 18CrNiMo7-6) po *cementovaní* a *kalení* poskytujú vyššiu tvrdosť povrchu, húževnaté jadro a lepšiu únavovú pevnosť v porovnaní s bežnejšími

materiálmi ako 16MnCr5, avšak za cenu vyšších výrobných nákladov.

Pevnostné výpočty podľa noriem (napr. ISO 6336) umožňujú spoľahlivo vyhodnotiť bezpečnostné súčinitele a identifikovať potenciálne kritické oblasti porušenia. Výsledky výpočtov ukazujú, že nedostatočný výber materiálu alebo nevhodné tepelné spracovanie môže spôsobiť výrazné zníženie životnosti súkolesia, aj pri správne dimenzovaných zuboch.

Odporúčania pre návrh ozubených súkolesí:

- voľba materiálu by mala byť podmienená nielen požiadavkami na únosnosť, ale aj predpokladaným režimom zaťaženia, náročnosťou prevádzky a ekonomickými možnosťami,
- tepelné spracovanie (napr. *cementovanie*, *kalenie*, *nitridovanie*) by malo byť optimalizované podľa hrúbky steny, typu materiálu a očakávaného namáhania - nedostatočná hĺbka cementovanej vrstvy môže viesť k predčasnemu zlyhaniu pri namáhaní na dotyk,
- bezpečnostné súčinitele pri namáhaní na ohyb a dotyk (S_F , S_H) je potrebné vždy porovnávať s minimálnymi požiadavkami podľa platných noriem, a pri rizikových aplikáciách odporúčame zavádzať vyššie hodnoty súčiniteľov bezpečnosti,
- dôležité je uvažovať interakciu medzi namáhaním na ohyb a na dotyk, pretože zmena materiálu alebo technológie tepelného spracovania môže ovplyvniť dominantný typ poruchy,
- výsledky pevnostných výpočtov je vhodné validovať experimentálne alebo simulačne (napr. *FEM*, *KISSsoft/KISSsys*), najmä pri vysoko zaťažených prevodoch alebo nových návrhoch.

Záverom možno konštatovať, že efektívne navrhnuté ozubené súkolesie je výsledkom dobrej synergie medzi materiálom, voľbou, presne definovaným procesom tepelného spracovania a dôslednou pevnostnou analýzou. Iba ich spoločným zohľadnením možno dosiahnuť spoľahlivý a ekonomicky efektívny návrh ozubených prevodov pre rôzne aplikácie.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov:

KEGA 037TUKE-4/2024 - Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie.

KEGA 044TUKE-4/2024 - Aplikácia virtuálnej a rozšírenej reality vo vzdelávaní s cieľom inovácie študijných programov.

VEGA 1/0573/25- Výskum, vývoj a testovanie ladičov torzných vibrácií.

LITERATÚRA

[1] KUCZAJ, M. et al. (2023): *Research on Vibroactivity of Toothed Gears with Highly Flexible Metal Clutch under Variable Load Conditions*. In: *Sensors*, 23, pp. 287.

[2] MORAVEC, J.; GRYC, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, 11, 1106.

[3] KUMAR, A. - SINGH, H. - SHARMA, A. (2023): *Effects of heat treatment techniques on the fatigue behaviour of steel gears: A review*. In: *Materials Today: Proceedings*, 78, pp. 1-9.

[4] ZHAO, Y. - WANG, J. - LIU, X. (2020): *Effects of carburizing and nitriding on gear performance*. In: *International Journal of Mechanical Sciences*, 171, 105-115.

[5] LEE, S. - PARK, J. (2019): *Microstructural evolution and fatigue behavior of induction-hardened gears*. In: *Materials Science and Engineering A*, 763, 138-146.

[6] BUKOVSKÁ, Š. - MORAVEC, J. - SOLFRONK, P. - PEKÁREK, M. (2022): *Assessment of the Effect of Residual Stresses Arising in the HAZ of Welds on the Fatigue Life of S700MC Steel*. In: *Metals*, 12, 1890.

[7] SINGH, A. - KUMAR, R. - SHARMA, V. (2018): *Fatigue behavior of heat-treated gear steels*. In: *Tribology International*, 124, 220-228.

[8] PARK, H. - KIM, S. (2021): *Influence of nitriding process parameters on gear surface properties*. In: *Surface and Coatings Technology*, 406, 126-134.

[9] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*. In: *MMS 2017 MATEC Web of Conference*, pp. 157.

[10] MALÁKOVÁ, S. et al. (2019): *A case study of gear wheel material and heat treatment effect on gearbox strength calculation*. In: *Journal of Mechanical Science and Technology*, roč. 33, č. 12, pp. 5817-5827.

[11] SINGH, R. - KUMAR, P. (2021): *Influence of heat treatment parameters on fatigue life of steel gears*. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, roč. 30, č. 4, s. 2500-2510.

[12] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - ŽUĽOVÁ, L. - KAČÍR, M. - KAŠŠAY, P. - URBANSKÝ, M. (2023): *Innovative solution of torsional vibration reduction by application of pneumatic tuner in shipping piston devices*. In: *Journal of Marine Science and Engineering*. - Bazilej (Švajčiarsko) : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, roč. 11, č. 2, pp. 1-15, online, ISSN 2077-1312.

[13] MALÁKOVÁ, S. - PUŠKÁR, M. - FRANKOVSKÝ, P. - SIVÁK, S. - HARACHOVÁ, D. (2021): *Influence of the shape of gear wheel bodies in marine engines on the gearing deformation and meshing stiffness*. In: *Journal of Marine Science and Engineering*, Bazilej (Švajčiarsko), Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Roč. 9, č. 10, pp. 1-22, ISSN 2077-1312.

[14] MALÁKOVÁ, S. - SIVÁK, S. - FEDORKO, G. - MOLNÁR, V. - TOMEK, M. (2023): *Analysis of damage origin of bevel gear wheels*. In: *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam: Elsevier, roč. 146, pp. 1-14, ISSN 1350-6307.

[15] WANG, Z. - HUANG, Y. - XING, Z. - WANG, H. - SHAN, D. - XIE, F. - LI, J. (2021): *Bending fatigue behaviour and fatigue endurance limit prediction of 20Cr2Ni4A gear steel after the ultrasonic surface rolling process*. In: *Materials*. roč. 14, č. 10, pp. 2516

[16] ZHANG, W. - LI, S. - LIU, J. et al. (2023): *Control of tooth form deformation in heat treatment of spiral bevel gears based on reverse adjustment of cutting parameters*. In: *Materials*. roč. 16, č. 11, pp. 4183.

How heat treatment affects tool steels

Elena Kantoríková, Ing. PhD.

Department of Technological Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,

Univerzitná 1, 010 26 Žilina.

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

Abstract: The properties of steels cannot be determined solely by their chemical composition. Their final characteristics depend to a large extent on the applied processing methods - whether thermal, chemical, a combination of chemical and thermal, or thermomechanical treatment. When these processes are carried out properly, steels gain the required qualities and their durability is extended. This paper presents an overview of heat treatment techniques for tool steels. Understanding these principles is essential for the effective application of heat treatment and for minimizing the extent of subsequent finishing operations.

Keywords: heat treatment, mechanical properties, the steels.

INTRODUCTION

The production of steel, one of the fundamental materials shaping modern society, has its origins in the Iron Age, approximately 3200 years ago. Despite such a long historical trajectory, the relevance of steel remains undiminished. On the contrary, continuous research and the development of advanced steel grades underscore its strategic importance. Owing to its versatile properties, steel has become indispensable in a wide range of applications from consumer goods and automotive manufacturing to civil engineering, aerospace, and space technologies. Each application requires steels with carefully tailored properties, a demand that, together with the growing diversity of steel types, has resulted in their systematic classification. The criteria for such categorization may include chemical composition, functional purpose, processing method, or other parameters [1].

Yet, chemical composition alone cannot guarantee the required performance. Post-production treatments thermal, chemical, thermo-chemical, or thermo-mechanical are essential for achieving the desired material properties and extending service life. Heat treatment, however, also introduces potential drawbacks; thus, knowledge of these effects is indispensable for its correct application and for minimizing subsequent finishing operations [1, 2].

Tool steels, belonging to class 19, represent high-quality materials typically produced by arc or induction melting. They are expected to exhibit properties such as hardness, temper resistance, toughness, wear resistance, cutting efficiency, hardenability, and dimensional stability. Meeting these requirements depends on a relatively high carbon content, in combination with carefully chosen alloying elements most notably *manganese*, *silicon*,

chromium, *nickel*, *molybdenum*, *tungsten*, *vanadium*, or *cobalt*. An increase in *carbon* content raises hardness but simultaneously reduces toughness. Secondary alloying elements help mitigate these adverse effects while enhancing other necessary properties. Furthermore, the functional performance of tool steels is strongly influenced by a high carbide content, provided by carbide-forming alloying elements. The effectiveness of heat treatment, as well as additional surface modifications, plays a decisive role in prolonging the service life of tools [3].

1 STEELS

1.1 Carbon Steels

Carbon tool steels typically contain 0.25 to 0.6 % *carbon*, which is sufficient to achieve the necessary hardness. *Phosphorus* and *sulfur* levels are kept below 0.06 %. When hardened, these steels develop hardness only on the surface (up to 2 to 3 mm), while the core remains unhardened. This feature is sometimes advantageous, as the tough, impact-resistant core improves performance in specific applications. Such steels are mainly used for manufacturing low-stress tools. Their working temperature does not exceed 200°C, since most steels in this group lose hardness above 150°C. Common uses include cutting tools and hand tools [4].

1.2 Alloy Steels

The alloyed, or low-alloy tool steels, exhibit greater resistance to mechanical stress compared to plain *carbon* steels. Their key alloying elements are the carbide formers *chromium* and *tungsten*, typically added in amounts of 1 to 2 %, as carbides enhance cutting performance. Depending on application requirements, additional alloying elements include

manganese, silicon, nickel, and small amounts of *vanadium*, bringing the total alloy content to 3 to 5 %. For cold-forming, shearing, and machining tools, the steel may contain up to 12 % *chromium* and 2 % *cobalt*. This group is characterized by high hardness and wear resistance, making it suitable for both cold and hot working tools [5, 6].

1.3 High-Speed Steels (HSS)

High-speed steels of this class were named after their application to tools that operate at high speeds. Their structure is *martensitic*. They are characterized by extremely high stability of properties up to temperatures of 650°C. This stability is obtained thanks to the high content of additives above 10 %. The *carbon* content is 0.7 to 0.9 %. The content of the main additive, which is *tungsten*, ranges from 10 to 18 %. Other elements are *chromium*, the content of which is around 4%, which makes the steel more resistant to *oxidation* even at higher temperatures, and 1 to 4% *vanadium*. *Vanadium* significantly affects the formation of stable carbides. However, a higher proportion of *vanadium* requires an increase in the *carbon* content to prevent loss of toughness. For more demanding applications, some steels replace part of the *tungsten* with *molybdenum* up to a content of 5%, or 3 to 10% *cobalt*. It is important to keep the *manganese* and *phosphorus* content at minimum levels, as these elements significantly increase the brittleness of steels and cause cracking during hardening. Annealing at a temperature of 800 to 840°C is used as a heat treatment. It is hardened at very high temperatures of 1260 to 1300°C and the holding time at these temperatures is around 100 s. The high temperature is necessary in order to achieve the desired chemical composition of austenite, which is achieved by dissolving the necessary concentration of alloying elements and carbon. The disadvantage is grain growth. Heating is gradual and slow in order to achieve temperature equalization throughout the cross-section. Due to the high content of carbon and alloying elements, they have poor thermal conductivity, therefore, thanks to the gradual heating, smaller stresses are formed between the surface and the core. After hardening, tempering is followed by tempering at a temperature of 560 to 580°C and is repeated 2 or 3 times. After quenching, a matrix consisting of alloyed *martensite* and a large amount of residual austenite is obtained. This structure does not have high hardness, therefore, a high tempering follows, during which alloying elements and *carbon* are precipitated from the *austenite*. The thus depleted *austenite* is less stable and upon subsequent cooling from the tempering temperature it easily decomposes into *martensite*. The residual *austenite* is alloyed and therefore very stable and multiple tempering is necessary for its decomposition. In the case of the

production of very precise measuring instruments, the residual *austenite* is reduced by freezing [7].

1.4 Maraging Steels

A special subgroup of class 19 steels includes maraging steels, known for their exceptional strength and toughness. The name derives from *martensite* aging, referring to *martensitic* transformation followed by age-hardening. Unlike conventional steels, maraging steels are classified by strengthening mechanism rather than chemical composition. They contain very low *carbon* (< 0.03 %) to avoid *titanium* carbide formation, which would otherwise reduce impact strength and ductility. Instead, they are alloyed with 17 to 19 % *nickel*, along with *cobalt* (8 to 12 %), *molybdenum* (3 to 5 %), *titanium* (0.2 to 1.8 %), and small amounts of *aluminum* (0.1 to 0.15 %).

Their production involves heating to about 850°C and slow cooling, which results in a *martensitic* rather than *ferritic/pearlitic* structure. This *martensite* is softer compared to *carbon* steel *martensite* but offers better ductility and toughness without tempering. Strengthening is achieved by precipitation hardening (*aging*) at 480 to 500°C, where fine particles form, improving hardness without causing large dimensional changes. However, due to the high *cobalt* content, these steels are significantly more expensive [7, 8].

2 THERMOMECHANICALLY PROCESSED STEELS (TMP/TMCP)

This group of steels reaches strength levels of 2500 to 3000 MPa, with special cases up to 3500 MPa, while maintaining acceptable ductility and toughness. Their properties result from thermomechanical processing, which combines plastic deformation with heat treatment. Although applicable to various steels, it is most effective in low- to medium-alloy steels with 0.4 to 0.6 % carbon.

Applications include pipelines, skyscrapers, bridges, ships, car bodies, and railways. *TMP* involves controlled hot working of stable austenite, with deformation levels of 40 to 90 %, followed by quenching and tempering to refine the martensitic microstructure. Both high-temperature and low-temperature *TMP* exist, with the latter being more common due to cost efficiency. Depending on processing conditions, steels can achieve strengths up to 3000 MPa while balancing toughness and machinability. Advanced *TMP* techniques also combine high- and low-temperature deformation to produce ultrafine-grained structures with improved mechanical properties [9, 10].

In practice, the most common procedure is deformation before transformation. In high-temperature forming, steel is intensively formed in the stable austenite region. The degree of forming is

usually high and ranges from 40 to 90 %. During this deformation, recovery and recrystallization occur in the grains. The formation of recrystallized grains is followed by hardening, as a result of which very fine *martensite* is formed in the structure, which is further tempered. High-temperature thermomechanical processing achieves strengths of 2500 MPa. Low-temperature thermomechanical processing is more common than high-temperature processing, also due to more acceptable costs. Deformation with a minimum value of 50 % and more occurs at temperatures in the range of 500 to 600°C and subsequent tempering is carried out at a temperature of 200°C. Uncrystallized *austenite* grains contain large amounts of lattice defects, which contribute to the formation of fine *martensite*. Low-temperature thermomechanical processing enables the production of steels with a strength of 3000 MPa. By combining high-temperature and low-temperature processing, we obtain a combined thermomechanical processing, where *austenite* is first deformed at a temperature just above A_{c3} and then cooled and deformed at temperatures in the metastable *austenite* region and finally hardened to *martensite*. The procedure, where steel is first deformed hot or cold and then annealed at a temperature of 300°C, then rapidly austenitized and hardened, is called preliminary processing. Deformation during transformation is carried out in the *pearlitic* and *bainitic* transformation region, which follows rapid cooling from the austenitization temperature. In these regions, the steel is intensively formed and then allowed to cool in air or hardened to a mixture of lower *bainite* and *martensite*. Deformation in the *pearlitic* region does not significantly increase strength, but there is a noticeable increase in toughness. Deformation in the *bainitic* region, on the other hand, increases strength at the expense of toughness and machinability. Deformation after transformation is applied between the first and second tempering, in which case it is deformation tempering. The second option is deformation directly during tempering at temperatures of 150 to 200°C, in which case it is dynamic deformation aging of *martensite*. With a slight decrease in ductility, a significant increase in the yield strength is achieved [11].

2.1 TRIP Steels (Transformation-Induced Plasticity Steels)

TRIP steels have a matrix of *ferrite* with retained *austenite*, along with 25 to 40 % *bainite*, and sometimes *martensite*. They contain 0.20 to 0.25 % carbon, sufficient for both weldability and lowering the *martensite* start temperature (M_s) below room temperature. During deformation, retained *austenite* transforms into *martensite*, which strengthens the

steel - a phenomenon known as transformation-induced plasticity (*TRIP*).

To achieve this effect, 5 to 15 % retained *austenite* is required, controlled mainly by carbon and *silicon* (up to 0.3%). Other alloying elements include *aluminum*, *manganese*, *chromium*, *molybdenum*, *niobium*, and *titanium*. *TRIP* steels typically achieve strengths of 500 to 1050 MPa, with elongation between 20 to 80 %, making them highly formable and resistant to thinning during shaping. Their production involves solution annealing at 1120°C, followed by controlled deformation above the M_d temperature.

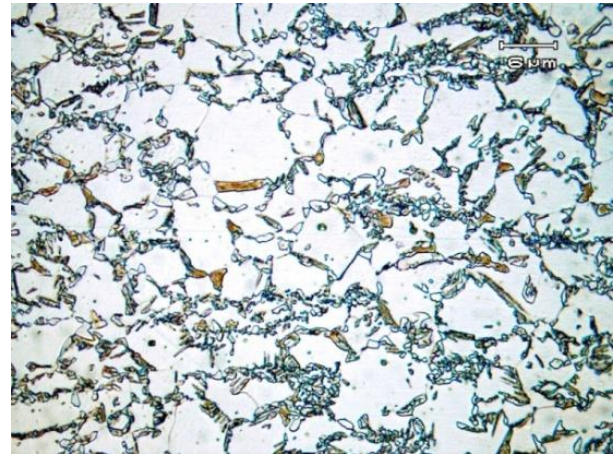


Fig. 1. TRIP steel [11]

Figure 1 shows the *TRIP* steel annealed at 775°C for 5 mins and then hold at 400°C for 40s for *austenite* stabilization. The largest grains are *ferrite*, the darker regions are *bainitic*, and the smaller white grains are the retained *austenite*, which will transform to *martensite* when a stress is applied (micrograph 740 from the micrograph library) [11]. Depending on the type of steel, this temperature is around 100°C. The degree of deformation reaches 80 %. The deformation causes an increase in the temperature M_d by approximately 100°C and a decrease in the temperature M_s by the same amount. These steels have found application mainly in the automotive industry [12, 13].

2.2 TWIP Steels

This group of steels belongs to the new perspective types. These are ultra-strong high-alloy manganese steels. Their designation is from the English Twinning Induced Plasticity Steel. The R_e values reach 280 to 1350 MPa and R_m 580 to 1470 MPa. The ductility values are in the range from 15 to 95 %. With these ductility values, *TWIP* steels can be compared to deep-drawn steels, but they have several times higher strength values. They achieve their properties thanks to the *austenitic* structure, which does not transform into *martensite* even at higher deformations. Instead, twinning occurs in the structure during deformations, at all temperatures and throughout the entire volume. The best result of twinning can be observed at a

manganese content above 20 %. If the manganese content is below 15 %, the TRIP effect occurs. Steels are further alloyed with *aluminum*, which suppresses the transformation of austenite to martensite, and silicon to improve strength. It has found significant use in the automotive industry in the construction of frames, also due to its ability to absorb impact energy, ease of pressing and reduction of the overall weight of the vehicle. It is also used in the construction of ships and transport pipelines [13, 14].

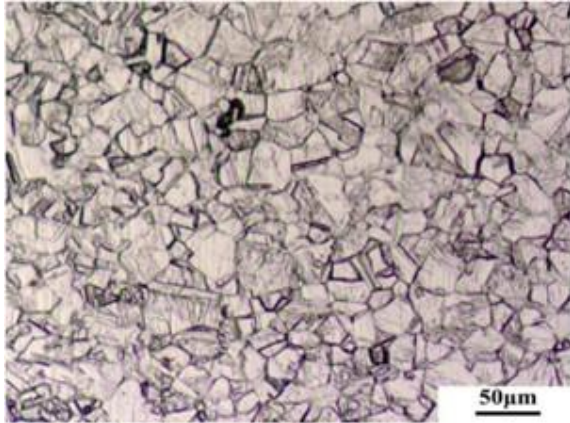


Fig. 2. Microstructure of the TWIP steel [14]

TWIP steel is a typical austenitic steel, and its optical microscope morphology is shown in Figure 1. It can be seen that the phase of TWIP steel is mainly single-phase *austenite* and the annealing twins are evenly distributed among them. Twins play an important role in the excellent mechanical properties of TWIP steels [14, 15].

Tab. 1. mechanical properties of selected high-strength steels

Steel marking	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Characteristics
18Ni200 grade	1450	1460	15	maraging
40Cr5MoV	2600	2800	9	TMS
HCT690T	400-520	690	23	TRIP
Fe-0.7C-15Mn	630-652	999-1035	56-59	TWIP

CONCLUSION

Each subgroup from *carbon* steels, alloy steels, and high-speed steels to advanced maraging, TRIP, or thermomechanically processed steels is designed to meet specific performance requirements. Their proper selection and processing enable the production of tools and components with high hardness, wear resistance, strength, and toughness, ensuring long service life and reliability in industrial applications.

Acknowledgements

This work was supported by the project KEGA 003ŽU-4/2024 by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of the Slovak Republic.

LITERATURE

- [1] BALLA, J. (2007): *Náuka o materiáloch*. Nitra: SPU, pp. 163. ISBN 978-80-8069-837- 9.
- [2] BOKŮVKA, O. et al. (2014): *Materiály I*. Žilina: EDIS, pp. 86. ISBN 978-80-554-0858- 3.
- [3] COOMAN, B. C. (2016): *Automotive Steel*. [Online], [cit. 2022-04-19]. Dostupné na internete.
- [4] Corrosionpedia. (2019): *Maraging Steel*. [Online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné na internete.
- [5] FREMUNT, P. - KREJČÍ, J. - PODRÁBSKÝ, T. (1994): *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky.
- [6] GÁBRIŠOVÁ, Z. - BRUSILOVÁ, A. (2019): *Tepelné spracovanie*. Bratislava: SPEKTRUM STU, pp. 134. ISBN 978-80-227-4894
- [7] GIRMAN, V. (2012): *Kovové materiály automobilových konštrukcií - II Karoséria a karosárenské plechy*. [Online]. 02. 08. 2012, [cit. 2022-04-18].
- [8] HRIVŇÁK, I. (1996): *Výber materiálov a nové materiálové technológie*. Košice: Elfa, pp. 177. ISBN 80-88786-39-8.
- [9] CHAJRAVARTHI, K. V. A. et al. (2017): *Microstructure, properties and hot workability of M300 grade maraging steel*. [Online]. [cit. 2022-04-20].
- [10] MILITZER, M. (2014): *Thermomechanical Processed Steel*. [Online]. [cit. 2022-04-18].
- [11] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. (2004-2025): *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)*. [Online]. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/toughen/trip_steel.php
- [12] ÖZBEK, Y. Y. - IPEK, A. (2016): *The Surface Properties of 1.2842 Steel After Heat*. [Online]. Sakarya university, [cit. 2022-04-22].
- [13] PULC, V. - HRNČIAR, V. - GONDÁR, E. (2008): *Náuka o materiáli*. Bratislava: STU, pp. 333. ISBN 978-80-227-2847-8.
- [14] Minghui, Y. - LIJIE, Y. - KUN, X. - SHUXIN, Z. - YIPIN, S. - YUNLIANG, T. (2020): *Study on corrosion behavior of TWIP steel and properties of surface electroless Ni-P coatings*. In: *Materials Research Express*, Volume 7, Number 3. DOI 10.1088/2053-1591/ab7d0a
- [15] YONGFENG, S. - SHAOSHUAI, H. - RONGXING, Z. - WENYING, X. - TONG, H. (2010): *Deformation and recrystallization behavior of a Fe-20Mn-3Si3Al-0.045C steel under cold-rolling*. In: *Baosteel Technol. Res*. S1 48.

Nové prototypy pneumatických pružných hriadeľových spojok a ich očakávané vlastnosti

Matej Urbanský, Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 1/9, 042 00, Košice-Sever.
E-mail: matej.urbansky@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2368

Robert Grega, prof. Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 1/9, 042 00, Košice-Sever.
E-mail: robert.grega@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2524

Lucia Žuľová, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 1/9, 042 00, Košice-Sever.
E-mail: lucia.zulova@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2524

Jozef Krajňák, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 1/9, 042 00, Košice-Sever.
E-mail: jozef.krajnak@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2373

New prototypes of pneumatic flexible shaft couplings and their expected properties

Abstract: In our workplace, we deal with research of pneumatic flexible shaft couplings in the long term. Our main goal is to minimize dangerous torsional vibration in mechanical systems, using pneumatic flexible couplings as torsional vibration active tuners. Therefore, many pneumatic couplings prototypes have to be manufactured and tested. In this article, two new prototypes of pneumatic flexible shaft couplings and their expected properties are presented. The couplings were manufactured according to granted patents.

Keywords: pneumatic flexible shaft couplings, prototypes, patents, properties.

ÚVOD

V súčasnosti sú pružné hriadeľové spojky najpoužívanejšími časťami strojov pre pružný prenos záťažového krútiaceho momentu v strojoch s rotačným prenosom výkonu, najmä preto, aby sa predišlo nebezpečným účinkom torzných rázov a vibrácií v mechanických sústavách. Preto sa musí pre každú konkrétnu aplikáciu starostlivo zvoliť pružná spojka s vhodnými dynamickými vlastnosťami, najmä dynamickou torznou tuhosťou, napr. [1-4], inak môže dôjsť k vážnym poruchám, napr. [5-7].

Pružné členy hriadeľových spojok sú vyrobené z rôznych materiálov, najmä z gumy, plastu a kovu. Počas prevádzky mechanických sústav dochádza k únave a starnutiu najmä gumových a plastových

pružných členov a k únave a opotrebovaniu kovových pružných členov použitej pružnej spojky, napr. [8]. V dôsledku toho stráca použitá pružná spojka svoje pôvodné dynamické vlastnosti a tým aj schopnosť vykonávať svoje dôležité funkcie v mechanickej sústave, najmä vyladenie mechanickej sústavy z hľadiska torznej dynamiky. Nevýhody uvedených pružných členov je možné eliminovať použitím pneumatických pružných členov, napríklad vzduchových pružín [9, 10]. Pružný prenos krútiaceho momentu je zabezpečený takmer výlučne stlačeným plynným médiom, ktoré netrpí únavou ani starnutím. Hlavnou výhodou pneumatických pružných hriadeľových spojok je možnosť meniť ich torznú tuhosť, ktorá závisí od hodnoty tlaku plynného média v ich pneumatických pružných členoch. To

umožňuje vhodne prispôbiť dynamickú torznú tuhosť pneumatickej spojky dynamike mechanickej sústavy pri rôznych prevádzkových režimoch.

Na našom pracovisku sa zaoberáme vývojom, výskumom a aplikáciou pneumatických pružných hriadeľových spojok v mechanických sústavách. Zameriavame sa najmä na kontinuálne ladenie mechanických sústav počas ich prevádzky z hľadiska veľkosti torzného kmitania s použitím pneumatických pružných hriadeľových spojok ako aktívnych ladičov torzného kmitania. Pre plynulé ladenie používame nami vyvinuté elektronické regulačné systémy. Naš rozsiahly výskum v oblasti pneumatických ladičov torzného kmitania a torznej dynamiky vedie aj k neustálemu vývoju a optimalizácii našich pneumatických ladičov a riadiacich systémov, napr. [1-4, 11, 12]. Pre dosiahnutie špecifických prevádzkových vlastností boli navrhnuté a vyrobené dva nové prototypy pneumatických ladičov. Ich výroba bola financovaná z grantového projektu VEGA 1/0528/20: *Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav*. Cieľom tohto článku je predstavenie týchto prototypov z hľadiska konštrukcie a očakávaných vlastností, nakoľko mechanicke vlastnosti uvedených pneumatických spojok ešte neboli experimentálne stanovené. Prototypy sú chránené udelenými patentmi SK 278152 B6 „Pneumatická spojka so zväčšeným kompresným priestorom“ [11] a SK 288879 B6 „Pneumatická pružná reťazcová hriadeľová spojka“ [12].

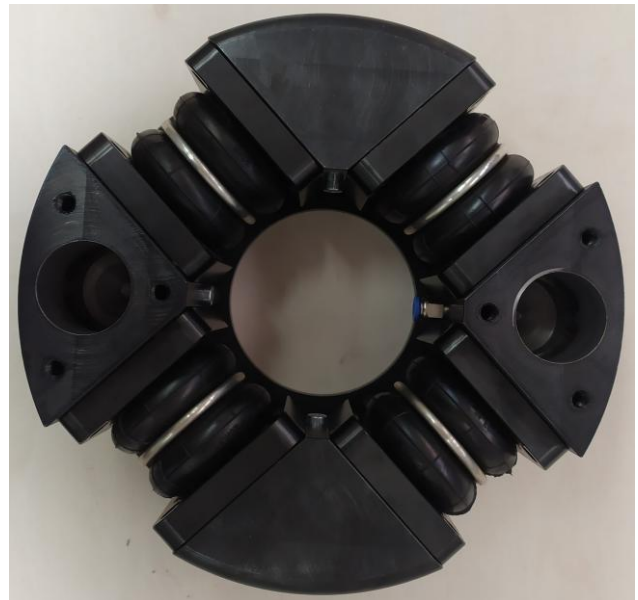
1 PNEUMATICKÁ SPOJKA SO ZVÄČŠENÝM KOMPRESNÝM PRIESTOROM

Na nasledujúcom obr. 1 je možné vidieť vyrobený prototyp pneumatickej pružnej hriadeľovej spojky tangenciálnej so zväčšeným kompresným priestorom.

Na obr. 2 vidíme vnútorné usporiadanie pneumatickej spojky znázornenej na obr.1. Vidíme, že štyri pneumatické pružiny typu *Rubena* [10] (*DUNLOP* 2 3/4'' x 2) sú usporiadané tangenciálne a sú navzájom prepojené pomocou špeciálnych trojuholníkových prvkov, ktoré sú duté.

Dané trojuholníkové prvky vidíme podrobne na obr. 3. Dutiny, ktoré sú vytvorené v trojuholníkových prepojavacích prvkoch, zväčšujú pôvodný kompresný objem, pričom pôvodný kompresný objem je určený hlavne objemom štyroch pneumatických pružín, prepojavacích hadíc a hadicových spojok, ako je to pri štandardnom tvare pneumatickej pružnej spojky tangenciálnej typu 4-2/70-T-C (obr. 4a).

Použitie trojuholníkových prepojavacích prvkov namiesto prepojavacích hadíc zároveň poskytuje spoľahlivejšie a estetické riešenie vzájomného prepojenia pneumatických pružín.



Obr. 1. Pneumatická spojka tangenciálna so zväčšeným kompresným priestorom



Obr. 2. Vnútrné usporiadanie pneumatickej spojky tangenciálnej so zväčšeným kompresným priestorom

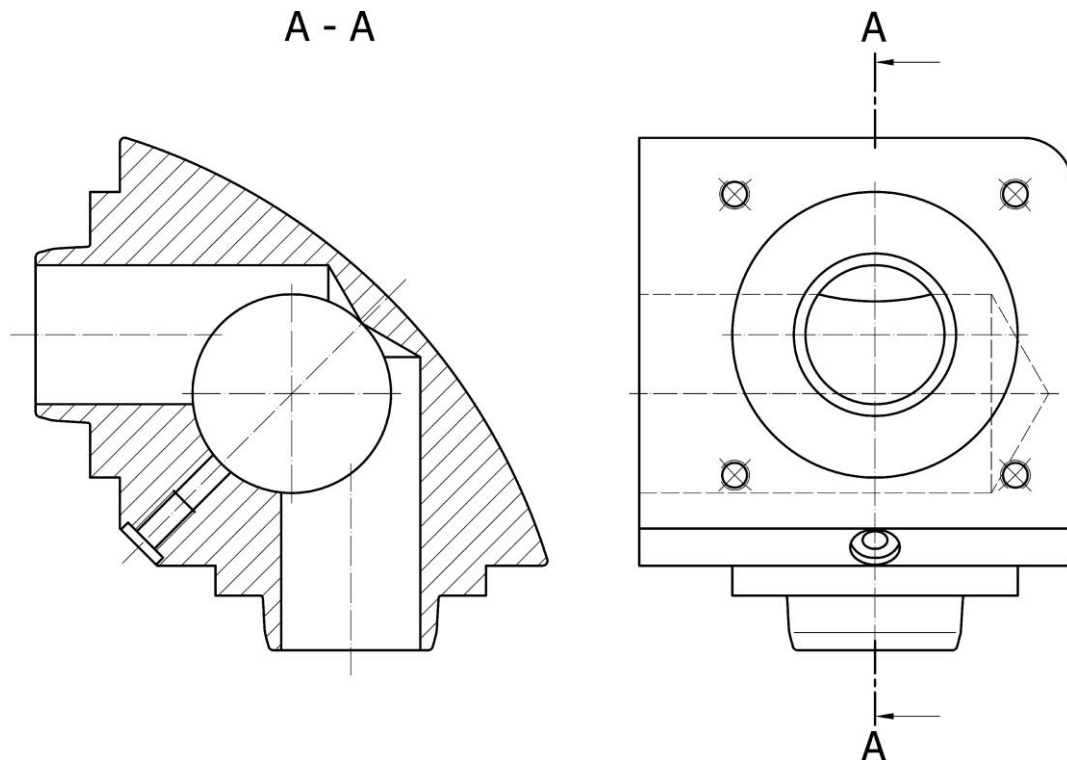
Z hľadiska mechanickej vlastností pneumatickej spojky so zväčšeným kompresným priestorom očakávame že jej statické zaťažovacie charakteristiky (závislosti záťažového krútiaceho momentu M_k na uhle skrútenia spojky φ pri rôznych počiatkových hodnotách pretlaku v kompresnom priestore spojky) budú lineárnejšie ako v prípade pneumatickej pružnej spojky tangenciálnej typu 4-2/70-T-C štandardného tvaru (obr. 4b). Je to tak pretože pri skrúcaní prototypovej spojky bude vo väčšom kompresnom priestore miernejšie narastať pretlak vzduchu.

1 PNEUMATICKÁ PRUŽNÁ REŤAZCOVÁ HRIADEĽOVÁ SPOJKA

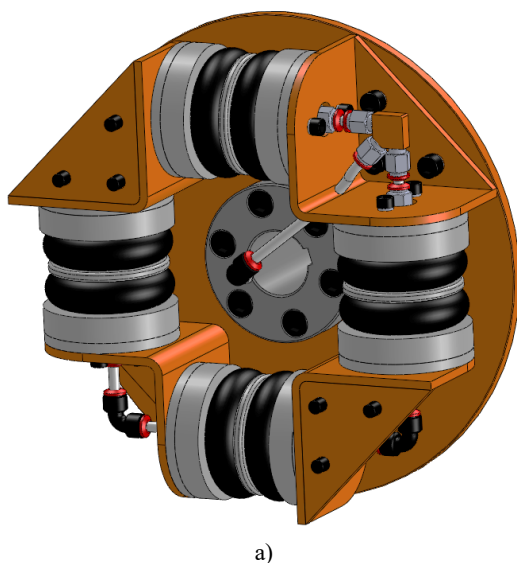
Na nasledujúcom obr. 5 je možné vidieť vyrobený prototyp pneumatickej pružnej reťazcovej

hriadeľovej spojky. Na obr.6 vidíme vnútorné usporiadanie pneumatickej spojky znázornenej na obr. 5.

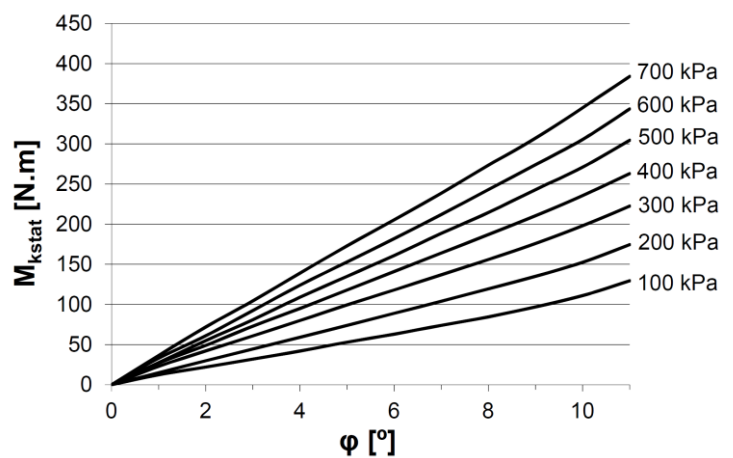
smere. Konštrukcia spojky sa zameriava na vytvorenie vysokopružnej spojky, teda spojky s nízkou hodnotou pomernej torznej tuhosti, podľa



Obr. 3. Dutý prepojovací trojuholníkový prvok



a)



b)

Obr. 4. a) Štandardný tvar pneumatickej pružnej spojky tangenciálnej typu 4-2/70-T-C, b) jej statické zaťažovacie charakteristiky

Vidíme, že osem pneumatických pružín typu *Rubena* [10] (*DUNLOP 2 3/4'' x 3*) sú usporiadané tangenciálne, pričom stabilita takto vytvorených pružných „reťazcov“ v radiálnom smere je zabezpečená pomocou telies otočných na stredovom čape. Všetky pneumatické pružiny v reťazcoch sú vzájomne prepojené kanálikmi vytvorenými v telesách spájajúcich pružiny. Z konštrukcie tejto konkrétnej spojky vyplýva, že je určená na prenos zaťažovacieho krútiaceho momentu len v jednom

rovnice (1):

$$k_0 = \frac{k_{DN}}{M_N} [\text{rad}], \quad (1)$$

kde k_{DN} je dynamická torzná tuhosť spojky pri jej menovitom krútiacom momente M_N .

Jedným z predpokladov pre dosiahnutie nízkej hodnoty pomernej torznej tuhosti spojky je dosiahnutie vysokého uhla skrútenia spojky. Tento

prototyp pneumatickej pružnej reťazcovej hriadeľovej spojky je možné podľa prvotných meraní skrútiť o 62° s maximálnym prenášaným krútiacim momentom vyše 1000 N.m.



Obr. 5. Pneumatická pružná reťazcová hriadeľová spojka

Pomocou vysokopružných hriadeľových spojok je možné vyladiť mechanickú sústavu tak že rezonancie od harmonických zložiek budenia torzného kmitania

sa nachádzajú v oblasti nízkych otáčok, teda hlboko pod voľnobežnými alebo pracovnými otáčkami stroja. Vývoj a využitie vysokopružných spojok ako dvojhmotových zotrvačiek automobilov je súčasným trendom napríklad v automobilovom priemysle.

ZÁVER

Ďalší výskum oboch prototypov pneumatických pružných hriadeľových spojok bude zameraný na určenie statických a dynamických vlastností spojok, čo znamená okrem iného určenie statických zaťažovacích charakteristík, statickej a dynamickej torznej tuhosti, tlmiacich schopností atď. Určenie týchto vlastností je kľúčové pre určenie dynamického správania torzne kmitajúcich mechanických sústav, v ktorých budú spojky aplikované. Výsledky budú následne publikované v odbornej technickej literatúre.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov:



Obr. 6. Vnútorne usporiadanie pneumatickej pružnej reťazcovej hriadeľovej spojky

KEGA 037TUKE-4/2024: Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie.

VEGA 1/0573/25: Výskum, vývoj a testovanie ladičov torzných vibrácií.

LITERATÚRA

[1] HOMIŠIN, J. (2016): *Characteristics of pneumatic tuners of torsional oscillation as a result of patent activity*. In: Acta Mechanica et Automatica 10 (4): 316-323. ISSN 1898-4088. DOI: 10.1515/ama-2016-0050.

[2] HOMIŠIN, J. (2018): *Contribution and perspectives of new flexible shaft coupling types - pneumatic couplings*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. Vol. 99: 65-77, ISSN 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.99.6>.

[3] HOMIŠIN, J. (2008): *Dostrajanie ukadóv mechanicznych drgajacych skretnie przy pomocy sprzegie pneumatycznych*. Bielsko-Biala: ATH. ISBN 978-83-60714-55-3.

[4] HOMIŠIN, J. (2002): *Nové typy pružných hriadel'ových spojok: Vývoj-Výskum-Aplikácia*. Košice: Vienala. ISBN 80-7099-834-2.

[5] MALÁKOVÁ, S. a kol. (2023): *Analysis of damage origin of bevel gear wheels*. In: Engineering Failure Analysis. Amsterdam (Nemecko) : Elsevier č. 146, pp. [1-14] [print, online]. ISSN 1350-6307.

[6] MALÁKOVÁ, S. a kol. (2020): *Meshing Stiffness—A Parameter Affecting the Emission of Gearboxes*. In: Basel (Švajčiarsko) : Multidisciplinary Digital Publishing Institute Roč. 10, č. 23, pp. [1-12] [online]. ISSN 2076-3417 (online).

[7] STURM, M. - PEŠÍK, L. (2017): *Determination of a Vibrating Bowl Feeder Dynamic Model and Mechanical Parameters*. In: Acta Mechanica et Automatica, 11(3): 243-246. ISSN 1898-4088. DOI: 10.1515/ama-2017-0038.

[8] GURSKÝ, P. (2011): *Identifikácia vplyvu pracovných cyklov na charakteristiky pružných spojok a ich porovnanie*. Dizertačná práca, Technická univerzita v Košiciach.

[9] IMI: *Compact air bellows*. Accessed: 01.09.2025. Dostupné na internete: <https://www.imi-precision.com/uk/en/list/actuators/air-bellows>

[10] RUBENA. „Air Springs”. Accessed: 01.09.2025. Dostupné na internete: https://www.rubena.eu/underwood/download/files/rubena_vlnovce_trelleborg_2019.pdf

[11] HOMIŠIN, J. (1996): *Pneumatická spojka so zväčšeným kompresným priestorom*. Patentový spis SK 278152 B6. Banská Bystrica: ÚPV SR. 5s.

[12] URBANSKÝ, M. (2021): *Pneumatická pružná reťazcová hriadel'ová spojka*. Patentový spis SK 288879 B6. Banská Bystrica: ÚPV SR. 8s.

Technologické riešenia výroby komponentu koľajového vozidla

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

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

Patrik Slušňák, Ing.

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

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

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: oleksandr.kravchenko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2668

Technological solutions for the production of rail vehicle

Abstract: This study provides a comprehensive analysis of four key manufacturing technologies for metallic components: welding, casting, *CNC* machining, and sheet metal bending. The aim is to compare their technical characteristics, economic aspects, and application potential, with particular attention to the production of a load-bearing component of a railway bogie. The results show that each technology offers distinct advantages and limitations, and the optimal choice depends on several factors such as required precision, production costs, time efficiency, and batch size. Welding ensures high strength but introduces residual stresses and potential defects in the joint area. Casting enables the production of complex or large components with cost-effectiveness in mass production but carries risks of porosity and internal stresses. Sheet metal bending allows fast and economical manufacturing of lightweight components, although limited by material thickness and cracking risks. *CNC* machining provides the highest precision and surface quality, yet it is the most time- and cost-intensive method, making it more suitable for prototypes or secondary finishing. Overall, the study highlights that the selection of the most appropriate technology should be guided primarily by time and volume requirements, with bending favored for rapid and small-batch production, while casting proves more efficient for large-scale manufacturing.

Keywords: welding, casting, *CNC* machining, sheet metal bending.

ÚVOD

Táto štúdia analyzuje štyri kľúčové technológie výroby kovových komponentov : zváranie, odlievanie, *CNC* obrábanie a ohýbanie plechu. cieľom je poskytnúť komplexné porovnanie ich technických charakteristík, ekonomických aspektov a aplikačných možností. Výsledky ukazujú, že každá technológia má svoje špecifické výhody, ale aj obmedzenia, pričom voľba vhodnej metódy závisí od viaceró

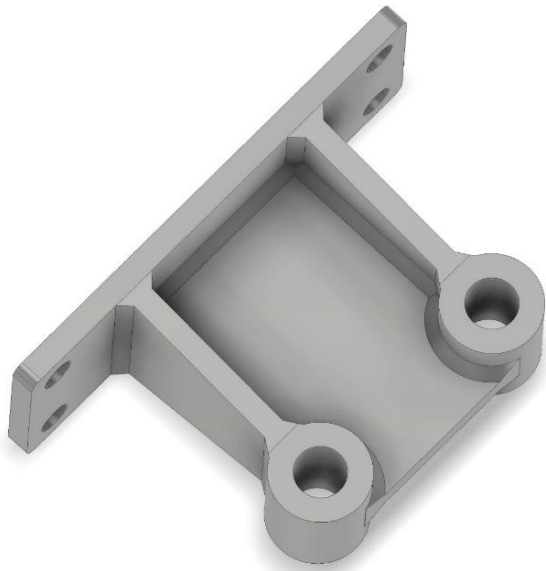
faktorov, ako sú požiadavky na presnosť, finančnú náročnosť, no najmä objem výroby a časovú náročnosť na zhotovenie.

Cena a výrobný čas komponentu sa radia medzi hlavné kľúčové parametre. Preto je nevyhnutou súčasťou pri návrhu komponentov uvažovať o technologických riešeníach samotnej výroby. Táto práca sa bude zaoberať možnosťami zhotovenia nosného komponentu železničného podvozka. Preskúma sa jeho vyrobiteľnosť zváraním,

odlievaním, obrábaním a ohýbaním. Súčasne sa porovnávajú hmotnostné parametre.

1 VÝROBA ZVÁRANÍM

Zváranie využíva teplo a tlak, pri ktorých vzniká zvar spájajúci dva alebo viacero komponentov. Medzi najpoužívanejšie technológie patrí oblúkové zváranie. Využíva elektrický oblúk na vytvorenie potrebnej teploty pre tavenie materiálov. Plynovým zváraním sa dosahuje potrebná teplota pomocou horľavých plynov. Najrozšírenejšie metódy zahŕňajú zváranie v ochrannej atmosfére (*MIG/MAG*), zváranie netaviacou sa elektródou (*TIG*), elektródové zváranie (*MMA*). Do popredia sa dostáva zváranie laserovým lúčom. Táto metóda je veľmi presná, rýchla a umožňuje zváranie veľmi tenkých alebo citlivých materiálov bez výrazného poškodenia okolitých oblastí. Robotizácia zvárania sa stala veľmi žiadanou technológiou vo výrobnom priemysle vďaka vysokej objemovej kapacite, opakovateľnosti, nižšiemu riziku chýb a nepretržitej prevádzke [1-3].



Obr. 1. Zváraný komponent

Na vyhotovenie zvaru je potrebné v mieste zvárania vytvoriť ochrannú atmosféru ktorá chráni zváraný kov pred oxidáciou. To sa dosahuje aditívnymi prvkami vo zvaracích elektródach, alebo prídavným plynom ktorý je vháňaný na miesto zvaru s prídavným materiálom. To zvyšuje náklady na výrobu zváraním. Pri procese zvárania môžu vo vnútri zvaru vzniknúť defekty, ktoré sú voľným okom nedetekovateľné a na ich kontrolu je potrebné špeciálne vybavenie. Dosiahnutie presnosti vzhľadom na tepelnú rozťažnosť je obtiažné, preto sa preferuje druhotné obrábanie tolerovaných prvkov súčiastky [1-3].

2 VÝROBA ODLIEVANÍM

Výroba odlievaním vzniká roztavením kovu a odliatím do formy, kde stuhne do požadovaného tvaru. Medzi najčastejšie procesy odlievania patrí

odlievanie do dutej formy, kde je piesok zmiešaný so spojivom hutnený do formy kde je umiestnený vzor. Následne po vybratí vzoru sa do formy odlieva. Po odliatí je potrebné dodatočné opracovanie odliatku. Presné odlievanie je proces používaný na zložité kusy, ktoré vyžadujú vysokú mieru presnosti s minimálnym obrábaním. Vytvárajú sa keramické formy pomocou voskového vzoru, ktorý sa po vytvorení formy vytápa. Odstredivé odlievanie je metóda, pri ktorej sa opakovane využívajú formy. Forma sa otáča a odstredivou silou vytlačí roztavený kov do formy. Po vytvrdnutí nie je potrebné dodatočné obrábanie [7, 8].



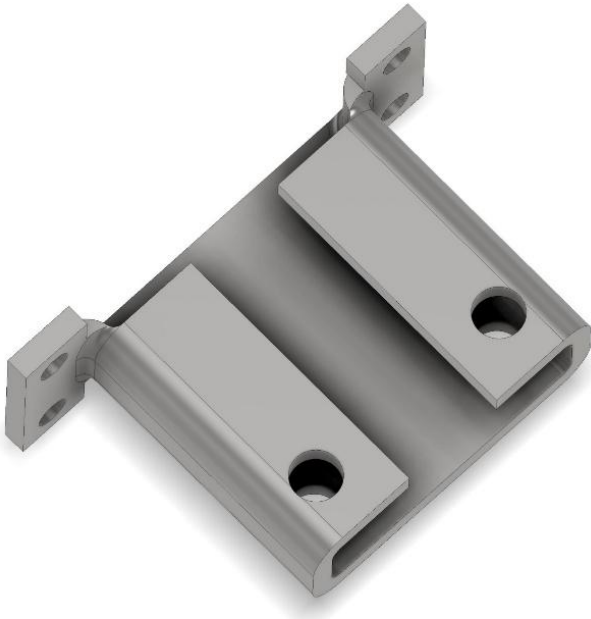
Obr. 2. Odlievaný komponent

Kvalita závisí od druhu materiálu a postupov pri procese tuhnutia. Pri odlievaní hrozí pórovitosť, trhliny a zvýšené pnutia v odlievanom komponente. Pri namáhaných súčiastkach sa odporúča odlievané prvky podrobiť doplňujúcim procesom na zníženie vnútorných pnutí. Výroba odlievaním je vhodná pre komponenty, ktoré by sa kvôli svojmu tvaru ťažko vyrábali inými technológiami. Zároveň táto technológia umožňuje veľkosériovú produkciu, čo má vplyv na čas a cenu komponentu. Cena výrobného procesu sa líši od zložitosti, použitého procesu a množstva vyrábaných súčiastok [1, 4, 5].

3 VÝROBA OHÝBANÍM

Ohýbanie plechu zahŕňa aplikáciu vonkajšej sily na plech na spôsobenie jeho deformácie pozdĺž predurčenej krivky, čím sa vytvorí definovaná geometrická forma [9]. Ohýb sa vykonáva pomocou rezníka a formy, ktorých pôsobením vďaka tlaku dochádza k ohýbaniu plechu [9]. Najčastejšie používané ohýbacie stroje sú lisy. Ohýbacie lisy môže realizovať široký rozsah ohýbacích tvarov, ako sú V a U tvary, a je vhodný pre výrobu zložitých štruktúr s viacerými ohýbmi. Ďalšou metódou je vzduchové ohýbanie, kde

tlak vzduchu tlačí plech do formy. Rotačné ťažné ohýbanie vzniká ťahaním rotujúceho plechu po forme. Valcové ohýbanie pomocou ohýbacích valcov ohýbajú do oblúka [1, 6, 9].



Obr. 3. Ohýbaný komponent

V súčasnosti plechové súčiastky dosahujú vysokú pevnosť vďaka vlákniatej štruktúre materiálu, kde nedochádza k prerušeniu vlákien. Presnosť dosiahnutých rozmerov závisí od vlastností materiálu, ich odpruženia po ohybe. Nevýhodou je možnosť vzniku trhlin, ktoré sú dôsledkom nevhodne zvoleného polomeru ohybu alebo krehkosti použitého materiálu. Výroba jednoduchých tvarov je rýchla a lacná, avšak je obmedzená hrúbkou plechu, ktorá je maximálne 10 mm. Dnešné CNC riadené ohýbačky dokážu dosiahnuť vysokú presnosť a spoľahlivosť [1, 6].

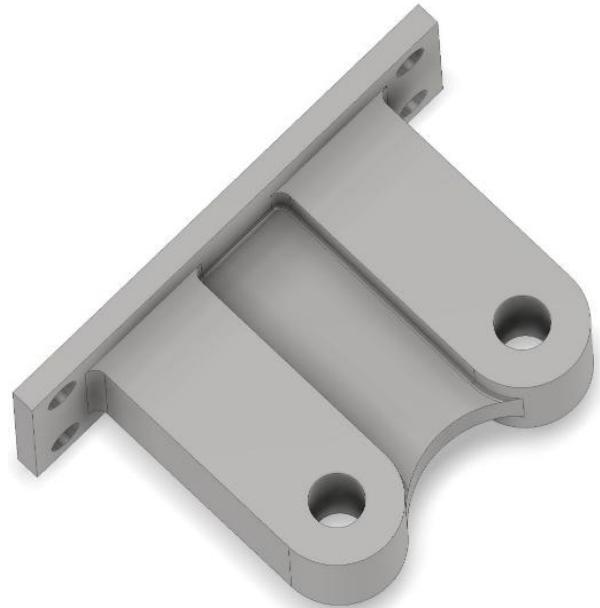
4 VÝROBA OBRÁBANÍM

CNC obrábanie je výrobná technológia, ktorá automatizuje riadenie obrábacích nástrojov pomocou počítača. Tento proces umožňuje vysokú presnosť a opakovateľnosť, čo ho robí ideálnym pre výrobu zložitých súčiastok.

Na výrobu komponentu pomocou CNC obrábacích zariadení, ako sú frézy, sústruhy, brúsky a iné. Pri zložitých tvaroch je potrebné vyhotoviť riadiaci program obrábania pomocou CAM programu. Tento proces vyžaduje podporný personál s príslušnými CAM programami, čo navyšuje náklady na výrobu pomocou CNC obrábania [10].

Výroba trieskovým obrábaním odoberá pomocou rezných nástrojov materiál z polotovaru a obrába ho do vyžadovaného tvaru. Pevnosť vyrobeného komponentu zodpovedá vlastnostiam materiálu. Obrábaním je dosahovaná vysoká presnosť a hladký povrch čo znižuje napätie na povrchu súčiastky a

zvyšuje jeho únosnosť zaťaženia. Technológia je vhodná na malosériovú a presnú výrobu. Vzhľadom na značnú časovú náročnosť a podporných služieb pri použití CNC riadených strojov je náročná na financie [1].



Obr. 4. Komponent vyhotovený obrábaním

5 POROVNANIE TECHNOLÓGIE VÝROBY

Táto kapitola sa zameriava na porovnanie rôznych výrobných technológií z hľadiska presnosti, kvality povrchu, ekonomickej náročnosti a časovej efektívnosti. Pri skúmanom komponente nie je presnosť povrchu zásadným faktorom, avšak na styčných a spojovacích prvkoch je nevyhnutná pre zabezpečenie zmontovateľnosti.

5.1 Presnosť a kvalita

Presnosť a kvalita povrchu pre skúmaný komponent nemá vzhľadom na jej veľkosť a použitie významný vplyv. Kvalita povrchov je vyžadovaná na prvkoch komponentu, ktoré sú v kontakte s konštrukciou, aby bola zabezpečená zmontovateľnosť komponentu. Presnosť je vyžadovaná na spájacie prvky. Pri odlievaní a zváraní sa vyžaduje dodatočné obrábanie spojovacích prvkov súčiastky na vyžadovanú presnosť a kvalitu aby bola dosiahnutá zmontovateľnosť.

5.2 Finančná náročnosť

Ekonomické porovnanie technológií ukazuje výrazné rozdiely v nákladovej štruktúre a ekonomickej efektívnosti pri rôznych objemoch výroby. CNC obrábanie má najvyššie náklady. Vysoké náklady sú spôsobené cenou strojov, kvalifikovaných operátorov a podporný personál. Odlievanie je často nákladovo efektívnejšie než iné výrobné metódy pre vysokú objemovú výrobu. Hoci počiatkové náklady na

vytvorenie formy môžu byť vysoké, odlievania sa stáva efektívnym pre veľké výrobné série. Ohýbanie plechu je najkonkurencieschopnejšie cenovo pri nízkych až stredných objemoch [11]. Zváranie má variabilné náklady v závislosti od zručnosti zvárača a zariadenia. Robotické zváranie môže významne znížiť náklady pre sériovú výrobu vďaka vysokej objemovej kapacite a opakovateľnosti [12].

5.3 Časová náročnosť

Časová náročnosť pre skúmaný komponent závisí pri CNC obrábaní od použitého stroja, zvoleného druhu a kvality nástroja, kvalifikovanosti operátora a programátora. CNC obrábanie môže byť časovo rýchlejšie ako odlievania ak nepočítame s časom vývoju formy na odlievania. Opraviteľnosť nepodarkov môže byť časovo náročná. Ohýbanie môžeme zaradiť medzi najrýchlejšie metódy zhotovenia. Svojou univerzálnosťou nástrojov a dostupnosťou plechov je možné rýchle zhotovenie v závislosti od dostupných materiálov u výrobcu. Čas zvárania závisí od schopností zvárania samotného zvárača. V prípade využitia robotického zvárania je potrebné programovanie zváracieho stroja, ktoré je časovo náročné. Pred zváraním je potrebná príprava zváraných komponentov, čo navyšuje čas.

ZÁVER

Po analýze výrobných technológií možno konštatovať, že vhodný výber výrobnej technológie závisí najmä od časových a množstevných požiadaviek na výrobu. Pri výrobe komponentu malosériovej výroby, kde je potrebná rýchla výroba je možné preferovať výrobu ohýbaním vďaka jej univerzálnosti nástrojov a dostupnosti materiálov. Pri potrebe veľkosériovej výroby je taktiež výhodná výroba ohýbaním, avšak v prípade nedostatku času na vývoj je výhodnejšie využiť výrobu odlievaním. Technológia umožňuje výrobu komplexných tvarov a rýchlu sériovú výrobu. Výroba obrábaním je nákladná pre daný komponent. Výhodnosť takejto výroby sa vypláca pri prototypoch. Ručné zváranie môžeme považovať, ako strednú cestu medzi cenou a kvalitou. Pri zavedení robotického zvárania je možné dosiahnuť cenovo a časovo výhodnejšie podmienky, avšak je potrebné rátať s vyššími nákladmi na zaobstaranie zváracieho robota. Veľký význam pre výber správnej technológie budú mať mechanické vlastnosti, ktoré budú predmetom ďalšej štúdie.

Podakovanie

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

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00129“.

LITERATÚRA

- [1] FOLTÍN, P. a kol. (2017): *Technológia strojárskych výroby I: Tvorba polotovarov*. Žilina: Žilinská univerzita, ISBN 978-80-554-1376-9.
- [2] PÍŠKA, M. (2015): *Základy tvárnenia a zvárania*. Brno: VUT Brno, ISBN 978-80-214-5237-8.
- [3] SHAFEEK, M. - SURANJAN, S. - DORESWAMY, D. et al. (2024): *Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of GMAW welded S275 steel welded zone*. In: *Discov Mater* 4, 96, <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00169-4>
- [4] PATWARI, A. U. et al. (2024): *Defects and remedies in casting processes*. In: *Materials Research Communications* [online], 12(2), 223-235. [cit. 2025-09-23]. DOI: 10.1007/s44245-024-00067-2
- [5] NIKLAS, A. et al. (2015): *Effect of Microstructure and Casting Defects on the Mechanical Properties of Secondary Alloy*. In: *Procedia Manufacturing* [online], 2, 105-112. [cit. 2025-09-23]. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.019.
- [6] PANICKER, G. J. et al. (2022): *Study on Sheet Metal Bending*. In: *ScienceOpen Preprints* [online], [cit. 2025-09-23]. Dostupné na: https://www.scienceopen.com/document_file/e2ddc4df-193e-44a3-8b5e-38bed6333af7/ScienceOpenPreprint
- [7] AMARISHKUMAR, J. P. – SUNILKUMAR, N. CH. (2023): *Recent Advancements and Critical Insights in Casting Processes*. In: *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering (IJSRMME)*, Volume 7, Issue 6, pp. 5-18, ISSN 2456-3307
- [8] MORAVEC, J. (2020): *Technológia I*. Žilina: EDIS - Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 978-80-554-1731-8.
- [9] KOMASPEC (2024): *An Engineers' Guide to Sheet Metal Bending* [online]. [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://www.komaspec.com/about-us/blog/guide-to-sheet-metal-bending/>
- [10] VASILKO, K. - BELAN, J. (2023): *CNC obrábanie v modernej výrobe*. Bratislava: VEDA, vydavateľstvo SAV, 312 s. ISBN 978-80-224-1901-7.
- [11] SLOTA, J. - SPIŠÁK, E. (2023): *Technológia ohýbania plechov*. Košice: TUKE, 189 s., ISBN 978-80-553-4089-6.
- [12] KOMASPEC (2024): *An Engineers' Guide to Sheet Metal Bending* [online]. [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://www.komaspec.com/about-us/blog/guide-to-sheet-metal-bending/>

RECENZIA

Na knižnom trhu sa objavila pred časom zaujímavá kniha s názvom *Kniha geometrických kouzel, matematická expedice*, od autora *Davidu Achesona*. Vydalo vydavateľstvo *Dokořán, Praha*, 2023. ISBN 978-80-7675-142-2. Pretože v publikácii je opísaný obrovský priestor geometrie telies, tak som sa rozhodol záujemcov oboznámiť s obsahom tejto knihy. Kniha má 32 kapitol rôzneho rozsahu. Jednotlivé kapitoly sú rozdelené do niekoľkých podskupín, ktoré autor rozdelil nasledujúco: *Euklidove základy, Svet matematiky v starovekom Grécku, 371 dôkazov Pytagorovej vety, Zlatý rez, Galileo a Thalesova veta, Inšpektor Euklides zasahuje, Ďalšie kúsky s π , Euklidove základy 1847, Dôkaz obrázkom?* Po tomto rozdelení nasledujú *Poznámky, Odporúčaná literatúra, Register*. Kniha má 285 strán vrátane všetkých príloh. Autor publikuje známy fakt o geometrii, teda odpoveď matematika *Euklida*, ktorú dal na otázku *egyptského kráľa Ptolemaia I*. Ten sa ho opýtal: „*Jestvuje kráľovská cesta pre pochopenie geometrie?*“ *Euklides* stručne odvetil: „*Žiadna kráľovská cesta ku geometrii nejestvuje.*“ Takisto nápis nad *alexandrijskou Akadémiou* hlásal: *Neznalý geometrie tu nevstupuj!*

Pre zaujímavosť uvediem tri problémy, ktoré sú v knihe riešené. Prvá dáva odpovedať na otázku, aký vzorec má byť odvodený pre vzdialenosť medzi stredmi dvoch rôzne veľkých kružníc. Túto úlohu riešil aj *A. Einstein*, keď ho o pomoc požiadala pätnásťročná žiačka. Podotýkam, že v roku 1952, a prvé zadanie úlohy je z roku 1800. *A. Einstein* dal iba všeobecný návod na riešenie – obe kružnice sa v jeho riešení nedotýkajú. Druhý problém spočíva v balení guľí, kde *J. Kepler* v roku 1611 uzavrel, že žiadne tesnejšie balenie ako v šesťuholníku nejestvuje. Prvý dôkaz jeho domnienky sa objavil až v roku 1988! Veľmi zaujímavá je úloha s rebríkmi. Rebríky sú v uličke opreté o protiľahlé steny. Výšky, kde sa rebríky dotýkajú stien sú dané. Otázka je, v akej výške sa rebríky križujú. Možno nás prekvapí odpoveď *nezávisí to od šírky uličky*.

Túto interesantnú publikáciu odporúčam každému záujemcovi, ktorého zaujíma geometria. Kniha je vyhotovená v peknej grafickej úprave s prebalom a pripojený je aj zoznam odporúčanej literatúry. Text obsahuje až 246 obrázkov, čo je iste pozoruhodné pre knihu s takýmto rozsahom.

JM

Autor *Michael White* vo svojej knihe *Rozhovory s Isaacom Newtonom* vydanej v slovenskom preklade vo vydavateľstve *IKAR* ISBN 978-80-551-7754-0 sa vo fiktívnom dialógu s *I. Newtonom* pokúša poodhaliť niektoré nejasné miesta v živote veľkého vedca. Na tomto mieste odporúčam aj prečítať si môj príspevok o *I. Newtonovi* v časopise *Technológ* číslo 2/2025 strany 6-11. Posudzovaná kniha má 120 strán. Vyberám iba niektoré miesta, kde je potrebné doplniť uvedené fakty prezentované *M. Whiteom*. Nemožno prijať to, akoby nikto pred *Newtonom* neštudoval optiku. Na počudovanie v texte nie je spomenutý *J. Kepler*, o ktorom predsa *Newton* musel vedieť a aplikovať vo výskume aj ním formulované tri zákony. Tieto zákony boli dôležitým východiskom pre *Isaaca Newtona* pri jeho formulovaní zákonov gravitácie a z *Newtonovho* gravitačného je možné všetky tri *Keplerove zákony* odvodiť pomocou diferenciálneho počtu. Pri ich hľadaní boli pre *Keplera* dôležité pozorovania *Tycha Braheho*, ktoré mu tento odkázal po svojej smrti (predtým spolupracovali). Prvé dva zákony publikoval *Kepler* v roku 1609 v diele *Astronomia Nova (Nová astronómia)*, tretí zákon pridal v roku 1619 v diele *Harmonices Mundi (Harmónie sveta)*. Nevedno čo viedlo autora k zamlčaniu tohto faktu. Pokiaľ ide o optiku, tu takisto položil základy *J. Kepler* v diele *Dioptrika, (český preklad) Olomouc* 2011, ISBN 978-80-803958-3-1. *Latinský* originál má titul *Dioptrice, Augsburg* 1611. V texte je dôležité pojednanie o šošovkách na stranách 159-162 českého prekladu. Takisto považujem za potrebné uviesť aj prácu *M. Kopernika* *Obehy nebeských sfér, VEDA Bratislava* 1974, originál *De revolutionibus orbium caelestium, Norimberg* 1543. V matematickej časti *Obehov* zanechal výraznú stopu aj *nemecký* matematik *Georg Joachim von Lauchen Rhaeticus* (na konci života žil v *Košiciach*). Kniha je iba oslavou *I. Newtona*, čo nekritizujem, ale bez predošlých zistení iných vedcov by ani jeho dielo nebolo možné vytvoriť. Na záver iba spomeniem *Newtonovo* dielo *Matematické princípy prírodnej filozofie, pôvodne Philosophiae Naturalis principia Mathematica* z roku 1687. Je to skvelá zásluha významného fyzika a matematika, ale zas je tu fakt, ktorý sa nedá opomenúť. V roku 1683 sa *Viedeň* ledva ubránila *tureckému* náporu



a v pevninskej *Európe* mali ľudia oveľa závažnejšie problémy. *Newton* mohol pokojne študovať a bádať v závetrí. V posudzovanej knihe je na strane 32 text: “*Ľudské poznanie je ako nekonečná stavba-jeden vedec položí základy, druhý pridá dve tehly a každý ďalší pridá rozličné množstvo tehál.*” S uvedeným sa dá iba súhlasiť, hoci autor nie celkom tento fakt rešpektoval vo svojej knihe.

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, физических принципов нестандартных технологий, технологичности конструкции инструментов, экономики производственного процесса, экологизации, переработке отходов. Также публикует работы о машинах, инструментах, препаратах и измерительной технике для области механических технологий, результатов научных исследований в сфере информационных технологий в технологической области. Публикует статьи по истории и эволюции механических технологий. Журнал публикует статьи на языках: словацком, чешском, польском, русском, английском и немецком.

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

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 – 8996

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

Telefón: 041-513 2764, 513 2814

Fax: 041-513 1535

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

ISSN 1337-8996

DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2025.3>