Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Diplomová práce

Tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů

Bc. Michal Braha

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Braha

Inženýrství údržby

Název práce

Tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů

Název anglicky

Tribological characteristics of selected surfacing materials

Cíle práce

Shromáždit literární podklady o návarových materiálech používaných pro zvýšení odolnosti proti opotřebení. Vyhodnocení experimentálních zkoušek odolnosti proti opotřebení u vybraných návarových materiálů.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše),

Cíl práce a metody jejího zpracování,

Výsledky experimentů a jejich diskuse,

Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

Opotřebení, abrazivní částice, navařování, návarový materiál, karbidy

---

Doporučené zdroje informací

AHMED, N.: New Developments in Advanced Welding, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge, England, 2005.
Časopisy: Strojírenská technologie, MM průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení – spojování materiálů, Technik.
DASTUR, M., R., MOSKOVITC., L., N.: Tallored coating for hardfacing. In Proceding of the annual powder. Metallurgy conference, 1983.
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T.: Svařování, I. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2005.
KRÁL, M.: Engineering Technology, Praha : ČVUT, 2003.
Ochrana proti opotřebení a opravy svařováním, navařováním a pájením, Praha : Böhler Uddeholm, 2005.
Repair and Maintenance Welding Handbook. ESAB AB, 120 s.
SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E.: Abrazivní opotřebení materiálu. Praha: ČVUT, 2007.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 17. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci *"Tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů"* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30.března 2024 _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Bc. Ing. Petru Hraběti, Ph.D. za vstřícnost, vedení a užitečné rady. Dále děkuji rodině a přátelům, především však mé drahé manželce za ohromnou podporu a trpělivost.

Tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů

Abstrakt

Diplomová práce se detailně zabývá zkoumáním tribologických charakteristik návarových materiálů, které jsou primárně určeny pro prostředí s vysokou mírou abrazivního opotřebení. V průběhu práce jsou rozebrány tribologické procesy, které se vyskytují při interakci mezi povrchy materiálů, a to včetně jejich opotřebení. Důraz je kladen na abrazivní opotřebení, což je fenomén, jenž je často rozhodující v následných průmyslových aplikacích. Jsou zde podrobně popsány mechanismy tohoto typu opotřebení a faktory ovlivňující jeho průběh a míru. Dále je provedena analýza metod zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení, které slouží k posouzení jejich vhodnosti pro konkrétní aplikace. Tyto zkoušky jsou klíčové pro optimalizaci materiálů a minimalizaci jejich opotřebení v praxi. Vedle toho je práce rozšířena o exkurz do technologie navařování. Experimentální část práce je věnována testování a následnému porovnání vybraných návarových materiálů z hlediska jejich odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. Tyto souhrnné poznatky různých aspektů tribologie, technologie navařování a materiálů přispívají k hlubšímu porozumění reagování materiálů na podmínky intenzivního opotřebení a poskytují důležité poznatky pro průmyslovou praxi a výzkum.

Klíčová slova: Tribologie, abrazivní opotřebení, návary, karbidy, abraze, abrazivní částice, navařování, materiály

Tribological characteristics of selected surfacing materials

Abstract

Diploma thesis thoroughly examines the tribological characteristics of hardfacing materials primarily designed for environments with high levels of abrasive wear. Throughout the thesis, tribological processes occurring during the interaction between material surfaces are analysed, including their wear. Emphasis is placed on abrasive wear, a phenomenon often crucial in subsequent industrial applications. Detailed descriptions of the mechanisms of this type of wear and factors influencing its progression and extent are provided. Furthermore, an analysis of methods for testing the resistance of materials to abrasive wear is conducted to assess their suitability for specific applications. These tests are crucial for optimizing materials and minimizing their wear in practice. Additionally, the thesis includes an excursion into hardfacing technology. The experimental part of the thesis is dedicated to testing and subsequent comparison of selected hardfacing materials in terms of their resistance to abrasive wear. These comprehensive insights into various aspects of tribology, hardfacing technology, and materials contribute to a deeper understanding of material response to conditions of intensive wear, providing valuable knowledge for both industrial practice and research.

Keywords: Tribology, abrasive wear, abrasion, abrasive particles, hardfacing, carbides, resistance to abrasive wear, materials

Obsah

Úvod **1**
1.1 Cíle práce 3
1.2 Metodika 3

2 Teoretická východiska **4**
2.1 Tribologie 4
2.1.1 Tribologický systém 4
2.1.2 Tribologický proces 5
2.1.2.1 Kontaktní proces 6
2.1.2.2 Třecí proces 6
2.1.2.3 Mazací proces 6
2.1.2.4 Proces opotřebení 7
2.2 Opotřebení 7
2.2.1 Adhezivní opotřebení 7
2.2.2 Vibrační opotřebení 8
2.2.3 Únavové opotřebení 8
2.2.4 Kavitační opotřebení 8
2.2.5 Erozivní opotřebení 9
2.2.6 Abrazivní opotřebení 9
2.3 Mechanismy a vlivy na abrazivní opotřebení 11
2.3.1 Mechanismy abrazivního opotřebení 11
2.3.2 Vliv tvaru abrazivních částic 12
2.3.3 Vliv velikosti abrazivních částic 13
2.3.4 Vliv poměru tvrdostí materiálu a abrazivních částic 15
2.4 Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení 16
2.4.1 Laboratorní zkoušení abrazivního opotřebení 16
2.4.1.1 Přístroje s volnými částicemi 17
2.4.1.2 Přístroje s pevnými částicemi 19
2.4.2 Provozní zkoušky abrazivního opotřebení 21
2.5 Technologie navařování 22
2.6 Metoda zkoušení odolnosti proti opotřebení ASTM G65 24
2.6.1 Zkušební abrazivo pro ASTM G65 24

3 Experimentální část 27
3.1 Vybrané návarové materiály 27
3.1.1 Návar CastoMag 45351 27
3.1.2 SafeHARD 600 28
3.1.3 EnDOtec® DO*31 28
3.1.4 EG 8336 28
3.1.5 TeroMatec 4601 29
3.1.6 Nanonávar EnDOtec DO*390N 30
3.2 Příprava zkušebních těles 31
3.2.1 Navařování 31
3.2.2 Obrábění 33
3.2.3 Očištění vzorků 35
3.2.4 Příprava abraziva 35
3.3 Průběh zkoušení 37
3.3.1 Měření tvrdosti 37
3.3.2 Postup zkoušení odolnosti proti opotřebení 38
3.3.3 Postup měření 40

4 Výsledky a diskuse 42
4.1 Měření tvrdosti 42
4.1.1 Měření opotřebení 43
4.2 Diskuse výsledků 45
4.2.1 Tvrdost materiálů 45
4.2.2 Závislost odolnosti proti opotřebení na tvrdosti 46
4.2.3 Srovnání odolnosti zkoušených materiálů 47

5 Závěr 49

6 Seznam použitých zdrojů 51

Přílohy 54

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Tribologický systém podle DIN 51 320 (Zdroj [2]) 5
Obrázek 2 - Schémata principu základních druhů opotřebení (Zdroj [9]) 10
Obrázek 3 - Fragmentace abrazivních částic (Zdroj [11]) 14

Obrázek 4 - Vztah velikosti částic výplně kompozitu a abrazivních částic (Zdroj vlastní - [14]) 15
Obrázek 5 - Schéma přístroje s brusnou nádobou (Zdroj [12]) 18
Obrázek 6 - Schéma bubnového zkoušecího přístroje (Zdroj [12]) 18
Obrázek 7 - Schéma zkušebního přístroje s kotoučem (Zdroj [12]) 19
Obrázek 8 - Schéma přístroje s brusným plátnem (Zdroj [12]) 20
Obrázek 9 - Schéma přístroje s brusným kotoučem (Zdroj [12]) 20
Obrázek 10 - Testovací zařízení abraze a rázů (Zdroj [19]) 21
Obrázek 11 - Koncept trubičkového navařovacího drátu (Zdroj [22]) 23
Obrázek 12 - Křemenný písek „Ottawa sand“ pro G65 (Zdroj [23]) 26
Obrázek 13 - Mikrostruktura materiálu s komplexními karbidy (zvětšeno 1000x) 29
Obrázek 14 - Mikrostruktura návaru DO*390N s nanočásticemi komplexních karbidů mezi jehličkovými karbidy chromu (Zdroj [28]) 30
Obrázek 15 - Svařovací systém Castolin TotalArc^2 3000 (Vlastní zdroj [14]) 31
Obrázek 16 - Proces navařování vzorků (Vlastní zdroj [14]) 32
Obrázek 17 - Řezání zk. těles vysokotlakým vodním paprskem (Vlastní zdroj [14]) 33
Obrázek 18 - Zkušební těleso v procesu přípravy – broušení (Vlastní zdroj [14]) 34
Obrázek 19 - Analytický prosévací přístroj VPK – 40 (Vlastní zdroj [14]) 35
Obrázek 20 - Abrazivo použité v experimentu (vlevo 50x, vpravo 500x zvětšeno) 36
Obrázek 21 - Optický tvrdoměr (Vlastní zdroj [14]) 37
Obrázek 22 - Odečítací zařízení optického tvrdoměru (Vlastní zdroj [14]) 38
Obrázek 23 - Zkoušecí stroj abrazivního opotřebení ITE Tester T-07 (Vlastní zdroj [14]) 38
Obrázek 24 - Schéma použitého zkušebního systému 5 (Zdroj [17]) 39
Obrázek 25 - Zkušební těleso po cyklu zkoušky opotřebení (Vlastní zdroj [14]) 40
Obrázek 26 - Analytická digitální váha Kern ABS (Vlastní zdroj [14]) 41
Obrázek 27 - Opotřebený povrch zkušebních těles (50x zvětšeno) (Vlastní zdroj [14]) 45
Obrázek 28 - Koroze na povrchu vzorku (Vlastní zdroj [14]) 47

Obrázek 29 - Zkušební tělesa [14 - Vlastní zdroj] 48

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Závislost poměrné odolnosti na tvrdosti abraziva (Zdroj [15]) 16
Tabulka 2 - Sítová analýza doporučeného abraziva pro G65 [23] 25
Tabulka 3 - Parametry navařování vzorků materiálů 32
Tabulka 4 - Systém označení zkušebních těles 33
Tabulka 5 - Drsnosti povrchů zkušebních těles podle materiálu návaru 35
Tabulka 6 - Technické parametry prosévacího přístroje VPK – 40 (Zdroj [29]) 36
Tabulka 7 - Parametry zkoušecího stroje abraze ITE Tester T-07 [17] 39
Tabulka 8 - Vypočítané hodnoty tvrdostí 42
Tabulka 9 - Průměrné hodnoty hmotnostních úbytků 44

Seznam vztahů

Vztah 1 - Poměr tvrdosti abrazivních částic a opotřebovávaného materiálu 15
Vztah 3 - Výpočet tvrdosti podle Vickerse 42
Vztah 4 - Výpočet dráhy skluzu 43
Vztah 5 - Výpočet rychlosti skluzu 43
Vztah 6 - Podíl hmotnostního úbytku referenčního a sledovaného materiálu 47

Seznam chemických značek

Fe – železo

Cr – chrom

Si – křemík

Mn – mangan

Ni – nikl

Nb – niob

Mo – molybden

W – wolfram

B – bor

CrC – karbid chromu

Úvod

V průmyslu je nejen nevyhnutelné, ale často i požadované, aby docházelo k vzájemnému kontaktu a pohybu funkčních povrchů, například pro přenos mechanické energie. Proto je důležité zkoumat tribologické charakteristiky daných materiálů, které jsou určujícím parametrem průběhu tribologických procesů. Mohou ovlivnit například mechanické a tepelné ztráty dané součinitelem smykového tření a také výskyt a míru opotřebení zainteresovaných povrchů. V oblasti průmyslového a technického inženýrství hraje problematika opotřebení materiálů klíčovou roli. Zvláště v prostředích s vysokou mírou abraze je nezbytné vyvíjet a testovat materiály, které odolají extrémním podmínkám a prodlouží životnost součástí a strojních zařízení. Jednou z klíčových oblastí v tomto kontextu je výzkum tribologických charakteristik návarových materiálů.

Tribologie, věda o procesech tření, mazání a opotřebení, se stala nedílnou součástí moderního inženýrství i technologií. Jejím cílem je optimalizace výkonu a životnosti komponentů. Prostřednictvím tribologických studií lze identifikovat vhodné materiály pro konkrétní aplikace a minimalizovat ztráty způsobené třením a opotřebením.

Tato diplomová práce se zaměřuje na tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů v kontextu abrazivního opotřebení. Cílem je provést analýzu různých návarových materiálů a jejich chování v prostředích s vysokou mírou abraze. Zvláštní pozornost bude věnována faktorům ovlivňujícím tribologické vlastnosti materiálů, jako jsou složení, mikrostruktura a procesy výroby návaru.

V rámci této práce budou popsány různé metody hodnocení tribologických vlastností návarových materiálů, jako jsou laboratorní a provozní testy. Důraz bude kladen na vývoj experimentálních postupů pro hodnocení opotřebení a optimalizaci vlastností návarových materiálů s ohledem na konkrétní aplikace.

Vzhledem k důležitosti problematiky opotřebení materiálů pro průmyslové odvětví a technologický pokrok je tato práce zaměřena na poskytnutí uceleného pohledu na tribologické charakteristiky návarových materiálů. Věřím, že výsledky této práce přispějí k

lepšímu porozumění chování materiálů v abrazivních prostředích a poskytnou užitečné informace pro průmyslové aplikace a výzkum v oblasti tribologie.

1.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o tribologických procesech, především procesu abrazivního opotřebení a řešení zmírnění jeho dopadů pomocí vybraných otěruvzdorných návarových materiálů. Dále pak porovnat jejich vlastnosti v laboratorně simulovaných podmínkách abraze.

V teoretické části jsou přiblíženy základy tribologie, tribologických procesů, a především základní druhy opotřebení, přičemž největší důraz je kladen na abrazivní opotřebení, příčiny jeho vzniku a různé mechanismy průběhu tohoto druhu opotřebení. Následně se experimentální část věnuje tvrdosti zkoumaných materiálů, jejich odolnosti vůči abrazi a následnému porovnání zjištěných výsledků.

1.2 Metodika

Teoretická část této diplomové práce je zpracována ve formě literární rešerše rozmanitých literárních a informačních zdrojů. Rešerše umožňuje ucelený přehled o soudobých znalostech ve zkoumaném odvětví. Z této rešerše poté vychází experimentální část. V úvodních kapitolách se práce věnuje smyslu tribologie, rozebírá tribologický systém a procesy. Dále se věnuje všem druhům opotřebení, zvláště pak rozebírá mechanismy a vlivy na opotřebení abrazivní. Popisuje technologii navařování a metody zkoušení odolnosti vůči abrazi.

Experimentální část popisuje zkoumané návarové materiály pro podmínky abrazivního opotřebení, proces výroby a přípravy zkušebních těles a průběh zkoušení a měření výsledných hodnot. Dále uvádí výsledná data a jejich zpracování do výsledků, které jsou následně diskutovány.

2 Teoretická východiska

V této části práce je popsána problematika tribologie, proces opotřebení, zejména abrazivní opotřebení, jeho mechanismy a vlivy na jeho průběh a metody zkoušení odolnosti materiálů proti otěru. V této části je také popsána technologie navařování.

2.1 Tribologie

Tribologie je vědní obor zabývající se procesy tření, opotřebení a mazání. Tedy ději mezi povrchy, které se vzájemně po sobě pohybují. Podoblastmi tohoto vědního oboru jsou potom tribochemie, která zkoumá chemické charakteristiky a struktury v třecích uzlech, tribofyzika soustředící se na fyzikální vlastnosti interesovaných materiálů a tribotechnika, jejíž úkolem je zohledňovat konstrukci, její instalaci, provozní podmínky a údržbu tribologického systému. [1] [2] [3]

2.1.1 Tribologický systém

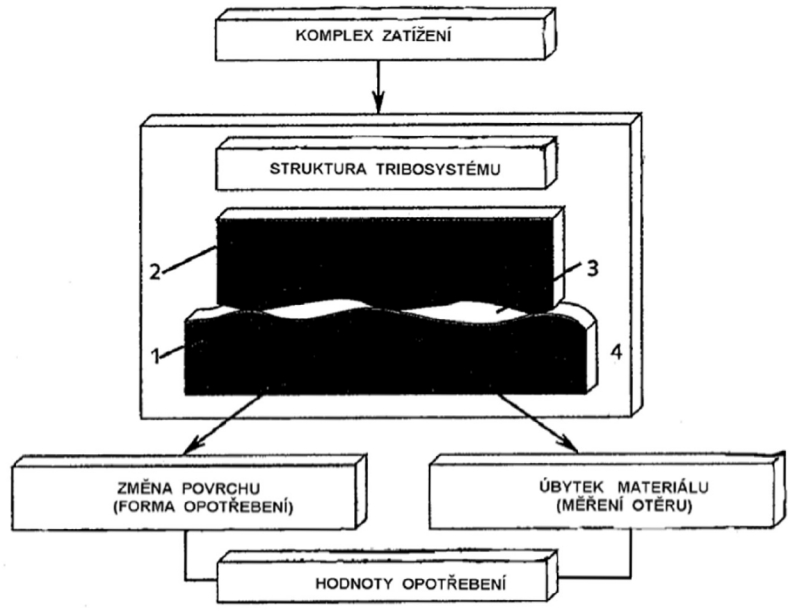
Docent Helebrant definuje tribologický systém jako: *„Umělý nebo přirozený materiální systém základní úrovně, ve kterém probíhá tření jako proces v důsledku vzájemného působení minimálně dvou struktur systémových prvků. Tribologický systém představuje jeden třecí uzel, který ve své základní struktuře obsahuje čtyři prvky.“*[1]

Těmito prvky tribologického systému, schematicky zobrazeného na obrázku 1, jsou základní třecí těleso (1), třecí těleso (2), a mezilátka (3), jež se řadí mezi aktivní prvky a okolí (4), které je prvkem pasivním, nepřímo se podílejícím na transformační funkci. Pokud některý z aktivních prvků v systému není, nazýváme takový systém redukovaným.

[1] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika [online]. Ostrava, 2000 [cit. 21.3.2024]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-I-Tribodiagnostika-skripta.pdf

V některých případech může okolí splývat s jedním z aktivních prvků – např. lopatka parní turbíny – pára nebo křídlo letadla – vzduch. [2] [3]

Obrázek 1 - Tribologický systém podle DIN 51 320 (Zdroj [2])



1 – základní třecí těleso, 2 – třecí těleso, 3 – mezilátka, 4 – okolí

2.1.2 Tribologický proces

Tribologický proces se charakterizuje jako reciproční působení výše zmíněných prvků tribologického systému, probíhající v reálném prostoru a čase. Z hlediska vzájemných vazeb tribologie zkoumá: [1] [2]

- Kontaktní procesy
- Třecí procesy
- Mazací procesy
- Procesy opotřebení

2.1.2.1 Kontaktní proces

Kontakt (dotyk) prvků tribologického systému je jev, který je pro plnění požadované funkce primární. V jeho místě totiž dochází k přenosu mechanické energie. Při tomto procesu vznikají ztráty, tangencionální napětí, deformace, lokální skluzy apod. Vše závislé na vlastnostech daných prvků. [2]

2.1.2.2 Třecí proces

Tření je přírodní jev závislý na relativním pohybu dvou prvků tribologického systému, které se navzájem dotýkají. Obecně se dá definovat jako: *„Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí.“*

Z hlediska přítomných prvků známe tření suché, při němž se po sobě pohybují v adhezních vrstvách povrchy pevných těles bez přítomnosti maziva. Dále kapalinné tření, během kterého jsou povrchy odděleny vrstvou mazacího média. Kombinace těchto dvou druhů tření je známo jako smíšené tření, při kterém se z důvodu drsnosti povrchu povrchy místy bodově dotýkají a místy jsou odděleny vrstvou maziva.

Ke kvantitativnímu vyjádření třecích vlastností materiálů slouží třecí součinitel f *(případně* μ, ξ*)*. [2][4]

2.1.2.3 Mazací proces

Mazání je v podstatě zásah do tribologického systému, jehož smyslem je upravit charakter procesu tření ze suchého na kapalinné a zamezit tak přímému dotyku navzájem se pohybujících povrchů. Mezi funkční plochy je vpravováno mazivo, čímž se snižuje tření mezi povrchy a také míra jejich opotřebení.

Základní dělení maziv je určováno podle jejich skupenského stavu – tuhá, kapalná, plastická a plynná maziva. Tento jejich stav určuje vhodnost jejich využití v konkrétních konstrukčních případech. Ne všechny průmyslové aplikace však ze své funkční podstaty mazání tribologických uzlů umožňují. [1] [2] [5]

2.1.2.4 Proces opotřebení

Vzhledem k zaměření na vlastnosti vybraných návarových materiálů, jejichž hlavním aspektem je odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, se tato práce procesům opotřebení podrobněji věnuje v následujících samostatných kapitolách.

2.2 Opotřebení

Mezi problémy, kterým je ve všech průmyslových odvětvích třeba čelit, má opotřebení materiálů své pevné místo. Jedná se o nevyhnutelný jev, jehož důsledkem v kombinaci s dalšími druhy poškození, dochází nejdříve k omezení funkce a v další fázi ke úplné ztrátě této funkce strojní součásti nebo dokonce celého strojního zařízení. [6]

Profesor Pošta se tomuto tématu podrobněji věnuje ve své publikaci *Provozuschopnost strojů*, ve které pojem opotřebení definuje: „*Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává*.“[2]

Dále opotřebení dělí na šest druhů podle podstaty jeho vzniku, které jsou popsány v následujících podkapitolách. [6] [7] [8] [9]

2.2.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení vzniká třením povrchu dvou tuhých těles, která jsou navzájem přitlačována normálovou silou, přičemž se mezi povrchy nevyskytují jakékoliv cizí částice. Jakou měrou bude adhezivní opotřebení poškozovat pracovní povrchy, ovlivňuje zejména přítomnost maziva, velikost normálového zatížení, relativní rychlost vzájemného pohybu povrchů, množství a tvar mikro nerovností interagujících povrchů a také vlastnosti daných materiálů, které ovlivňují jejich schopnost vytvářet adhezní mikrospoje. Dopady

---

[2] [6] POŠTA, J. Provozuschopnost strojů. [Učební texty]. ČZU, TF, Praha, 2002, ISBN 80-213-0966-0

adhezivního opotřebení lze potlačit primárně vhodnou konstrukcí a volbu materiálů, dále pak vhodným mazáním a důslednou údržbou. [6] [7] [8] [9]

2.2.2 Vibrační opotřebení

Tento druh opotřebení je charakteristický pro povrchy vzájemně konající kmitavé a tečné posuvy, zatímco jsou přitlačovány silou v normálovém směru. K vibračnímu opotřebení dochází hlavně tehdy, je-li amplituda pohybu větší, než jsou pružné deformace povrchů schopny vyrovnat, a tehdy dochází ke skluzům. Typicky se tak děje ve stykových plochách valivých segmentů s kroužky valivých ložisek při nesprávném transportu. Rozsah dopadů vibračního opotřebení závisí především na vlastnostech materiálů, míře normálového zatížení, frekvencích a výchylkách kmitavých pohybů. Tyto dopady lze umenšovat správnou volbou materiálů, přesnou výrobou a maximálním omezením vibrací v konstrukci. [6] [7] [8] [9]

2.2.3 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení vzniká postupnou akumulací poruch povrchových a podpovrchových vrstev vyvolaných cyklickými kontaktními tlaky. Projevuje se odlupováním částic povrchu, tzv. Pittingem. Největší riziko vzniká v případech s vysokými lokálními tlaky, tedy zejména u těles se stykovými plochami zakřiveného profilu, typicky na bocích zubů ozubených kol. Vliv na rozsah tohoto druhu opotřebení má velikost kontaktního tlaku, frekvence jeho působení a technické parametry povrchových a podpovrchových vrstev daných materiálů. Odolnost proti únavovému opotřebení, jak bylo experimentálně prokázáno, se zvyšuje v závislosti na rostoucí tvrdosti povrchu, a to lineárně až do vysokých hodnot tvrdosti (až 68 HRC). Účinným opatřením je tedy volba materiálu s vyšší tvrdostí, případně chemicko-tepelné zpracování pracovního povrchu. [6] [7] [8] [9]

2.2.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení vzniká v důsledku výskytu jevu kavitace v kapalině, která je v přímém kontaktu s opotřebovávaným povrchem. Technický naučný slovník tento jev popisuje takto: *„Kavitace je jev, při kterém v kapalině vznikají a zanikají bubliny a dutiny*

vyplněné sytou párou kapaliny. Děje se tak v místech, kde tlak v kapalině klesne na tlak syté páry odpovídající teplotě kapaliny. Při zanikání se bubliny vyplňují vysokou rychlostí okolní kapalinou (implodují), dochází k rázům. Které způsobují hluk, a pokud k nim dochází na stěnách (nádoby, kanálu, čela pístu apod.), způsobují tzv. kavitační korozi (opotřebení).“[3]

Vznik kavitace je iniciován primárně provozními podmínkami, konstrukčním řešením a tlakovými poměry v daných místech. Z hlediska kapaliny pak závisí na jejím obsahu plynů, její teplotě, viskozitě a povrchovém napětí. Kavitačnímu opotřebení podléhají materiály všemožných vlastností. Předcházet důsledkům kavitačního opotřebení tedy lze především takovou konstrukcí strojních celků, aby byl eliminován vznik kavitace a následným dodržováním provozních podmínek. [6] [7] [8] [9] [10]

2.2.5 Erozivní opotřebení

Mechanismus erozivního opotřebení spočívá ve vymílání materiálu proudem částic unášených kapalinou, nebo plynem. V určitých případech je toto opotřebení způsobeno i částicemi samotné tekutiny, například v částech parních turbín pracujících v oblasti mokré páry. Rozsah opotřebení je ovlivněn množstvím vlivů, které působí současně, avšak jejich podíl závisí na konkrétní situaci. Tyto vlivy jsou relativní rychlost částic, jejich druh, velikost a tvar, úhel dopadu těchto částic a jejich kinetická energie, teplota a chemické i fyzikální vlastnosti unášivého média a v neposlední řadě také vlastnosti opotřebovávaného materiálu. Negativní účinky erozivního opotřebení lze částečně minimalizovat použitím odolnějších materiálů, případně změnou rychlosti proudění. [6] [7] [8] [9]

2.2.6 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je charakterizováno souvislou ztrátou materiálu při kontaktu dvou pevných, drsných povrchů, mezi nimiž se vyskytují tvrdé částice. Při relativním pohybu vznikají na povrchu materiálu rýhy a valy podél těchto rýh. Část materiálu se

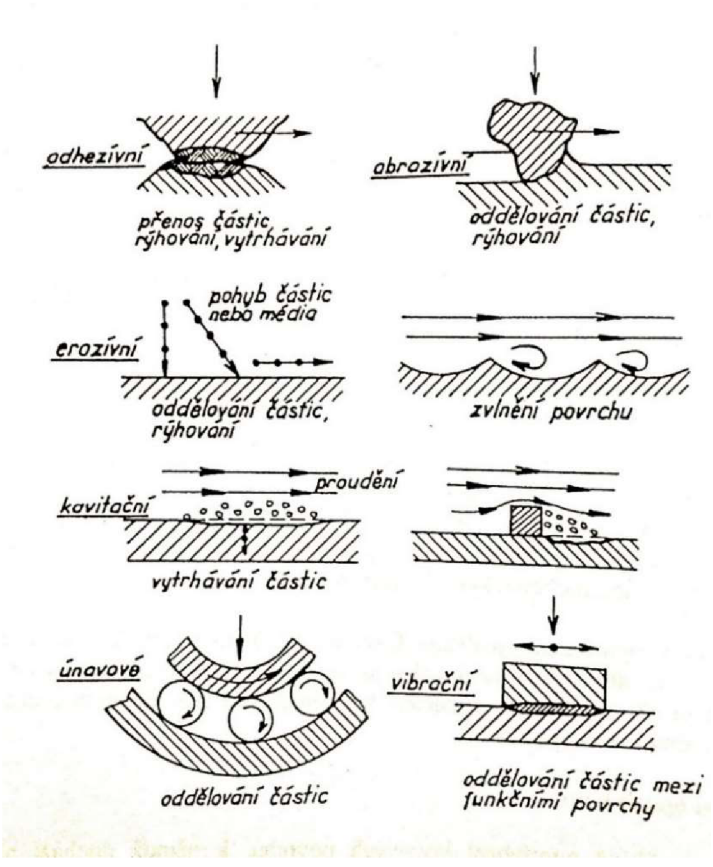
---

[3] [10] LEVINSKÝ, Otto, Irena ŠELEPOVÁ a Josef ŽÁK. Technický naučný slovník 3. díl. 2. dopl.vyd. Praha 1: SNTL, 1982. ISBN 04-001-83

obvykle odděluje ve formě mikrotřísek, které v systému následně působí jako další abrazivní částice. Vliv na míru dopadů tohoto typu opotřebení má zejména množství, velikost, tvar, tvrdost a pevnost abrazivních částic, vzájemný poměr tvrdosti materiálu součásti a abrazivních částic. Míru negativních dopadů abrazivního opotřebení lze primárně zmírnit vhodnou volbou materiálu součásti a jeho povrchového zpracování, dále je pak žádoucí zabránit vnikání abrazivních částic mezi pohyblivé povrchy. [6] [7] [8] [9]

Obrázek 2 schematicky znázorňuje principy jednotlivých druhů opotřebení popsaných v předchozích podkapitolách.

Obrázek 2 - Schémata principu základních druhů opotřebení (Zdroj [9])



2.3 Mechanismy a vlivy na abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází, pokud se tvrdá částice na povrchu dostane do kontaktu s povrchem součásti, nástroje, či stroje. Nejen ve strojním průmyslu, ale i v dalších odvětvích lidské činnosti působí abrazivní opotřebení značné škody. Ze statistik vyplývá, že nad 50 % případů opotřebení součástí strojů je způsobeno právě abrazivním opotřebením. [7] [11]

Konkrétní podoba a rozsah dopadů abrazivního opotřebení ovšem závisí na mnoha faktorech, především na mechanismu působení částice na povrch a vlastnostech částice a materiálu opotřebovávaného povrchu. [7] [11]

2.3.1 Mechanismy abrazivního opotřebení

Abrazivní opotřebení můžeme podle mechanismu vzniku primárně rozdělit dvěma způsoby podle počtu složek, které daný systém obsahuje:

- Dvoubodové abrazivní opotřebení
- Tříbodové abrazivní opotřebení

V případě opotřebovávání jednoho funkčního povrchu tvrdými částicemi dochází k interakci dvou složek – abrazivních částic a součásti. Tento jev nazýváme dvoubodové abrazivní opotřebení. [7] [11]

Pokud se částice pohybuje mezi dvěma funkčními povrchy, dochází k vzájemnému působení tří složek. Tento jev poté nazýváme tříbodové abrazivní opotřebení. Právě toto tříbodové abrazivní opotřebení se vyskytuje téměř u všech pohybových mechanismů, na jejichž funkční plochy pronikají abrazivní částice. [7] [11] [12]

Mechanismy abrazivního opotřebení můžeme dále dělit podle dopadu, který mají jednotlivé abrazivní částice na opotřebovávaný povrch materiálu. Známe čtyři typy těchto mechanismů.

a) Rýhování – v tomto případě abrazivní částice působí na povrch materiálu v tečném směru. Tímto pohybem vytváří plastickou deformaci, přičemž vytlačuje materiál

před sebou a do boků. Vzniká tak nárůstek, který se po překročení maximální míry deformační schopnosti materiálu oddělí, čímž vzniká další abrazivní částice, která v systému zůstává a přispívá k dalšímu procesu opotřebení. Tento mechanismus se v praxi vyskytuje nejčastěji.

b) Trhliny – pokud má trajektorie účinku abrazivní částice na povrch křehkého materiálu blízko k normálovému směru, vyvíjí tím částice vysoký bodový tlak, vniká tak do povrchových vrstev materiálu a dochází tím k narušování jeho integrity a vzniku mikrotrhlin.

c) Únava opakovaným působením částic – opakovaným kontaktem částice působící na povrch houževnatého materiálu pod úhlem blízkým devadesáti stupňům, vzniká plastická deformace. Částice vytlačuje materiál do stran a ten se dále odděluje. Pokud je materiál houževnatý, může vznikat deformace elastická a cyklickým opakováním tohoto namáhání vzniká v mikroměřítku jev podobný únavovému opotřebení.

d) Vylupování zrna – pohybuje-li se částice v podélném směru vůči povrchu materiálu, může napětí způsobené kontaktem částice překročit vnitřní síly krystalické vazby a zapříčinit vyloupnutí celého zrna materiálu.

Je-li rychlost relativního pohybu částic velmi vysoká, musíme brát v úvahu vliv dalších degradačních procesů, jako je tepelné ovlivnění materiálu apod. [7] [11] [12]

2.3.2 Vliv tvaru abrazivních částic

Tvar abrazivních částic má na celkový účinek nezanedbatelný vliv. Kvůli obtížnosti měření a hodnocení jednotlivých tvarových faktorů ale nelze jednoznačně určit jejich přesnou míru vlivu. Základní faktory tvaru můžeme rozlišovat jako mikrogeometrii, makrogeometrii a rádius výstupků. [7] [11] [12]

Mikrogeometrií rozumíme hladkost hran a povrchu výstupků. Jejím detailním studiem se zabývali Chruščov a Babičev. Jejich výzkum částic korundu a karborundu přinesl poznatky o tom, že hrany a výstupky abrazivních částic jsou téměř vždy zaoblených tvarů, na rozdíl od očekávání, že budou kopírovat řezy krystalografickými rovinami. [7] [13]

Makrogeometrie udává množství hran a výstupků abrazivních částic. Zobecňuje se tzv. součinitelem hranatosti, který je dán poměrem povrchu skutečného zrna ku povrchu koule o stejném objemu. Z toho tedy vyplývá, že čím více se bude tvar částice odchylovat od ideálního kulového tvaru, tím větší bude měrný povrch této částice. Dále také bude mít částice větší četnost výstupků a hran na povrchu zrna, a tím se zvýší pravděpodobnost rýhování a oddělování dalších částic z funkčního povrchu při relativním pohybu. [7] [11] [12]

Detailní zkoumání tvaru abrazivních částic přináší poměrně přesné informace o tvaru částic a jejich vlivu na opotřebení, je ale natolik zdlouhavé a obtížné, že se pro podrobné zkoumání jednotlivých případů opotřebení v praxi v podstatě nepoužívá. [7]

2.3.3 Vliv velikosti abrazivních částic

„Experimentálním studiem závislosti abrazivního otěru na průměrné velikosti abrazivních částic se ukázalo, že existuje „kritická velikost abrazivních částic“. Pokud jsou částice menší než kritická velikost, pak s růstem jejich velikosti výrazně roste abrazivní otěr. Po dosažení kritické velikosti částic intenzita abrazivního otěru výrazně klesá.“ [4]

Tato kritická velikost se odvíjí od zatížení, rozměrů opotřebovávané plochy, od druhu použitých částic a vlastností opotřebovávaného materiálu. Udává se, že průměrná kritická velikost abrazivních částic se pohybuje v rozmezí 40–125 μm. [7] [11]

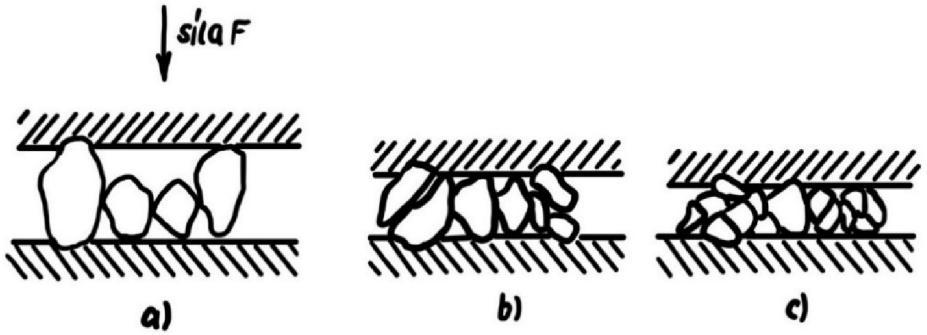
Výsledný mechanismus poškozování povrchu materiálů se odvíjí od růstu velikosti abrazivních částic. Malé abrazivní částice způsobují mikrořezání povrchových vrstev, které se projevuje tenkými kontinuálními třískami. Oproti tomu větší abrazivní částice způsobují mikroryhy na povrchu a vzniklé třísky jsou tlusté a článkovité. [7] [11] [12]

---

[4] [11] SUCHÁNEK, Jan. Abrazivní opotřebení. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06733-8. str.42

V případech výskytu abrazivního opotřebení se často objevuje jev, během kterého se abrazivní částice vlivem kontaktních tlaků a zatížení fragmentují, jak je schematicky znázorněno na obrázku 3. Typicky k tomuto jevu dochází v případě mletí sypkých materiálů. Tím se kontinuálně mění jejich velikost i tvar a v důsledku toho dochází i ke změně vlivu na průběh otěru. Je tak třeba brát v potaz, že v praxi působí částice se širokým rozmezím velikosti, rozhodující vliv však mají malé částice. [7] [11]

Obrázek 3 - Fragmentace abrazivních částic (Zdroj [11])

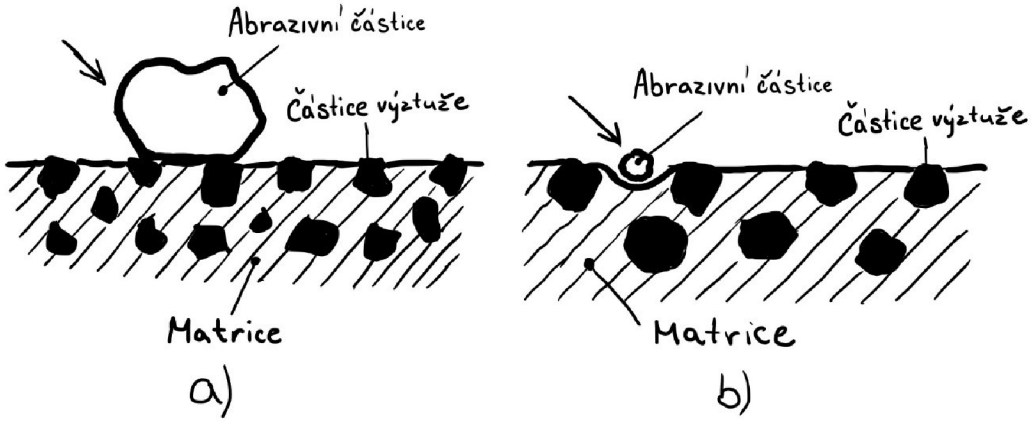


Pro aplikaci v podmínkách intenzivního abrazivního opotřebení se často využívají materiály, které svou strukturou naplňují definici kompozitu. Kompozit je obecně materiál složený ze dvou či více chemicky odlišných složek (fází). Nespojitá, pevná a tuhá složka je nazývána výztuž. Spojitá, většinou poddajnější složka, fungující jako pojivo, se nazývá matrice. Vlastnosti matrice a výztuže se velmi liší, zároveň se ale navzájem doplňují a společně mají požadovaný užitek, kterého samostatně nikdy nejsou schopny dosáhnout. Kompozity se rozlišují podle matrice, a to na kovové, polymerní, keramické, uhlíkové a sklokeramické. Podle tvaru výztuže se dále dělí na vláknové a částicové kompozity. [7] [11] [12]

Jak bylo výše zmíněno, do podmínek intenzivního abrazivního opotřebení jsou zpravidla využívány kompozity částicové s různými typy matric. Základní tezí pro správnou volbu kompozitu s vysokou odolností proti abrazivnímu opotřebení je menší velikost částic tvrdé výztuže, oproti velikosti abrazivních částic, jak znázorňuje obrázek 4a. Pokud tato

podmínka není splněna, je opotřebovávána samostatně matrice kompozitu, jako na obrázku 4b a požadovaný výsledek vysoké odolnosti není naplněn. [7] [11] [12]

Obrázek 4 - Vztah velikosti částic výplně kompozitu a abrazivních částic (Zdroj vlastní [14])



2.3.4 Vliv poměru tvrdostí materiálu a abrazivních částic

Je obecně známo, že pro míru abrazivního opotřebení materiálu platí jednak přímá úměra k přítlačné síle a délce dráhy, na které působí abrazivo na povrch opotřebovávaného materiálu. Dále pak platí nepřímá úměra tvrdosti částic a materiálu, jež je opotřebováván. Pokud je tvrdost abrazivních částic H_a výrazně větší než tvrdost opotřebovávaného materiálu H_m, je poměrná odolnost vůči abrazivnímu opotřebení ψ malá. Tato odolnost se zvyšuje společně se zvyšováním tvrdosti opotřebovávaného materiálu. Maxima dosáhne ve chvíli, kdy platí vztah

$$H_m = \frac{H_a}{k}$$

Vztah 1 - Poměr tvrdosti abrazivních částic a opotřebovávaného materiálu

koeficient k se podle experimentů Chruščova a Tottenbauma nachází mezi 1,3 - 2,0. [7] [13]

Závislost poměrné odolnosti ψ na poměru H_a/H_m demonstrujme na výsledcích zkoušek tepelně zpracované nástrojové oceli s abrazivy o různých tvrdostech v tabulce 1. [7] [15]

Tabulka 1 - Závislost poměrné odolnosti na tvrdosti abraziva (Zdroj [15])

Materiál	Tvrdost HV	Druh abraziva / tvrdost HV			
		Sklo / 585	Křemen / 908	Granát / 1426	Korund / 2290
Tepelně zpracovaná nástrojová ocel	186	25,7	-	25,9	25,7
	468	36,1	34,1	34,2	34,0
	795	586,9	61,1	44,7	44,3

Z tabulky je vidět, že zatímco ocel o tvrdosti 186 HV má poměrnou odolnost vůči abrazivnímu opotřebení u všech materiálů abraziva v podstatě konstantní, u oceli s vyšší tvrdostí 795 HV tato odolnost se snižováním tvrdosti abraziva výrazně stoupá. [7]

2.4 Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení

Pro zjišťování odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení existuje mnoho zkušebních zařízení v simulovaných laboratorních podmínkách, která ale nejsou schopna modelovat přesné podmínky provozu v praktickém užití, ve kterých jsou materiály opotřebovávány abrazivním otěrem. Z tohoto důvodu se provádí také provozní zkoušky, které pomáhají sledovat průběh opotřebení a předpovídat životnost součástí v reálném provozu. [7]

2.4.1 Laboratorní zkoušení abrazivního opotřebení

Laboratorní zkoušení odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení lze provádět mnoha metodami. Tyto metody mohou přinášet množství výhod, jakými jsou například relativně nízká cena, nenáročné provedení zkoušení, možnost zkoušení palety různých materiálů rozdílnými abrazivy v relativně krátkém čase a jednoduché přizpůsobování parametrů opotřebení. [7]

Je účelné tvořit podmínky zkoušení co nejpřesnější reálnému nasazení materiálu v provozu. Absence rázového zatěžování, rozdílná abraziva a neschopnost věrně napodobit komplexní mechanismus opotřebení ve skutečném provozu to ovšem značně ztěžují. [7] [12] [15]

Metody laboratorních zkoušek obecně dělíme podle podmínek kontaktu materiálu s abrazivními částicemi na:

- Přístroje s volnými částicemi
- Přístroje s vázanými částicemi [15]

2.4.1.1 Přístroje s volnými částicemi

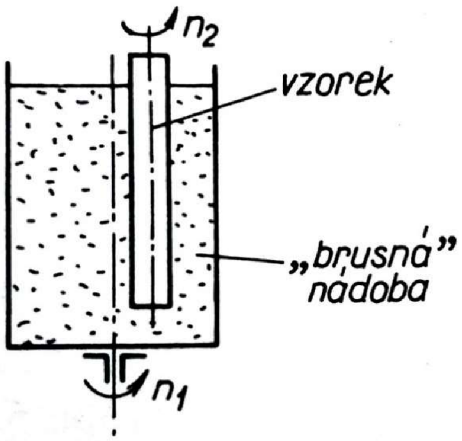
Přístroje s volnými částicemi jsou takové, ve kterých se částice volně pohybují a zatížení je na ně přenášeno masou abraziva. Výhodou zkušebních přístrojů s volnými částicemi je možnost použití pestré škály abraziv vyskytujících se v reálných podmínkách abraze a možnost zkoušení za sucha, či ve směsi s vodou. Nevýhodami pak jsou malá intenzita opotřebení, což vyžaduje delší dobu zkoušení a progresivní otupování řezných hran částic a jejich znečištění fragmenty opotřebovávaného materiálu. Abrazivo je tedy potřeba v průběhu zkoušky měnit. [7] [12]

Přístroje s volnými částicemi rozlišujeme na přístroje s brusnou nádobou, bubnové přístroje a přístroje s pryžovým, či kovovým kotoučem. Varianty pro zkoušení za sucha a za mokra se konstrukčně liší, principiálně jsou si však velmi podobné. [7] [16]

Odolnost vůči abrazivnímu opotřebení je vyhodnocována podle poměrné odolnosti etalonového materiálu zkoušeného za stejných procesních podmínek. Ta se určuje z poměru objemového opotřebení etalonového vzorku a vzorku zkoušeného materiálu. [7] [16]

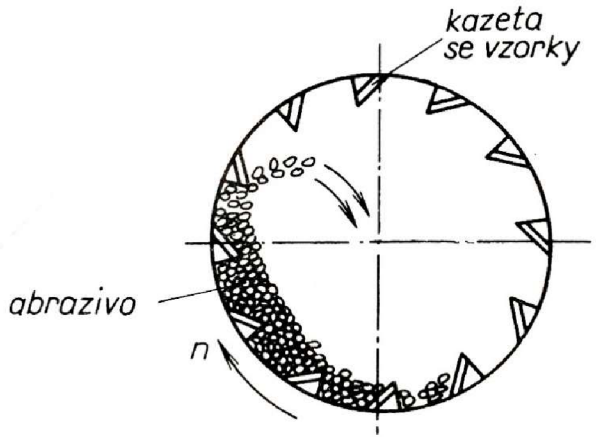
Přístroje s brusnou nádobou jsou složeny z nádoby naplněné abrazivem, v níž jsou umístěny rotující zkušební vzorky. Nádoba s abrazivem rovněž koná rotační pohyb, jak je patrné z obrázku 5. Vzájemným pohybem vzorků zkoušeného materiálu a abraziva probíhá opotřebení povrchu vzorků. [7] [12]

Obrázek 5 - Schéma přístroje s brusnou nádobou (Zdroj [12])



Bubnové přístroje se používají pro zjišťování odolnosti materiálů používaných při mletí sypkých nerostných surovin. Jsou velmi jednoduché a jejich výhodou je možnost zkoušení vícero vzorků různých materiálů najednou uložených v kazetě, jak znázorňuje obrázek 6. Jejich nevýhoda tkví ve vysoké časové náročnosti. [7]

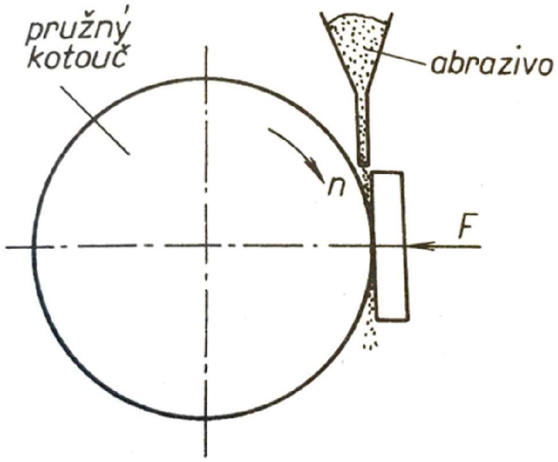
Obrázek 6 - Schéma bubnového zkoušecího přístroje (Zdroj [12])



Přístroje s pryžovým nebo kovovým kotoučem simulují suchý či mokrý abrazivní proces tak, že je abrazivo přiváděno mezi rotující kotouč a zkušební těleso zkoušeného

materiálu, které jsou na sebe natlačovány zatěžující silou, čímž dochází k tříbodové abrazi na povrchu zkušebního tělesa, jak je zobrazeno na obrázku 7. [7] [16]

Obrázek 7 - Schéma zkušebního přístroje s kotoučem (Zdroj [12])



Zkušební metodou ASTM G65, pracující na tomto principu, byla inspirována použitá metoda v experimentální části této práce, proto se jejímu průběhu blíže věnuje samostatná kapitola 2.6.

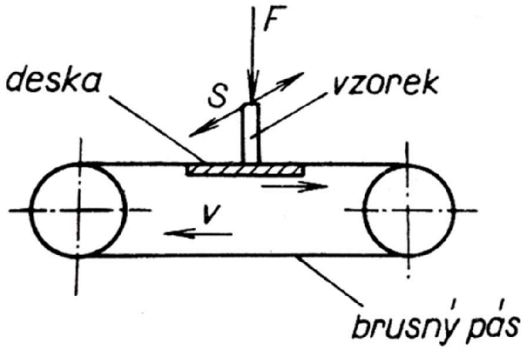
2.4.1.2 Přístroje s pevnými částicemi

Přístroje s vázanými částicemi se používají ke zkoušení materiálů opotřebovávaných abrazí s mechanismem dvoubodového styku. Tyto přístroje používají částice ve formě brusného kotouče, nebo plátna. Zásadní nevýhodou těchto přístrojů je zanášení brusných pláten i kotoučů, které zapříčiňuje snižování jejich abrazivity. Abrazivitu je proto nutno kontrolovat etalonovými vzorky. Mimo to se používají přístroje s hrotem definovaného tvaru, které slouží k zjišťování vlastností povlaků. [7]

Přístroje s pevnými částicemi pracují rotačním pohybem, vratným přímočarým, nebo brusným pásem, který simuluje přímočarý pohyb. Jejich výhodami jsou spolehlivost, jednoduchost a malý rozptyl výsledků (± 5 %). [7] [12] [4]

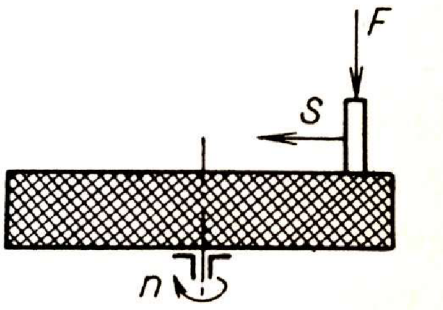
Nejčastěji využívané přístroje s pevnými částicemi jsou přístroje s brusným pásem, jak znázorňuje obrázek 8. [7] [12]

Obrázek 8 - Schéma přístroje s brusným plátnem (Zdroj [12])



Přístroje s jedním nebo vícero brusnými kotouči, schematicky zobrazené na obrázku 9, přinášejí výhodu zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení i za vysokých teplot. Pokud se však brusná plocha kotouče příliš zanese, hrozí přechod opotřebení z abrazivního na adhezivně-abrazivní. [7] [12]

Obrázek 9 - Schéma přístroje s brusným kotoučem (Zdroj [12])



Přístroje s hrotem definovaného tvaru slouží ke zkoumání tribologických vlastností tenkých povlaků. Nejčastěji užívaná z těchto metod je tzv. Scratch Tester, v rámci které je diamantový kužel či jehlan přitlačován k povrchu vzorku, který se pomalu přímočaře pohybuje. Je sledována hodnota zatížení, při jejímž překročení se v povlaku objevují první trhliny, případně celkové porušení povlaku. [4] [7] [12]

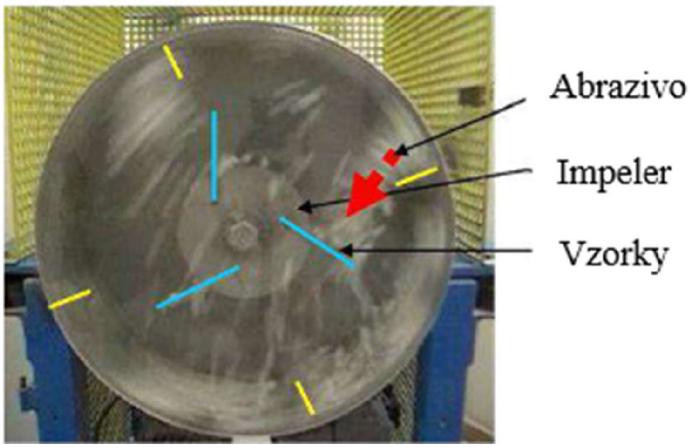
2.4.2 Provozní zkoušky abrazivního opotřebení

Provozní zkoušky na abrazivní opotřebení jsou využívány pro předvídání životnosti součástí v reálném provozu. Kvalitně provedená provozní zkouška může vést k výrazné úspoře finančních nákladů a času.

Zatímco laboratorní zkoušky umožňují zkoumat pouze vlivy jednotlivých faktorů na průběh opotřebení, provozní zkoušky, probíhající na konkrétním výrobním zařízení, dovolují sledovat opotřebení v komplexním měřítku provozních podmínek, a to buď přímo na dané strojní součásti nebo konstrukčním uzlu. Proto jejich výsledky nelze aplikovat obecně, mají význam jen pro konkrétní výrobní zařízení, případně pro zařízení pracující v obdobných podmínkách. Výsledky provozních zkoušek mohou být zkresleny různými vedlejšími faktory, jako jsou další degradační procesy, rázovité zatěžování, okolní prostředí a jiné. Aby byla tato zkreslení co nejvíce eliminována, je důležité, aby provozní zkouška probíhala za stejných podmínek abrazivního opotřebení jako v provozu. Dále musí být zkušební vzorek shodný s částí stroje, na němž zkouška probíhá. Vliv umístění vzorků ve stroji na provozní podmínky může být pouze nepatrný a celková doba zkoušení vzorku musí být oproti celkové životnosti dané součásti relativně krátká. [7] [11]

Možnou alternativou je použití speciálního zkoušecího zařízení, jako v případě firmy Castolin testující materiály v kombinaci abrazivního opotřebení a rázovitého zatěžování. Na obrázku 10 je toto testovací zařízení. [12] [19]

Obrázek 10 - Testovací zařízení abraze a rázů (Zdroj [19])



2.5 Technologie navařování

Jak bylo popsáno v kapitole o opotřebení, nejčastějším řešením dopadů nejen abrazivního opotřebení je zvolení materiálu funkčních ploch správných mechanických vlastností. Protože tyto vlastnosti často nesplňují požadavky celé konstrukce strojních prvků, nabízí se řešení úpravy povrchové vrstvy, například chemicko-tepelné zpracování, nebo využití některé z technologií vytvoření povrchové vrstvy takového materiálu, jež opotřebení odolává lépe než základní materiál. Mimo plátování (např. keramickými deskami) nebo povlakování je v průmyslu velmi hojně využívána technologie navařování. Dojde tak k vytvoření povrchové vrstvy metalurgicky spojené se základním materiálem, která vykazuje lepší tribologické charakteristiky.

Navařování tvrdonávary bylo poprvé představeno J. W. Spencerem v jeho patentu již v roce 1896, ale jako většina nových technologií musela i tato projít řadou let vývoje, než začala být průmyslově využívána. Jejímu rychlému vývoji pak přispělo její masivní využití v americkém naftařském průmyslu. Při navaření vrtných hrotů tvrdonávarem na bázi kobaltu klesla spotřeba pro jeden vrt na 44 hrotů, oproti předchozím 84 kovaných kalených hrotů. Nástup návarů s karbidy následně snížil spotřebu na 14 vrtných hrotů. [20]

Technologie navařování spočívá v plošném, případně místním navaření vrstvy návarové slitiny na základní materiál, která vytvoří funkční plochy požadovaných vlastností. Pro aplikaci v podmínkách abrazivního opotřebení je žádoucí zejména zvýšená tvrdost povrchové vrstvy. [11] [20]

Navařovat součásti vystavené intenzivnímu abrazivnímu opotřebení je možné v podstatě všemi dostupnými metodami svařování, a to manuálně i pomocí automatizačních zařízení. Nejčastěji se navařuje plamenem nebo elektrickým obloukem, ale v poslední době se velmi rozmáhá navařování pomocí laserového paprsku nebo plazmy, které přináší různé výhody (např. zmenšení tepelně ovlivněné oblasti). Zásadní vliv na výsledné vlastnosti má ale v konečném důsledku návarová slitina. Při její volbě je nadmíru důležité znát chemické složení základního materiálu a podmínky procesu opotřebení, kterým bude součást vystavena. Při sestavování technologického postupu se pak musí brát v potaz tvar a rozměry

součásti, vlastnosti základního materiálu, jako je svařitelnost pro určení správného předehřevu apod. První navařovaná vrstva většinou nemá požadované vlastnosti, protože dochází k promíšení návarové slitiny se základním materiálem. Zpravidla je tedy třeba navařovat ve více vrstvách. K úspěšnému aplikování návaru a dosažení očekávaných vlastností a trvanlivosti je třeba dbát mnoha zákonitostí. [7] [21]

Navařování pomocí elektrického oblouku metodami MIG/MAG přináší možnost použití trubičkových navařovacích drátů, které s sebou pro problematiku tvrdonávarů nesou patrné benefity. Trubičkové (plněné) dráty jsou tvořené kovovým obalem a práškovým jádrem, jak lze pozorovat na obrázku 11. Při použití výrobků firmy Castolin z produktové řady EnDOtec® umožňuje tato technologie dosáhnout návaru s mikrostrukturou rovnoměrně nasycenou jemnými karbidy různých prvků v matrici různého chemického složení. Tyto karbidy jsou namleté obsaženy v jádře drátu, zatímco kovový obal je tvořen slitinou matrice. Mimo to jsou v jejich práškovém jádře zastoupena aditiva zlepšující proces navařování i vlastnosti vzniklého svaru. Výraznou výhodou, oproti drátům plného průřezu, je například lepší proudová hustota při hoření elektrického oblouku díky ionizujícím stabilizačním složkám. Toto umožňuje chladnější, periferní charakter oblouku a tím je zajištěno navařování menším proudem. Výsledkem je menší tepelně ovlivněná oblast navařované součásti s kvalitním svarem potřebných vlastností. [22]

Obrázek 11 - Koncept trubičkového navařovacího drátu (Zdroj [22])

2.6 Metoda zkoušení odolnosti proti opotřebení ASTM G65

Zvolená zkušební metoda pro experimentální část práce vychází z normované zkušební metody ASTM G65 – Měření abrazivního opotřebení pomocí aparatury suchý písek/pryžový disk popsané v normě ČSN EN ISO 28080. V normě jsou popsána používaná zkušební zařízení, abraziva, kroky přípravy vzorků a vyhodnocení výsledků. Protože zásadní vliv na výsledek zkoušky má použité abrazivo, je mu věnována následující podkapitola. [18]

2.6.1 Zkušební abrazivo pro ASTM G65

Jak bylo v předchozích kapitolách popsáno, na průběh procesu opotřebení a jeho intenzitu mají zásadní vliv abrazivní částice. Pro správný průběh a vypovídající výsledky je proto velmi důležité dbát na správnou volbu abrazivního materiálu.

Rozhodujícím kritériem pro porovnatelnost výsledků s různými materiály zkušebních těles je shodnost podmínek abraze v každém zkušebním cyklu. Proto je především třeba zajistit, aby abrazivní částice byly z materiálu pocházejícího ze stejného zdroje, tj. aby byly stejného chemického složení. [16][18]

Další zásadní podmínkou pro stanovení objektivních výsledků je udržení stálého charakteru tvaru a velikosti částic abrazivního materiálu. Tvar abrazivních částic, respektive ostrost jejich hran je obtížné hodnotit a porovnávat. Norma proto doporučuje provádět zkoušku vždy s novým, neotupeným abrazivem. Případně lze používat pro každou sadu zkušebních těles abrazivní materiál se shodným počtem cyklů zkoušení, pro které byl již použit. [16][18]

Protože se však abrazivní částice tříští a tím se zmenšují, je pro zachování stálé velikosti frakce nutné tyto nevyhovující – příliš malé částice odstranit. K tomu lze použít vibrační sítovací zařízení s dvojicí sít. První síto disponuje velikostí oka o frakci větší, než je požadovaná velikost, které zachytí případné příliš velké částice a kontaminanty. Druhé, jemnější síto pak disponuje velikostí oka o požadované velikosti frakce, které zachytí použitelné částice vhodné pro zkoušení. Částice menší, tudíž nevhodné ke zkoušení, stejně jako prach a další malé kontaminanty propadnou do sběrného zásobníku. Tímto procesem

se vyseparuje požadovaná velikostní frakce částic jak nového materiálu, tak i toho znovu používaného. Je však potřeba sledovat počet zkušebních cyklů, pro které bylo abrazivo použito. Velikost abrazivních částic je normou předepsaná omezením sítové analýzy v procentech abraziva zachyceného analytickými síty. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2. [18][23]

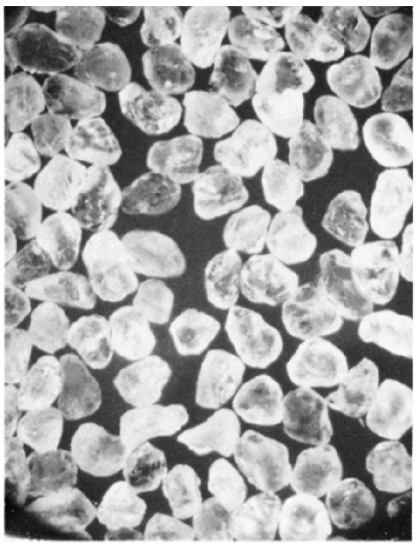
Tabulka 2 - Sítová analýza doporučeného abraziva pro G65 [23]

Velikost oka síta	% zachycené sítem
425 µm	**žádné**
300 µm	**5 max**
212 µm	**95 min**
150 µm	**žádné**

Abrazivní průtok abraziva je dalším klíčovým parametrem, který má vliv na výsledky měření na přístrojích s pryžovým kotoučem. Ideálním postupem pro kontrolu stálosti průtoku abraziva je vážení hmotnosti abraziva procházejícího kontaktní plochou a následné přepočítání na hodnotu průtoku. Systémem pro spolehlivé sledování abraziva procházejícího abrazivním kontaktem však nedisponují všechny zkušební přístroje. Pro jeho kontrolu jsou tak vybaveny ryskami na ovládacím mechanismu průtoku abraziva, jejichž totožnému nastavení při všech zkušebních cyklech je třeba důsledně dbát. [18][23]

Zkoušecí metoda ASTM G65 byla vyvíjena s použitím abraziva křemičitého písku pocházejícího z dolu společnosti U.S. Silica Company, který leží v oblasti Ottawy. Toto naleziště je největším zdrojem křemičitého písku v severní Americe a poskytuje téměř čistý křemičitý písek jemného zrna zachycený na obrázku 12. Proto norma doporučuje použití písku z tohoto naleziště, protože použití jiného zdroje abraziva, a tudíž rozdílného chemického složení, může afektovat výsledky měření. [13] [24]

Obrázek 12 - Křemenný písek „Ottawa sand“ pro G65 (Zdroj [23])



3 Experimentální část

V této části práce jsou popsány materiály použitých vzorků, příprava zkušebních těles, průběh zkoušení, vyhodnocení a diskuse výsledků.

3.1 Vybrané návarové materiály

Pro experimentální část této diplomové práce bylo společností Castolin s. r. o. poskytnuto šest návarových materiálů z její produkce. Následuje jejich výčet:

- CastoMag 45351
- SafeHARD 600
- EnDOtec® DO*31
- EG 8336
- TeroMatec 4601
- EnDOtec® DO*390N

3.1.1 Návar CastoMag 45351

CastoMag 45351 je jeden z nejběžnějších návarových materiálů používaných v podmínek abraze. Navařovací drát plného průřezu (je i ve variantě trubičkového drátu) je určený pro navařování ochranných návarů odolných abrazivnímu opotřebení, vysokému tepelnému namáhání a namáhání rázy. Jeho chemické složení je 0,4 % C, 9 % Cr, 3 % Si a 0,5 % Mn. Je kalitelný – základní tvrdost 60 HRC tak lze zvýšit na 61 HRC a po popuštění 57 HRC pro lepší odolnost vůči rázům. Vykazuje martenzitickou strukturu s karbidy chromu. Pro silnostěnné součásti se podle základního materiálu doporučuje předehřev na 450 °C a minimálně jedna vyrovnávací vrstva pro dosažení požadovaného složení a podmínek. [19][25]

Jelikož se jedná o typický materiál k využití v podmínkách abrazivního opotřebení, bude pro vyhodnocení experimentu sloužit jako materiál referenční.

3.1.2 SafeHARD 600

Svařovací materiály s obsahem chromu při tavení emitují karcinogenní šestimocný chrom, který ohrožuje zdraví milionů svářečů po celém světě. Z tohoto důvodu se zvyšují jeho limity European Exposure Occupational Limits (EOL). Navařovací materiál CastoMag 45351, nebo jeho ekvivalenty, jsou však stále jedněmi z nejběžněji používaných drátů. Podle Evropské svařovací asociace se jich v EU ročně použije 1000 tun ve formě trubičky a dalších 1800 v plném drátu. Proto společnost Castolin v roce 2020 představila nový produkt SafeHARD 600, který vykazuje nulové riziko výskytu šestimocného chromu. Svými vlastnostmi dokáže chromové návary plně zastoupit a přitom zachovat původní cenovou hladinu. [19][25]

Metalurgicky by se nabízelo řešení nahrazení karbidů chromu za karbidy boru, které by přineslo jisté zlevnění díky dostupnosti boru, návar by však nedosahoval srovnatelné houževnatosti a neobstál by při působení rázovitého zatížení. Proto SafeHARD 600 využívá k dosažení tvrdosti karbidy vanadu a molybdenu. Dosahuje tvrdosti až 57 HRC. [19][25]

3.1.3 EnDOtec® DO*31

DO*31 je vysoce legovaná návarová slitina s vysokým obsahem 3,5 % C a 30 % Cr, která vykazuje velmi dobrou odolnost vůči abrazivnímu opotřebení. Z důvodu vysokého nasycení velkými karbidy chromu je však návar velmi křehký, a proto špatně odolává rázovému zatěžování. Obsah 0,2 % Ni pak vytváří jemnozrnnou strukturu matrice. Jeho vlastností je výskyt trhlin na povrchu návaru, které způsobuje kombinace vysoké křehkosti a vnitřního pnutí po navařování. Po navaření dosahuje tvrdosti přes 55 HRC a doporučuje se navařování ve dvou vrstvách. [19][25]

3.1.4 EG 8336

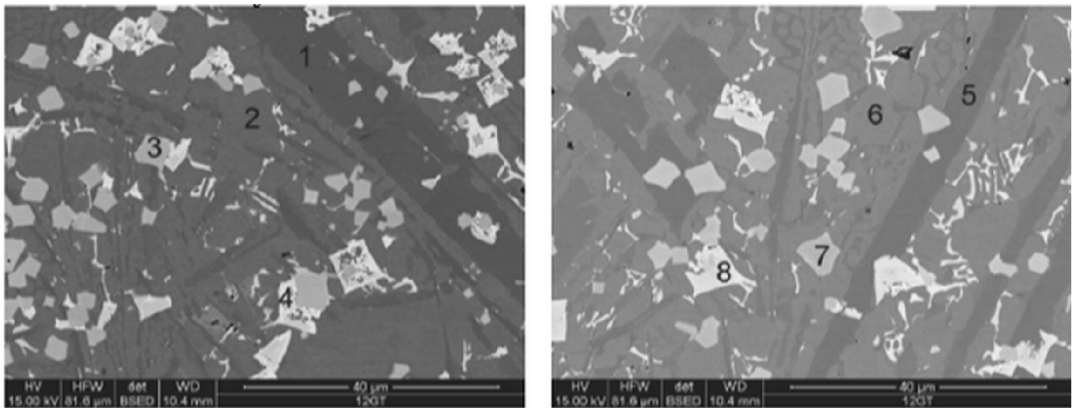
Dle firmy Castolin využívá nový návarový materiál EG 8336 disperzní vytvrzování. Jedná se o proces difúze v pevné fázi, při kterém malé, submikronové, disperzní částice nové fáze rozptýleně vykrystalizují na hranicích zrn krystalické matrice, aby vytvrdily slitinu tím,

že brání dislokačním pohybům. Disperzní vytvrzování slitin má mezomorfní vlastnosti, což je meziprodukt mezi hybridním a krystalickým stavem. [19][26]

Tento speciální princip tvorby mikrostruktury dává návaru EG 8336 výjimečné vlastnosti, jakými jsou extrémní odolnost abrazivnímu a erozivnímu opotřebení i rázům, vysoká odolnost teplotní oxidaci až do 850 °C, vysoký navařovací výkon a tvrdost 70 HRC, respektive 71 HRC při navaření dvou vrstev. To vše je umožněno v širokém spektru využití. Návar je tvořen komplexními karbidy chromu, wolframu a boru v matrici na bázi železné slitiny. Příklad struktury s obsahem komplexních karbidů je na obrázku 13. [19] [27]

Obrázek 13 - Mikrostruktura materiálu s komplexními karbidy (zvětšeno 1000x)

(Zdroj [27])



Legenda: *1 a 5 – jehlové karbidy chromu, 2 a 6 – matrice ze slitiny železa, 3 a 7 – jemné karbidy niobu, 4 a 8 – komplexní karbidy wolframu, molybdenu, boru a železa*

3.1.5 TeroMatec 4601

TeroMatec 4601 je vysoce legovanou slitinou s vysokým obsahem uhlíku (4,5 % C) a chromu (26 % Cr) a přidanými legurami Si, Mn a B. Mikrostruktura tohoto návaru je tvořena primárními karbidy železa a uhlíku a eutektickými karbidy chromu v austenitické matrici. Svým složením a strukturou se tak podobá legované bílé litině. Dosahuje tvrdosti min. 60 HRC a stejně jako DO*31 je díky velkým krystalům CrC křehký a neodolává tak

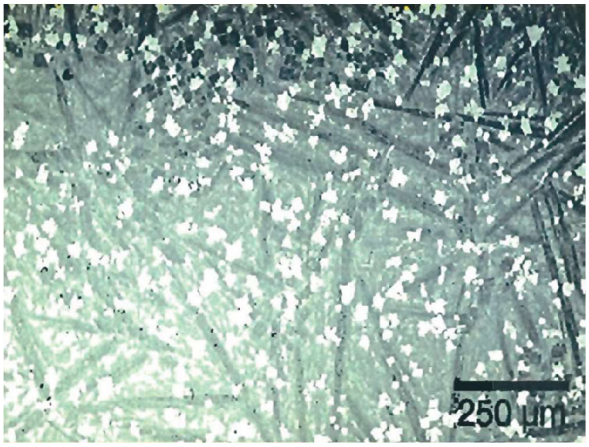
působení rázů. Doporučuje se navařovat ve dvou vrstvách kvůli promísení se základním materiálem a umožňuje i navařování bez ochranné atmosféry. [19][25]

3.1.6 Nanonávar EnDOtec DO*390N

Vývoj nano materiálů v posledních letech zasáhl i oblast materiálů odolávajícím abrazivnímu opotřebení. Dr. Dan Branagan se svým týmem ve společnosti NanoSteel Company vytvořil řadu pokročilých slitin na bázi železa a zapsal si tak 15 nových patentů. Podařilo se tak dosáhnou velmi jemné mikrostruktury s velikostí zrna pod jeden mikron. Bylo tak dosaženo částic nano měřítka, které v oblasti metalurgie umožňuje dosahovat výjimečných vlastností. [19][25][28]

Materiál DO*390N využívá těchto vlastností a dosahuje tak výjimečných hodnot odolnosti vůči abrazi i erozi. Jeho mikrostruktura, zachycena na mikroskopickém snímku na obrázku 14, vykazuje velký objem ultra tvrdých komplexních karbidů, které jsou rovnoměrně distribuované v mezomorfní matrici na bázi slitiny železa. Tato skutečnost přináší vlastnosti jako tvrdost přesahující 70 HRC, kterou si materiál udržuje až do 750 °C. Dále má povrch svaru nízký koeficient smykového tření s jinými kovy, je hladký a nezvlněný s jemnými povrchovými trhlinami uvolňujícími zbytkové napětí. Zároveň díky pevným metalurgickým vazbám se základním materiálem odolává rázovitému zatížení. [19][25][28]

*Obrázek 14 - Mikrostruktura návaru DO*390N s nanočásticemi komplexních karbidů mezi jehličkovými karbidy chromu (Zdroj [28])*



3.2 Příprava zkušebních těles

Průběh experimentu, příprava zkušebních těles i proces zkoušení probíhal podle modifikované normy ČSN EN ISO 28080. Změny v normou určeném postupu byly stanoveny podle požadavků poskytovatele zkoumaných materiálů a možností laboratoře. [18]

3.2.1 Navařování

Navařování polotovarů pro výrobu zkušebních těles probíhalo pod dozorem svářecího technologa ve firmě Castolin a parametry technologického postupu byly stanoveny podle doporučení výrobce materiálů uvedených v materiálových listech a štítku na svařovacím systému. [19]

K navařování všech materiálů byl použit svařovací systém Castolin TotalArc^2 3000, plně digitálně ovládaný svařovací inventor pro svařování metodou MIG/MAG s možností svařování v režimu pulzu zobrazený na obrázku 15.

Obrázek 15 - Svařovací systém Castolin TotalArc^2 3000 (Vlastní zdroj [14])

Polotovar použitý k aplikaci zkoušených materiálů byl plech z oceli S235JR o tloušťce 20 mm. Povrch polotovaru byl očištěn od oxidačních vrstev pomocí lamelového kotouče v ruční rozbrušovací brusce a byly na něj rozrýsovány oblasti k navaření šesti návarů. Parametry použité pro jednotlivé materiály jsou zaznačené v tabulce 3.

Tabulka 3 - Parametry navařování vzorků materiálů

Číslo	Návarový drát	Průměr drátu	Počet vrstev	Ochranná atmosféra	Svařovací Proud	Svařovací napětí
1	CastoMag 45351	1,2 mm	3	Ar + 2% CO_2	150 A v pulsu	22,9 V
2	SafeHARD 600	1,6 mm	3	ArC18	158 A	20,1 V
3	EnDOtec® DO*31	1,6 mm	2	Ar + 2% CO2	108 A	19,4 V
4	EG 8336	1,6 mm	1	Ar + 2% CO2	171 A	19,2 V
5	TeroMatec 4601	1,6 mm	2	Bez plynu	155 A	20,8 V
6	EnDOtec® DO*390N	1,6 mm	1	Ar + 2% CO2	170 A	19,5 V

Jednotlivé svarové housenky byly pokládány podle narýsovaných rysek, navařování probíhalo bez předehřevu a mezi jednotlivými vrstvami i materiály se vyčkalo na úplné vychladnutí polotovaru. Polotovar a výsledný svar jsou zobrazeny na obrázku 16.

Obrázek 16 - Proces navařování vzorků (Vlastní zdroj [14])

3.2.2 Obrábění

Po navaření materiálů ke zkoušení byly pomocí stroje pro řezání vodním paprskem AW-CT 0806 TKX vyřezány jednotlivé polotovary, jak je vidět na obrázku 17. Rozměry těchto polotovarů byly zvoleny podle upínacího ústrojí zkušebního zařízení, a to 30 x 30 mm s přídavkem pro obrábění. Nastavení řezacích parametrů probíhalo podle zkušebního řezu.

Obrázek 17 - Řezání zk. těles vysokotlakým vodním paprskem (Vlastní zdroj [14])

Vyřezaná zkušební tělesa bylo nutno označit pro jednoznačnou identifikaci během celého následujícího procesu přípravy a zkoušení. Systém značení byl stanoven na římské číslice I. - VI. pro označení materiálu návaru, a písmena A, B, C pro označení trojice zkušebních těles stejného materiálu, jak je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4 - Systém označení zkušebních těles

Materiál	Označení zk. těles		
CastoMag 45351	I.A	I.B	I.C
SafeHARD 600	II.A	II.B	II.C
EnDOtec® DO*31	III.A	III.B	III.C
EG 8336	IV.A	IV.B	IV.C
TeroMatec 4601	V.A	V.B	V.C
EnDOtec DO*390N	VI.A	VI.B	VI.C

Vodním paprskem vyřezané vzorky bylo dále potřeba obrobit na požadované rozměry. Technologický postup obrábění byl stanoven takto:

- Broušení návarové vrstvy – pro dosažení celistvosti kontaktní plochy – viz obrázek 18
- Broušení boků vzorku – pro přesné upnutí
- Frézování základního materiálu – pro dosažení potřebné tloušťky
- Sražení hran

Obrázek 18 - Zkušební těleso v procesu přípravy – broušení (Vlastní zdroj [14])

Pro broušení vzorků byla použita rovinná magnetická bruska BHP 20/600, k frézování konzolová frézka TOS FA 3V, pracující frézovací hlavou s vyměnitelnými SK plátky. Následné srážení hran bylo provedeno na stolní kotoučové brusce.

Povrch návaru, na kterém následně vznikla kontaktní plocha abrazivního opotřebení, byl obroušen na drsnost Ra, změřenou digitálním drsnoměrem MahrSurf PS 10. Měření bylo provedeno pro každý materiál třikrát, z naměřených hodnot byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka. Naměřené hodnoty drsností jsou uvedeny v tabulce v příloze 1 a vypočtené hodnoty drsnosti a směrodatných odchylek jsou zaznamenány v tabulce 5.

Tabulka 5 - Drsnosti povrchů zkušebních těles podle materiálu návaru

Materiál	Ra [µm]	σ [µm]
CastoMag 45351	1,424	0,0050
SafeHARD 600	1,177	0,0068
EnDOtec® DO*31	1,025	0,0012
EG 8336	0,829	0,0062
TeroMatec 4601	0,864	0,0087
EnDOtec DO*390N	0,744	0,0037

3.2.3 Očištění vzorků

Před zahájením zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byla všechna zkušební tělesa důkladně odmaštěna acetonovým čističem, následně pak očištěna a osušena proudem stlačeného vzduchu.

3.2.4 Příprava abraziva

Pro zkoušení odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení byl použit plavený křemičitý písek, jako vyžaduje postup podle normy ASTM G65. Písek byl suchý, sypký a pro zajištění správné nominální velikosti abrazivních částic byl roztřízen síty prosévacího přístroje pro suché prosévání VPK – 40, zachyceného na obrázku 19, jehož technická data jsou uvedena v tabulce 6.

Obrázek 19 - Analytický prosévací přístroj VPK – 40 (Vlastní zdroj [14])

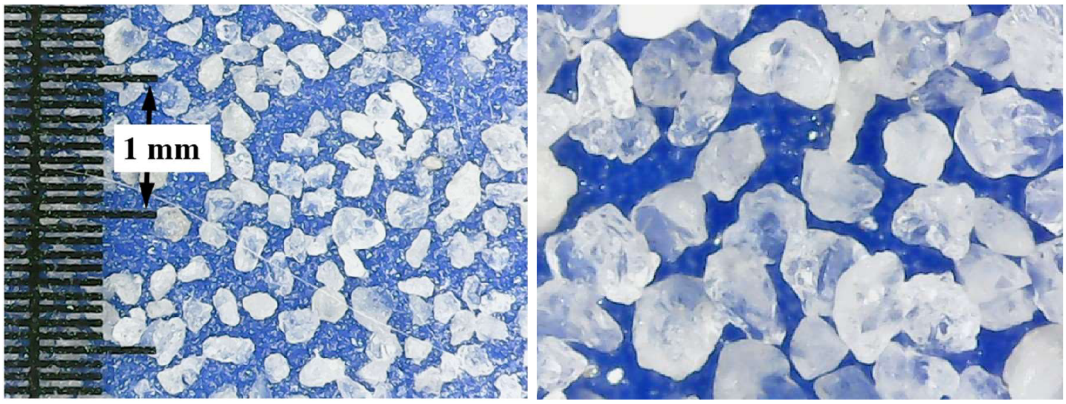
Tabulka 6 - Technické parametry prosévacího přístroje VPK – 40 (Zdroj [29])

Technická data: VPK-40	
Rozměr prosévací jednotky A x B x H	**470 x 470 x 950 mm**
Pracovní deska	**470 x 470 mm**
Příkon	**120 W**
Napětí	**3 x 400 V / 50 Hz**
Hmotnost	**65 kg**

Použitá síta měla velikost oka 0,315 mm pro odstranění větších částic a případných nečistot, dále pak 0,200 mm pro zachycení požadované frakce. Písek používaný pro zkoušení je zaznamenán na obrázku 20 pomocí ručního digitálního mikroskopu.

Obrázek 20 - Abrazivo použité v experimentu (vlevo 50x, vpravo 500x zvětšeno)

(Vlastní zdroj [14])



Před zahájením zkoušení bylo připraveno nutné počáteční množství abraziva a následně během úkonů zkoušení bylo kontinuálně připravováno další, aby se zamezilo znečištění abraziva během skladování.

3.3 Průběh zkoušení

Před započetím zkoušení odolnosti proti opotřebení bylo nutné naměřit na povrchu zkušebních těles jejich tvrdost.

3.3.1 Měření tvrdosti

Pro zjištění hodnoty tvrdosti zkoušených materiálů byla zvolena metoda měření tvrdosti dle Vickerse, jejíž postup předepisuje norma ČSN EN ISO 6507-1. Na každém ze zkušebních těles bylo provedeno šest měření, aby se zvýšila statistická přesnost měření. Pro měření byl použit optický tvrdoměr, zachycený na obrázku 21, odpovídající svými parametry normou předepsanému postupu.

Obrázek 21 - Optický tvrdoměr (Vlastní zdroj [14])

Naměřené hodnoty délky úhlopříček vtisku pomocí optického odměřování přístroje, jak je vidět na obrázku 22, a zpracování těchto dat do hodnot tvrdosti je uvedeno v kapitole 4 *Výsledky a diskuse*.

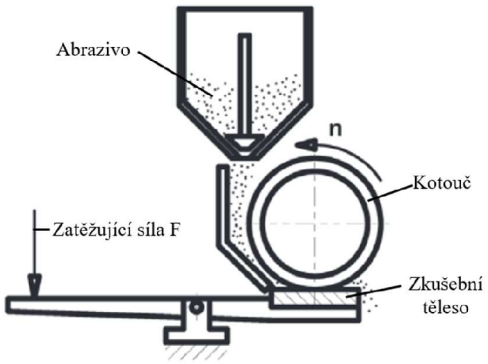
Obrázek 22 - Odečítací zařízení optického tvrdoměru (Vlastní zdroj [14])

3.3.2 Postup zkoušení odolnosti proti opotřebení

Postup zkoušení vychází z normy ČSN EN ISO 28080, resp. ASTM G65, který byl modifikován podle podmínek laboratoře. Pro zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byl použit zkoušecí stroj ITE Tester T-07 zobrazený na obrázku 23. Schéma principu použitého přístroje je znázorněno na obrázku 24.

Obrázek 23 - Zkoušecí stroj abrazivního opotřebení ITE Tester T-07 (Vlastní zdroj [14])

Obrázek 24 - Schéma použitého zkušebního systému 5 (Zdroj [17])



Parametry zkoušecího stroje jsou uvedeny v tabulce 7.

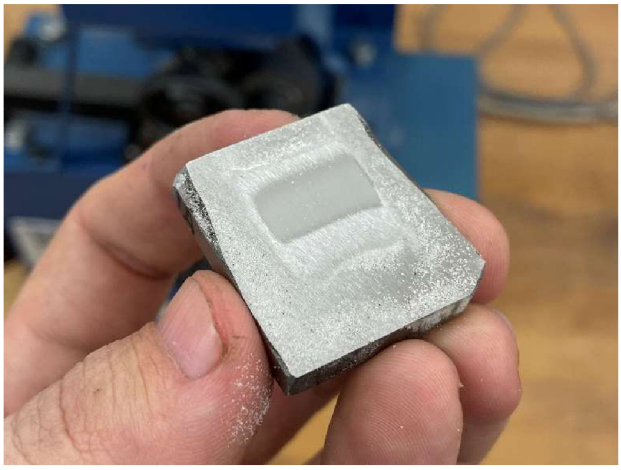
Tabulka 7 - Parametry zkoušecího stroje abraze ITE Tester T-07 [17]

Parametry zkoušecího stroje abrazivního opotřebení ITE Tester T-07	
Průměr pryžového kotouče	**43 mm**
Otáčky kotouče ***n***	**60 ot.min-1**
Zatěžující síla ***F***	**44 N**
Rozměry vzorku	**30 x 30 mm**
Čas běhu	**10 – 60 min (600 – 3600 ot.) podle zvolených otáček**

Postup zkoušky odolnosti proti abrazivnímu opotřebení se skládal z následujících kroků:

Každá trojice zkušebních těles stejného návarového materiálu byla postupně podrobena prvnímu cyklu opotřebení, aby bylo docíleno záběhu kontaktní plochy s kotoučem zkoušecího zařízení. Tento cyklus spočíval v upnutí zkušebního tělesa do upínacího ústrojí, spuštění proudu abraziva a následně současného spuštění rotace kotouče a zatížením uvolněním závaží. Po uplynutí 1 000 otáček se kotouč zastavil a cyklus byl dokončen. Do zásobníku abraziva byl doplněn písek a zkušební těleso, např. na obrázku 25, bylo demontováno a nahrazeno následujícím. Po záběhu celé trojice zkušebních těles stejného materiálu byla tato tělesa očištěna, zvážena a výsledek zaznamenán.

Obrázek 25 - Zkušební těleso po cyklu zkoušky opotřebení (Vlastní zdroj [14])



Po záběhu a zvážení všech zkušebních těles započalo zkoušení stejným postupem jako záběh. Každá trojice byla podrobena cyklu tisíce otáček, následně očištěna a zvážena. Po podrobení jednoho cyklu opotřebení celé sady byla započata další série zkoušení, vždy identického postupu. Celkem proběhlo zkoušení osmi takových sérií, jejichž výsledky jsou uvedeny v kapitole 4 *Výsledky a diskuse*.

3.3.3 Postup měření

Odolnost proti opotřebení zkoušených materiálů se určuje poměrem úbytku zkoušeného materiálu vůči materiálu referenčnímu. Proto je potřeba znát hodnoty úbytku materiálu. Tento úbytek se vyhodnocuje z měření hmotnosti zkušebního tělesa před jeho podrobením vlivu opotřebení a po něm. K tomuto měření bylo použito analytické digitální váhy Kern ABS na obrázku 26, která má rozsah do 120 g a přesnost měření 0,1 mg. Pro zajištění přesnosti měření je váha umístěna v laboratoři s kontrolovanou teplotou a je ustavena na kamenné desce. Pro zvětšení statistické přesnosti, každé měření hmotnosti zkušebního tělesa proběhlo třikrát.

Obrázek 26 - Analytická digitální váha Kern ABS (Vlastní zdroj [14])

Aby nebyly výsledky měření hmotnosti ovlivněny znečištěním zkušebních těles, byla všechna tato tělesa po podrobení opotřebení důkladně očištěna proudem stlačeného vzduchu a bezodkladně podrobena měření hmotnosti.

Naměřené hodnoty hmotností zkušebních těles a zpracování těchto dat je popsáno v kapitole 4 *Výsledky a diskuse*.

4 Výsledky a diskuse

Proběhlá měření vedla k získání následujících výsledků:

4.1 Měření tvrdosti

Naměřené hodnoty úhlopříček vtisku měřícího hrotu jsou uvedeny v příloze 2. Z vypočtených průměrů úhlopříček vtisku byla podle vztahu 2 vypočítána tvrdost dle Vickerse.

$$HV = 0{,}1891 * \frac{F}{u^2}$$

Vztah 2 - Výpočet tvrdosti podle Vickerse

Kde zatěžující síla $F = 294\ N$ a u je průměr naměřených úhlopříček.

Podle převodní tabulky pak byly určeny orientační hodnoty tvrdosti dle Rockwella pro umožnění porovnání s výrobcem deklarovanými hodnotami tvrdostí. Vypočtené a převedené orientační hodnoty tvrdostí jsou uvedeny v tabulce 8. [30]

Tabulka 8 - Vypočítané hodnoty tvrdostí

Materiál	ø Tvrdost HV	σ [µm]	~ Tvrdost HRC
CastoMag 45351	697,46	37,746	59,9
SafeHARD 600	587,99	79,561	54,1
EnDOtec® DO*31	791,41	30,812	63,6
EG 8336	1140,64	69,109	cca 70,8
TeroMatec 4601	904,78	23,303	67
EnDOtec DO*390N	1149,78	54,192	cca 71

4.1.1 Měření opotřebení

Opotřebení je vyjádřeno jako hmotnostní úbytek za jeden zkoušecí cyklus. Zkoušecím cyklem rozumějme 1 000 otáček pryžového kotouče, během nichž je přiváděno abrazivo mezi povrch zkušebního tělesa a kotouč, a zkušební těleso je tedy přitlačováno na kotouč zatěžující silou.

Rychlost rotace pryžového kotouče byla 60 ot.min^{-1}. Zkušební cyklus tedy odpovídá dráze skluzu vypočtené vztahem:

$$s = o * n_1$$

$$s = \pi * d * n_1$$

Vztah 3 - Výpočet dráhy skluzu

kde *s* je dráha skluzu, *o* je obvod povrchu kotouče a n_1 je počet otáček cyklu. Výsledná dráha skluzu vypočtená vztahem 4 je ***s = 135,08 m***.

Rychlost rotace pryžového kotouče byla 60 ot.min^{-1}. Obvodová rychlost, tedy i rychlost skluzu na povrchu zkušebního tělesa je dána vztahem:

$$v = \pi * d * \frac{n_2}{60}$$

Vztah 4 - Výpočet rychlosti skluzu

kdy *v* je rychlost skluzu, *d* je průměr povrchu kotouče a n_2 jsou otáčky kotouče za sekundu. Výsledná rychlost skluzu vypočtená vztahem 5 je ***v = 0,135 m/s***.

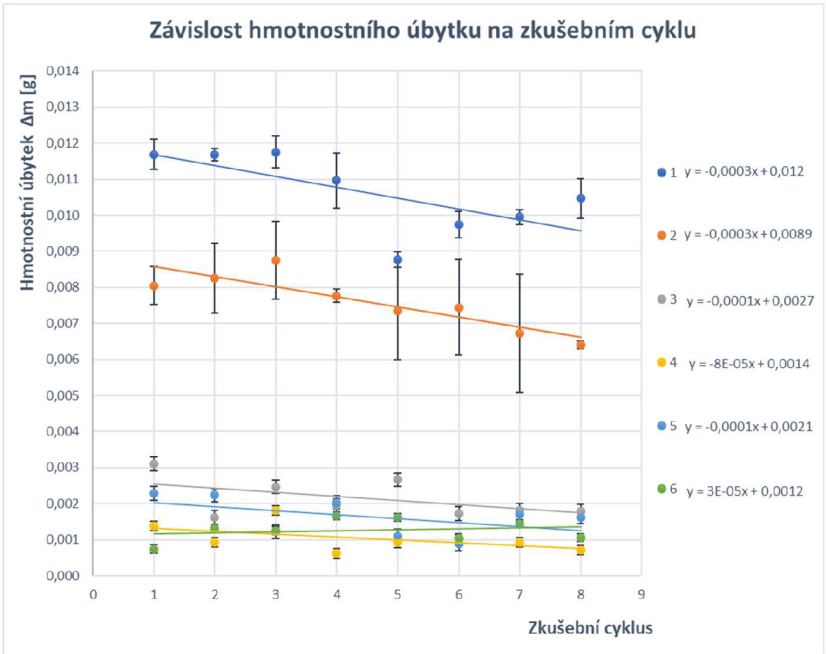
Hodnoty hmotností naměřené mezi jednotlivými zkušebními cykly jsou uvedeny v tabulce v příloze 3. Vypočítané průměrné hmotnostní úbytky (se směrodatnými odchylkami) mezi jednotlivými cykly a jejich celkový průměr pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Průměrné hodnoty hmotnostních úbytků

Zk. cyklus	CastoMag 45351		SafeHARD 600		EnDOtec® DO*31		EG 8336		TeroMatec 4601		EnDOtec® DO*390N	
	ø Δm [g]	σ [g]	ø Δm [g]	σ [g]	ø Δm [g]	σ [g]	ø Δm [g]	σ [g]	ø Δm [g]	σ [g]	ø Δm [g]	σ [g]
1	0,0117	0,00018	0,0080	0,00097	0,0031	0,00064	0,0014	0,00034	0,0023	0,00048	0,0007	0,00023
2	0,0117	0,00045	0,0083	0,00108	0,0016	0,00042	0,0009	0,00017	0,0022	0,00020	0,0013	0,00030
3	0,0118	0,00077	0,0088	0,00018	0,0025	0,00104	0,0018	0,00063	0,0012	0,00109	0,0013	0,00043
4	0,0110	0,00021	0,0078	0,00136	0,0020	0,00025	0,0006	0,00016	0,0020	0,00049	0,0017	0,00054
5	0,0088	0,00036	0,0074	0,00132	0,0027	0,00032	0,0009	0,00022	0,0011	0,00009	0,0016	0,00103
6	0,0097	0,00020	0,0074	0,00164	0,0017	0,00084	0,0010	0,00067	0,0009	0,00032	0,0010	0,00029
7	0,0100	0,00056	0,0067	0,00010	0,0018	0,00039	0,0009	0,00021	0,0017	0,00052	0,0014	0,00021
8	0,0105	0,00211	0,0064	0,00074	0,0018	0,00087	0,0007	0,00035	0,0016	0,00048	0,0011	0,00012
ø	0,0106	0,00102	0,0076	0,00073	0,0021	0,0005	0,0010	0,00036	0,0016	0,00049	0,0013	0,00029

Data z tabulky jsou znázorněna v grafu 1. Chybovými úsečkami je zobrazena směrodatná odchylka a data jsou proložena přímkou lineární regrese, jejíž rovnice přímky je znázorněna u označení materiálu.

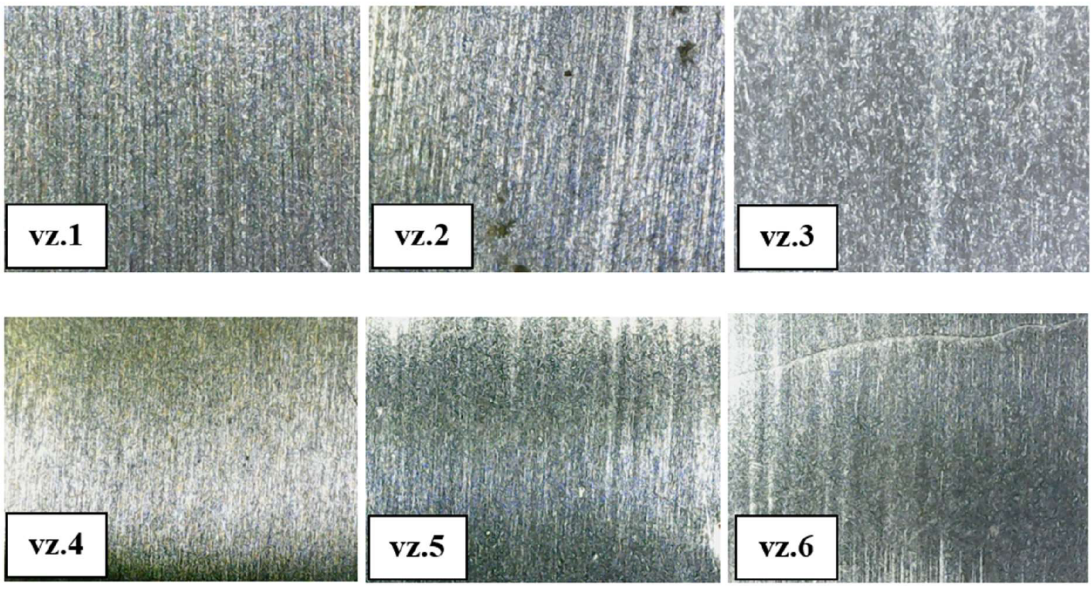
Graf 1- Závislost hmotnostního úbytku na zkušebním cyklu



Legenda: Vzorek č.1 – CastoMag 45351, vzorek č.2 – SafeHARD 600, vzorek č.3 – EbDOtec DO*31, vzorek č.4 – EG 8336, vzorek č.5 – TeroMatec 4601, vzorek č.6 - EnDOtec DO*390N

Abrazivní rýhy, které v povrchu zanechalo abrazivo při experimentálním měření, byly zachyceny pomocí ručního digitálního mikroskopu a jsou zobrazeny na obrázku 27. Jak je vidět, v materiálech s vysokou tvrdostí a jemnými částicemi karbidů v mikrostruktuře jsou abrazivní rýhy jemnější a méně zřetelné než u měkčích materiálů.

Obrázek 27 - Opotřebený povrch zkušebních těles (50x zvětšeno) (Vlastní zdroj [14])



Legenda: Vzorek č.1 – CastoMag 45351, vzorek č.2 – SafeHARD 600, vzorek č.3 – EbDOtec DO*31, vzorek č.4 – EG 8336, vzorek č.5 – TeroMatec 4601, vzorek č.6 - EnDOtec DO*390N

4.2 Diskuse výsledků

V následujících kapitolách jsou diskutovány získané výsledky experimentu.

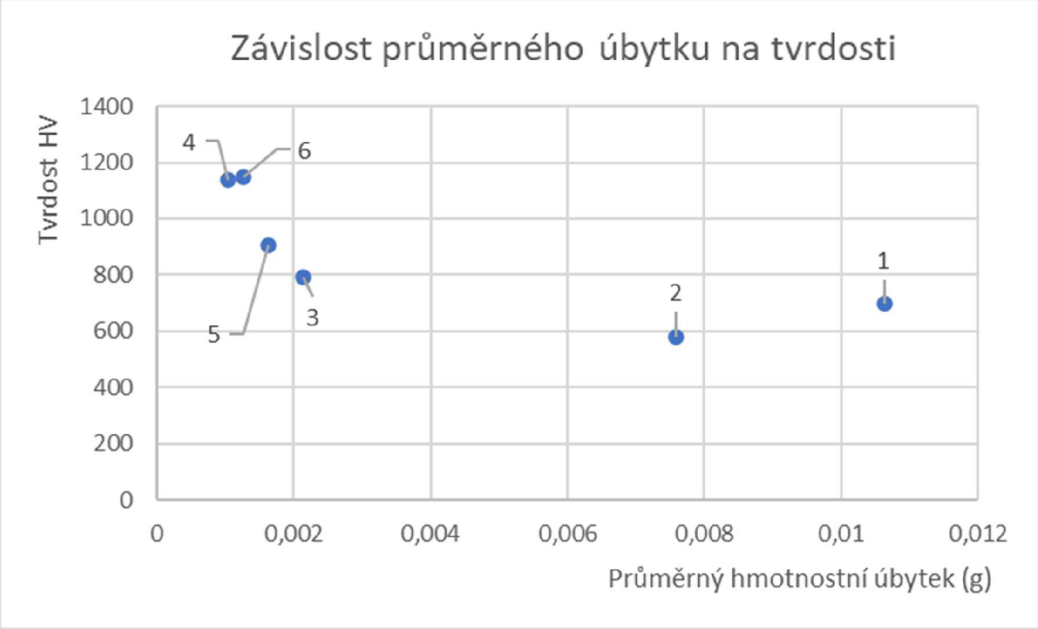
4.2.1 Tvrdost materiálů

Měření tvrdosti ukázalo, že výrobcem deklarované tvrdosti udávané pro jednotlivé návarové materiály jsou po navaření za doporučených podmínek dosažitelné. Tvrdost moderních materiálů využívajících komplexní karbidy pak dosahuje téměř dvojnásobných hodnot tvrdosti, než nejběžnější návary na bázi karbidů chromu.

4.2.2 Závislost odolnosti proti opotřebení na tvrdosti

Z níže vyneseného grafu 2 lze vyčíst závislost odolnosti návaru proti abrazivnímu opotřebení na jeho tvrdosti. Rozumějme, že odolnost proti opotřebení je tím větší, čím menší byl úbytek při zkoušení na pryžovém kotouči.

Graf 2 - Závislost průměrného úbytku na tvrdosti návaru



Legenda: Vzorek č.1 – CastoMag 45351, vzorek č.2 – SafeHARD 600, vzorek č.3 – EbDOtec DO*31, vzorek č.4 – EG 8336, vzorek č.5 – TeroMatec 4601, vzorek č.6 - EnDOtec DO*390N

Nejtvrdší materiály (č.4 a č.6) vykazují jednoznačně nejmenší průměrné hmotnostní úbytky a tím i nejlepší odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Materiály vysoce legované chromem (č.3 a č.5) dosahují přes svou nižší tvrdost rovněž dobré odolnosti vůči abrazi, je však potřeba brát v potaz jejich křehkost. S tou se pojí riziko špatné odolnosti vůči rázovitému zatěžování, při kterém hrozí odlupování návaru, a tedy náhlé ztráty funkčnosti.

Moderní, netoxická alternativa základního a v experimentu referenčního materiálu CastoMag 45351 SafeHARD 600 vykazuje zvýšenou odolnost proti abrazi dokonce i přes

nižší hodnotu tvrdosti. To dokazuje, že ačkoliv je průvodním vlivem na intenzitu abrazivního opotřebení poměr tvrdosti opotřebovávaného materiálu a abrazivních částic, mají na výsledné hodnotě intenzity svůj podíl i další vlastnosti opotřebovávaného materiálu. Míra odolnosti je však ve srovnání s moderními nano technologiemi stále relativně nízká.

Jak je ale vidět na obrázku 28, nevýhodou absence chromu je menší odolnost tohoto materiálu proti koroznímu poškození. Mikroskopický snímek byl pořízen týden po dokončení měření a vzorek s návarem SafeHARD 600 již nese stopy poškození korozí zjevně způsobenou kontaminací potními solemi po dotyku prstu. Korozní body zjevně kopírují viditelný otisk papilárních linií.

Obrázek 28 - Koroze na povrchu vzorku (Vlastní zdroj [14])

4.2.3 Srovnání odolnosti zkoušených materiálů

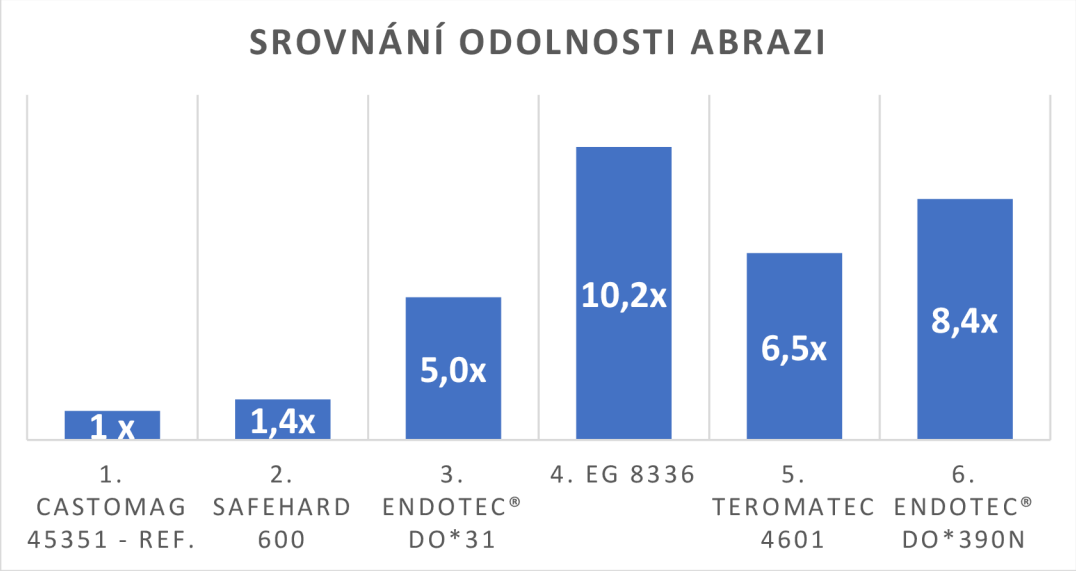
K porovnání výsledků odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení lze dojít jednoduchým podílem průměrné hodnoty hmotnostního úbytku referenčního materiálu a porovnávaného materiálu, jak je znázorněno v následujícím vztahu:

$$\frac{\Delta m_{ref}}{\Delta m_x}$$

Vztah 5 - Podíl hmotnostního úbytku referenčního a sledovaného materiálu

tímto vztahem byly získány výsledky k porovnání uvedené v grafu 3.

Graf 3 - Srovnání odolnosti proti abrazi zkoušených materiálů s referencí



Srovnání ukazuje, že oproti referenčnímu materiálu je odolnost jeho netoxické alternativy SafeHARD 600 1,4x vyšší. Návarové slitiny na bázi vysokého obsahu karbidů chromu EnDOtec DO*31 a Teromatec 4601 dosahují 5násobku, respektive 6,5násobku hodnoty odolnosti referenčního materiálu. Nejmodernější návarové materiály, které jsou tvořeny komplexními karbidy, pak dosahují více než 10násobku, respektive 8násobku hodnoty odolnosti referenčního materiálu CastoMAG 45351.

Na obrázku 28 jsou zachycena zkušební tělesa po skončení experimentu.

Obrázek 29 - Zkušební tělesa [14 - Vlastní zdroj]

5 Závěr

Tato diplomová práce s názvem *Tribologické charakteristiky vybraných návarových materiálů* měla za cíl shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o tribologických procesech, především tedy o procesu abrazivního opotřebení a řešení zmírnění jeho dopadů pomocí vybraných otěruvzdorných návarových materiálů. Dále tato práce také přinesla poznatky o porovnání vlastností vybraných návarových materiálů v laboratorně simulovaných podmínkách abraze. Práce poskytuje ucelený vhled na jednotlivé vlastnosti vybraných návarových materiálů a pomáhá nahlédnout do problematiky abrazivního opotřebení a minimalizace jeho dopadů volbou vhodného návarového materiálu. Vybrané návarové materiály byly podrobeny opotřebení volnými částicemi křemenného písku za neměnných podmínek výše popsaných v této práci.

Vyhodnocení výsledků přineslo potvrzení výrobcem deklarovaných tvrdostí návarů, které u moderních materiálů s komplexními karbidy přesahovaly hodnotu 1100 HV. Hodnocení hmotnostních úbytků návarových materiálů při zkoušce abrazivního opotřebení prokázalo rozdíly v jejich odolnosti proti abrazi. Moderní, bez chromová alternativa běžně rozšířeného materiálu CastoMag 45351 uvedená pod obchodním názvem SafeHARD 600 vykázala 1,4x lepší odolnost proti abrazi, než reference CastoMag 45351. Pokrokové, vysoce legované tvrdonávary na bázi karbidů chromu a návary tvořené komplexními karbidy na hranici nanokrystalů (i za ní) pak dosáhly výborných výsledků odolnosti proti abrazi – 5x a 6,5x, respektive 10,2x a 8,4x vyšší než běžný tvrdonávar CastoMag 45351. Je však nezbytné zohlednit také komplexní pohled na problematiku a multidisciplinární přístup při volbě vhodného materiálu.

Tribologický úhel pohledu umožňuje porozumění širšímu spektru faktorů ovlivňujících opotřebení. Pochopení mechanismů, které ovlivňují proces opotřebení a vzájemná interakce mezi povrchy vybraných materiálů a abrazivními částicemi je hlavním přínosem této diplomové práce z tribologického hlediska. Dále je však také potřeba zohlednit technologický úhel pohledu, který vidí i další vlivy, jako je například působení kombinovaných druhů opotřebení, rázů, teploty atd. na konkrétní konstrukci. V neposlední řadě musí být věnována pozornost i ekonomickému úhlu pohledu, při němž musí být

vyhodnoceny výhody a nevýhody superodolných a drahých materiálů, oproti dostupným materiálům a také jejich vliv na celkové náklady aplikace. Teprve po pečlivém zvážení všech těchto kritérií lze určit nejvíce vyhovující materiál, který bude pro konkrétní aplikaci použit, tak aby efektivita procesu byla co nejvyšší.

Důležitým nástrojem pro posouzení vhodnosti materiálů jsou provozní zkoušky, které umožňují realističtější zhodnocení vlastností těchto materiálů v různých podmínkách. Příkladem takových zkoušek je praktika firmy Castolin, která kombinuje testování abrazivního opotřebení s testováním odolnosti vůči rázům, jak bylo blíže popsáno v kapitole 2.4.2. Firma Castolin také poskytla vzorky materiálů pro experimentální část této práce, jejíž výsledky může zhodnotit v dalším vývoji.

Výrazným krokem vpřed je reflektování současných trendů v oblasti bezpečnosti práce, včetně snahy o eliminaci škodlivých látek, jako je například odstranění chromu z používaných slitin, protože emise sloučenin s jeho obsahem v šestimocném stavu jsou výrazným zdravotním rizikem pro velké množství lidí po celém světě, kteří pracují v blízkosti svařovacích technologií. Nahrazení těchto slitin jinými materiály, jako je SafeHARD 600, totiž markantně snižuje karcinogenní rizika. Tento trend směřuje k vývoji moderních materiálů, které nabízejí stejnou či dokonce lepší výkonnost bez negativních dopadů na zdraví a životní prostředí. Tyto moderní materiály dokáží plnohodnotně zastoupit či dokonce svými vlastnostmi převýšit tato rozšířená řešení, jak ukázal experiment v této práci, aniž by jakkoli výrazně afektovala cenovou hladinu.

Tato diplomová práce shrnuje cenné poznatky a přispívá k hlubšímu porozumění tribologie a aplikací materiálů v praxi. Multidisciplinární přístup a také důkladně provedená analýza poskytují ucelený pohled na problematiku a mají potenciál ovlivnit další vývoj v oblasti materiálového inženýrství a průmyslových aplikací.

6 Seznam použitých zdrojů

[1] MARTINI, Ashlie. *Introduction to tribology for engineers*. Version 1.4. [Spojené státy americké]: Martini, [2022]. ISBN 979-884-4576-508.

[2] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika* [online]. Ostrava, 2000 [cit. 21.3.2024]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-I-Tribodiagnostika-skripta.pdf

[3] VIŽINTIN, Jože; KALIN, Mitjan; DOHDA, Kuniaki a JAHANMIR, Said. *Tribology od mechanicals systems: a guide to present and future technologies*. New York: ASME Press, 2004. ISBN 0-7918-0209-4.

[4] AHMED, Sarfraj a DAKRE, Vinayak S. *Tribology and characterization of surface coatings*. USA: Scrivener Publishing, 2022. ISBN 978-1-119-81878-6.

[5] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: Vydavatelstvé ČVUT, 1997.

[6] POŠTA, J. *Provozuschopnost strojů*. [Učební texty]. ČZU, TF, Praha, 2002, ISBN 80-213-0966-0

[7] BRAHA, Michal. *Otěruvzdorné materiály pro podmínky abrazivního opotřebení*. Bakalářská práce. Praha 6 - Suchdol: ČZU v Praze, 2022.

[8] POŠTA, Josef; VESELÝ, Petr; DVOŘÁK, Milan. *Degradace strojních součástí*. Praha : ČZU, 2002. 67 s. ISBN 80-213-0967-9.

[9] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFER, Ivo HLAVATÝ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.

[10] LEVINSKÝ, Otto, Irena ŠELEPOVÁ a Josef ŽÁK. *Technický naučný slovník 3. díl*. 2. dopl.vyd. Praha 1: SNTL, 1982. ISBN 04-001-83

[11] SUCHÁNEK, Jan. *Abrazivní opotřebení*. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06733-8.

[12] VOCEL, Milan, Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976.

[13] CHRUŠČOV, M.M. – BABIČEV, M.A. *Abrazivnoje Iznašivánije*, Moskva, Nauka, 1970.

[14] - Vlastní zdroj

[15] VOTAVA, J., ČERNÝ, M., FILÍPEK, J.: *Influence of heat treatments on the abrasive wear*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2005, LIII, No. 5, pp. 175–186

[16] *WEAR TESTING METHODS AND THEIR RELEVANCE TO INDUSTRIAL WEAR PROBLEMS*. 1998, roč. 1997, č. 92. 1998. ISSN ISSN 1361-4061.

[17] *URZĄDZENIE T-07 DO BADANIA SUCHYM ŚCIERNIWEM*. Online. In: SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ – INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI. ITEE Lukasiewicz.gov.pl. 2013. Dostupné z: https://www.itee.lukasiewicz.gov.pl/images/karty/591t-07.pdf. [cit. 2024-03-28].

[18] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 28080, *Tvrdokovy - Abrazivní zkoušky tvrdokovů*. 2021. [cit. 2024-03-24].

[19] Poskytnuto firmou Castolin s. r. o.

[20] RIDDIHOUGH, m. *Hardfacing by welding*. Second edition. Endgland: The Chapel River Press, 1955.

[21] Tandon, D.; Li, H.; Pan, Z.; Yu, D.; Pang, W. *A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works*. Metals 2023, 13, 1512. https://doi.org/10.3390/met13091512

[22] *EnDOtec® Welding Cored Wire Technology for Protection, Repair & Joining Solutions*. Online. In: Castolin Eutectic. 2006. Dostupné z: https://www.castolin.com/sites/default/files/products/docs/EnDOtec-Welding-Cored-Wire.pdf. [cit. 2024-03-24].

[23] *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. Online. In: ITeh standarts. 2013. Dostupné z: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/98712/68ce71386bff43ddb7c42f373fd0f9a8/ASTM-G65-16e1.pdf. [cit. 2024-03-28].

[24] *US Silica*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.ussilica.com/locations/ottawa-il. [cit. 2024-03-28].

[25] *Castolin.com*. Online. Dostupné z: https://www.castolin.com/new-endotec-safe-hard-600-wire-range-inspired-safety-engineered-performance. [cit. 2024-03-28].

[26] *Dispersion Hardening «DH» Wearfacing Alloy Range*. Online. In: Castolin.com. 2013. Dostupné z: https://www.castolin.com/sites/default/files/products/docs/DH%20Range_EN%20web.pdf. [cit. 2024-03-25].

[27] Klimpel, Andrzej & Luksa, Krzysztof & Burda, Marek. (2010). *Structure and properties of GMA surfaced armour plates*. Archives of Materials Science and Engineering. 43.

[28] *Nano Technology comes to Welding Wearfacing Applications. EnDOtec DO*390N.* St-Sulpice: Castolin, 2011. Dostupné také z: https://issuu.com/castolin_eutectic/docs/endotecdo390n__flyer_e

[29] *Vibrační prosévačka kameniva VPK*. Online. In: BRIO Hranice. 2024. Dostupné z: https://briohranice.cz/media/cache/file/c9/Prosevacka-mechanicka-VPK-40-a-VPK-50.pdf. [cit. 2024-03-28].

[30] SIJ GROUP. *Hardness conversion chart*. Online. 2023. Dostupné z: https://steelselector.sij.si/calculators/hardness/hardness_table.html. [cit. 2024-03-28].

[31] H. Rojacz, C. Katsich, M. Kirchgaßner, R. Kirchmayer, E. Badisch, Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys, Wear, Volumes 492–493, 2022, 204183, ISSN 0043-1648, https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204183.

[32] Czupryński, A. Comparison of Properties of Hardfaced Layers Made by a Metal-Cored-Covered Tubular Electrode with a Special Chemical Composition. *Materials* **2020**, *13*, 5445. https://doi.org/10.3390/ma13235445

Přílohy

Příloha 1 – naměřené hodnoty drsnosti povrchu návarů

Materiál	Drsnost Ra [µm]			øRa [µm]	σ [µm]
CastoMag 45351	1,4230	1,4310	1,4190	1,424	0,0050
SafeHARD 600	1,1740	1,1860	1,1700	1,177	0,0068
EnDOtec® DO*31	1,0230	1,0250	1,0260	1,025	0,0012
EG 8336	0,8370	0,8270	0,8220	0,829	0,0062
TeroMatec 4601	0,8550	0,8760	0,8620	0,864	0,0087
EnDOtec DO*390N	0,7400	0,7490	0,7430	0,744	0,0037

		Úhlopříčky [µm]											
Vz. č.		**1. měření**		**2.měření**		**3.měření**		**4.měření**		**5.měření**		**6.měření**	
CastoMag 45351	A	301	289	273	283	266	273	279	281	277	272	290	285
	B	287	286	295	296	265	279	263	278	287	282	284	286
	C	291	286	284	285	283	270	293	287	278	294	284	283
SafeHARD 600	A	307	308	284	285	304	295	303	313	349	353	274	277
	B	304	306	327	333	340	334	344	336	334	347	303	313
	C	275	290	296	307	278	289	313	306	308	290	314	309
EnDOtec® DO*31	A	263	269	256	263	251	258	257	263	262	264	266	267
	B	268	264	265	274	266	251	271	258	259	266	267	277
	C	274	271	269	274	268	264	262	259	264	273	269	275
EG 8336	A	212	214	233	235	230	226	218	211	214	209	213	210
	B	219	226	237	233	222	225	231	226	222	219	219	224
	C	220	213	225	218	215	214	229	218	222	217	222	218
TeroMatec 4601	A	245	253	248	257	252	254	243	240	242	241	243	246
	B	252	251	247	250	250	248	254	246	249	251	245	245
	C	245	249	254	245	247	249	251	246	248	245	247	248
EnDOtec DO*390N	A	210	217	218	220	218	219	213	224	214	216	227	222
	B	223	225	215	216	222	220	223	226	226	227	221	220
	C	218	213	216	218	230	219	231	238	213	218	216	211

Příloha 2 – Naměřené hodnoty hmotností zkušebních těles

Vzorek	Hmotnost [g]								
CastoMag 45351	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	45,5943	45,5946	45,5946	43,4296	43,4295	43,4294	42,8081	42,8081	42,8079
Záběh	45,5814	45,5813	45,5815	43,4151	43,4154	43,4156	42,7949	42,7941	42,7944
1	45,5777	45,5781	45,5780	43,4038	43,4039	43,4040	42,7826	42,7825	42,7826
2	45,5615	45,5612	45,5611	43,3943	43,3942	43,3943	42,7739	42,7739	42,7737
3	45,5545	45,5543	45,5546	43,3808	43,3807	43,3809	42,7589	42,7589	42,7587
4	45,5441	45,5435	45,5434	43,3700	43,3698	43,3701	42,7477	42,7477	42,7473
5	45,5347	45,5341	45,5344	43,3614	43,3615	43,3617	42,7389	42,7390	42,7390
6	45,5245	45,5247	45,5248	43,3515	43,3517	43,3514	42,7290	42,7297	42,7297
7	45,5147	45,5149	45,5154	43,3423	43,3421	43,3418	42,7190	42,7186	42,7186
8	45,5024	45,5026	45,5024	43,3308	43,3307	43,3308	42,7111	42,7111	42,7113

Vzorek	Hmotnost [g]								
SafeHARD 600	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	43,6364	43,6386	43,6369	40,5174	40,5176	40,5180	39,0337	39,0334	39,0325
Záběh	43,6273	43,6272	43,6277	40,5068	40,5063	40,5065	39,0229	39,0220	39,0222
1	43,6188	43,6196	43,6193	40,4996	40,4994	40,5002	39,0130	39,0134	39,0132
2	43,6120	43,6124	43,6125	40,4903	40,4899	40,4903	39,0051	39,0048	39,0049
3	43,6033	43,6034	43,6034	40,4815	40,4816	40,4817	38,9954	38,9950	38,9952
4	43,5941	43,5935	43,5935	40,4750	40,4751	40,4751	38,9876	38,9883	38,9884
5	43,5923	43,5924	43,5919	40,4662	40,4664	40,4661	38,9821	38,9824	38,9829
6	43,5826	43,5823	43,5825	40,4596	40,4600	40,4592	38,9766	38,9762	38,9767
7	43,5753	43,5758	43,5757	40,4531	40,4531	40,4527	38,9698	38,9699	38,9698
8	43,5693	43,5691	43,5694	40,4455	40,4458	40,4456	38,9643	38,9641	38,9645

Vzorek	Hmotnost [g]								
EnDOtec® DO*31	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	41,1134	41,1139	41,1133	41,0987	41,0989	41,0991	39,5358	39,5355	39,5358
Záběh	41,1115	41,1120	41,1105	41,0974	41,0983	41,0985	39,5342	39,5341	39,5341
1	41,1082	41,1080	41,1077	41,0943	41,0942	41,0945	39,5317	39,5319	39,5321
2	41,1068	41,1071	41,1069	41,0923	41,0924	41,0924	39,5299	39,5300	39,5302
3	41,1037	41,1023	41,1030	41,0909	41,0905	41,0907	39,5280	39,5283	39,5284
4	41,1012	41,1005	41,1009	41,0885	41,0888	41,0884	39,5266	39,5270	39,5263
5	41,0994	41,0986	41,0976	41,0858	41,0860	41,0862	39,5233	39,5236	39,5237
6	41,0960	41,0959	41,0955	41,0842	41,0842	41,0843	39,5226	39,5229	39,5231
7	41,0936	41,0948	41,0950	41,0826	41,0825	41,0821	39,5203	39,5199	39,5215
8	41,0921	41,0915	41,0908	41,0817	41,0813	41,0813	39,5192	39,5191	39,5191

Vzorek	Hmotnost [g]								
EG 8336	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	45,5230	45,5230	45,5229	45,4502	45,4503	45,4504	45,4313	45,4313	45,4313
Záběh	45,5204	45,5205	45,5205	45,4495	45,4495	45,4495	45,4303	45,4304	45,4301
1	45,5197	45,5194	45,5194	45,4481	45,4481	45,4482	45,4286	45,4285	45,4283
2	45,5184	45,5183	45,5183	45,4473	45,4473	45,4475	45,4275	45,4277	45,4276
3	45,5170	45,5165	45,5171	45,4447	45,4446	45,4447	45,4264	45,4263	45,4263
4	45,5164	45,5164	45,5166	45,4441	45,4437	45,4439	45,4252	45,4260	45,4257
5	45,5157	45,5156	45,5157	45,4428	45,4425	45,4427	45,4248	45,4251	45,4248
6	45,5141	45,5137	45,5143	45,4426	45,4426	45,4425	45,4236	45,4237	45,4233
7	45,5136	45,5133	45,5133	45,4418	45,4411	45,4415	45,4222	45,4226	45,4226
8	45,5123	45,5122	45,5121	45,4410	45,4410	45,4411	45,4218	45,4220	45,4221

Vzorek	Hmotnost [g]								
TeroMatec 4601	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	43,5880	43,5877	43,5882	43,6273	43,6273	43,6273	43,8067	43,8066	43,8065
Záběh	43,5864	43,5865	43,5866	43,6243	43,6244	43,6243	43,8053	43,8051	43,8055
1	43,5845	43,5847	43,5842	43,6223	43,6226	43,6225	43,8023	43,8024	43,8023
2	43,5821	43,5818	43,5820	43,6205	43,6203	43,6205	43,8001	43,8001	43,8003
3	43,5814	43,5816	43,5817	43,6175	43,6178	43,6177	43,7998	43,7995	43,7997
4	43,5802	43,5800	43,5802	43,6158	43,6152	43,6159	43,7971	43,7968	43,7972
5	43,5793	43,5790	43,5789	43,6145	43,6143	43,6144	43,7957	43,7962	43,7961
6	43,5779	43,5776	43,5782	43,6133	43,6133	43,6134	43,7955	43,7955	43,7957
7	43,5770	43,5769	43,5769	43,6113	43,6112	43,6113	43,7934	43,7935	43,7936
8	43,5743	43,5749	43,5747	43,6099	43,6101	43,6098	43,7924	43,7923	43,7921

Vzorek	Hmotnost vzorků [g]								
EnDOtec DO*390N	A			B			C		
	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.	1.měř.	2.měř.	3.měř.
Počátek	44,6116	44,6117	44,6118	42,9026	42,9024	42,9025	45,7872	45,7869	45,7871
Záběh	44,6086	44,6084	44,6084	42,9003	42,9005	42,9004	45,7859	45,7858	45,7854
1	44,6074	44,6076	44,6073	42,8996	42,8998	42,8996	45,7849	45,7855	45,7853
2	44,6063	44,6061	44,6064	42,8984	42,8988	42,8987	45,7832	45,7836	45,7837
3	44,6044	44,6046	44,6046	42,8972	42,8975	42,8972	45,7829	45,7828	45,7827
4	44,6027	44,6029	44,6030	42,8949	42,8951	42,8949	45,7818	45,7818	45,7818
5	44,6022	44,6021	44,6020	42,8940	42,8940	42,8939	45,7788	45,7787	45,7787
6	44,6011	44,6012	44,6011	42,8926	42,8924	42,8926	45,7780	45,7782	45,7778
7	44,5996	44,5995	44,5993	42,8909	42,8909	42,8913	45,7769	45,7768	45,7768
8	44,5984	44,5983	44,5985	42,8896	42,8898	42,8901	45,7761	45,7759	45,7758