

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

**Otěruvzdorné materiály pro podmínky abrazivního
opotřebení**

Vedoucí práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Autor práce: Michal Braha

© 2022 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Braha

Zemědělské inženýrství
Inženýrství údržby

Název práce

Otěruvzdorné materiály pro podmínky abrazivního opotřebení

Název anglicky

Abrasion resistant materials for abrasive wear conditions

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o otěruvzdorných materiálech, používaných do podmínek intenzivního abrazivního opotřebení. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky bakalář stanoví přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Stroje, zařízení, opotřebení, spolehlivost, životnost

Doporučené zdroje informací

AHMED, N.: New Developments in Advanced Welding, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge, England, 2005.

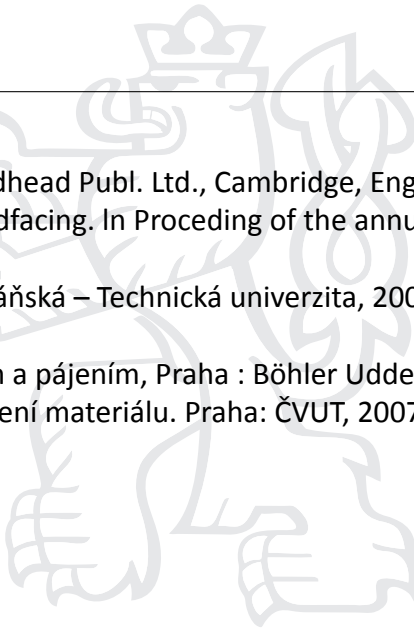
DASTUR, M., R., MOSKOVITC., L., N.: Tailored coating for hardfacing. In Proceeding of the annual powder Metallurgy conference, 1983.

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.

SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E.: Abrazivní opotřebení materiálu. Praha: ČVUT, 2007.



Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2021

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**Otěruvzdorné materiály pro podmínky abrazivního opotřebení**" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu, Ing. Petru Hraběti, Ph.D., za jeho velmi cenné rady, ochotný přístup během konzultací a vstřícné jednání. Také bych rád poděkoval mým blízkým za jejich podporu a trpělivost během celého mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou materiálů vhodných pro použití v podmínkách abrazivního opotřebení. V práci je rozveden pojem opotřebení, jeho základní druhy, i mechanismy a vlivy na jeho průběh a rozsah. Dále jsou popsány způsoby zkoušení a vyhodnocování odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Otěruvzdorné materiály jsou rozděleny podle způsobu aplikace a jsou jmenovány a vysvětleny jejich charakteristické vlastnosti. V závěrečné části jsou popsány principy volení materiálu pro individuální podmínky použití.

Klíčová slova: Opotřebení, ořez, materiály, odolnost, technologie, tribologie, funkční povrchy, životnost, zkoušení, provozní podmínky

Abrasion resistant materials for abrasive wear conditions

Abstract

The bachelor thesis deals with the issue of materials suitable for use in abrasive wear conditions. The thesis elaborates the concept of wear, its basic types, as well as mechanisms and influences on its course and extent. Furthermore, methods of testing and evaluating resistance to abrasive wear are described. Abrasion-resistant materials are classified according to their application and their characteristic properties are named and explained. In the final section, the principles of material selection for individual application conditions are described.

Keywords: wear, abrasion, materials, wear resistance, technology, tribology, functional surface, service life, testing, operating conditions

Obsah

Úvod	4
Cíl práce a metodika.....	5
Cíl práce	5
Metodika práce.....	5
Opotřebení materiálů	6
1.1 Definice a význam opotřebení	6
1.2 Základní druhy opotřebení	6
1.2.1 Adhezivní opotřebení.....	6
1.2.2 Vibrační opotřebení	6
1.2.3 Únavové opotřebení.....	6
1.2.4 Kavitační opotřebení.....	7
1.2.5 Erozivní opotřebení.....	7
1.2.6 Abrazivní opotřebení	7
Mechanismy a vlivy abrazivní opotřebení.....	8
1.3 Mechanismy abrazivního opotřebení	9
1.4 Vliv tvaru abrazivních částic.....	10
1.5 Vliv velikosti abrazivních částic	10
1.6 Vliv poměru tvrdostí materiálu a abrazivních částí	11
Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení.....	12
1.7 Laboratorní zkoušení.....	12
1.7.1 Přístroje s volnými částicemi	13
1.7.2 Přístroje s vázanými částicemi.....	15
1.8 Provozní zkoušení	16
Materiály odolné proti abrazivnímu opotřebení.....	16
1.9 Konstrukční materiály	17
1.9.1 Tepelně zpracované oceli.....	17
1.9.2 Legované oceli	18
1.9.3 Litiny.....	20
1.9.4 Jemnozrnné oceli termomechanicky zpracované	20
1.10 Speciální povrchové úpravy	21
1.10.1 Chemicko-tepelně upravené povrchy	21
1.10.1.1 Cementování.....	21
1.10.1.2 Nitridování.....	22
1.10.1.3 Bórování	22
1.10.2 Povlakování	22

1.11 Plátování, navařování, nástřiky speciálními materiály	23
1.11.1 Materiály pro plátování.....	24
1.11.1.1 Keramické materiály	24
1.11.1.2 Slinuté karbidy.....	25
1.11.1.3 Plechy s otěruvzdorným návarem	26
1.11.2 Materiály pro navařování.....	26
1.11.3 Žárové nástřiky	29
Volba vhodného materiálu.....	29
Závěr	31
Seznam použitých zdrojů	32
Přílohy.....	34

Seznam obrázků

Obrázek 1- Schémata principu základních druhů opotřebení [3]	8
Obrázek 2 - Fragmentace abrazivních částic [4]	11
Obrázek 3 – Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [5].....	13
Obrázek 4 – Schéma přístroje s brusnou nádobou [5]	14
Obrázek 5 - Schéma bubnového zkoušecího přístroje [5]	15
Obrázek 6 - Schéma přístroje s brusným plátnem [5]	15
Obrázek 7 - Schéma přístroje s brusným kotoučem [5].....	16
Obrázek 8 - Vztah velikosti částic výplně kompozitu a abrazivních částic.....	24
Obrázek 9 - Keramické destičky v matrici z vulkanizované gumy [10]	25
Obrázek 10 - Struktura návaru s WC v niklové matrici [15].....	27
Obrázek 11 - Porovnání velikosti nanokrystalu BC a krystalu WC [14].....	28
Obrázek 12 - Graf abrazivní odolnosti různých materiálů [15].....	30

Seznam tabulek

Tabulka 1- Závislost poměrné odolnosti proti abrazi na tvrdosti abraziva [5].....	12
Tabulka 2 - Zkušební parametry podle ASTM G65 [4]	14
Tabulka 3 - Závislost odolnosti proti abrazi na tepelném zpracování [7]	18
Tabulka 4 - Vysokopevnostní otěruvzdorné plechy [4].....	21
Tabulka 5 - Závislost tvrdosti a objemového otěru návarů na počtu vrstev [13]	27
Tabulka 6 - Porovnání relativní odolnosti proti abrazi nanostrukturního a wolframkarbidového návaru [14]	28

Úvod

V současné technicky vyspělé a pokročilé době roste poptávka po kvalitních výrobcích každým dnem, a tudíž je kladen stále větší důraz na efektivní výrobu, která si nárokuje v ideálním případě minimální náklady, ale zároveň vytváří produkty vysokých jakostních vlastností. Od strojů a strojních zařízení jsou vyžadovány stále vyšší měrné výkony a s touto skutečností jsou kladeny vysoké nároky rovněž na techniky, inženýry a konstruktéry. Jejich cílem je vyvíjet takové stroje a zařízení, které splní všechny požadavky dnešní technicky pokrokové doby, jako je například efektivita, vysoká jakost, spolehlivost, ekonomičnost a ekologičnost. Moderní stroje a strojní zařízení musí vykazovat dlouhodobý bezporuchový provoz, a to nejen v souvislosti s jednotlivými částmi, ale i v návaznosti na další stroje nebo dokonce celé strojní linky. Je také více než žádoucí, aby tyto stroje v případě potřeby umožňovaly i snadno proveditelnou a rychlou údržbu, a to jak v rámci pravidelné prevence, tak rovněž při odstraňování příležitostných provozních havárií a poruch. Aby celý tento komplexní výrobní proces mohl zdárně proběhnout, je zapotřebí mnohých moderních technických znalostí z různých vědních oborů, jakými jsou například mechanika, nauka o teple, pružnost a pevnost, metalurgie nebo tribologie.

Právě znalost principů z oblasti tribologie, tedy vědy zabývající se procesy tření, opotřebením a mazáním, a následně vhodná volba konstrukčních materiálů jsou ve strojírenské výrobě jedny z klíčových předpokladů pro funkční konstruování strojních systémů a zařízení. Tato problematika také velmi úzce souvisí s pojmy, jako je životnost a spolehlivost daného strojního zařízení. Zde by bylo možné aplikovat princip přímé úměry. Platí tedy, že správná funkčnost, dlouhá životnost a skvělá spolehlivost jsou přímo úměrné množství odborných znalostí, kterými konstruktér konkrétního strojního zařízení disponuje. V neposlední řadě je také potřeba zmínit ekologickou udržitelnost ve výrobním procesu, která hraje v současné době nezanedbatelnou roli a ke které mohou, mimo jiné, významně přispět právě poznatky z oblasti vědní disciplíny tribologie. Jejich správné aplikování a uvedení do praxe dokáže zabránit nadměrnému využívání nerostných surovin, jako je například těžba určitých druhů kovů, a také mohou výrazně zamezit nadbytečnému čerpání neobnovitelných zdrojů energie.

V první kapitole mé bakalářské práce krátce nastíním obecnou problematiku tribologie, především opotřebením, uvedu jeho základní typy, příčiny a možnosti minimalizování negativních dopadů daných opotřebením. Druhá kapitola mé práce je věnována konkrétně abrazivnímu opotřebením, v této kapitole se budu podrobně zabývat mechanismy abrazivního opotřebením a různými vlivy vlastností abrazivních částic. Ve třetí kapitole přiblížím problematiku zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebením. Následující čtvrtá kapitola, která je zároveň stěžejní částí mé bakalářské práce, pojednává o materiálech odolných proti abrazivnímu opotřebením. Zmíním zde konkrétní typy možných materiálových řešení – zušlechťené oceli, jemnozrnné oceli termomechanicky zpracované a legované litiny, speciální povrchové vrstvy a plátování, pájení, navařování, nástřiky speciálními materiály.

Cíl práce a metodika

Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální soudobé poznatky o otěruvzdorných materiálech používaných v podmínkách intenzivního abrazivního opotřebení. V hlavní části jsou přiblíženy základní druhy mechanického opotřebení, přičemž největší důraz je kladen na abrazivní opotřebení, příčiny jeho vzniku a různé mechanismy právě tohoto druhu opotřebení. Následně se ve své práci podrobně zaměřuji na použití různých typů materiálů, které jsou schopné abrazivnímu opotřebení odolávat, a mají tedy velký význam při konstruování strojů, jejich údržbě, provozuschopnosti a v neposlední řadě také při ekonomické výhodnosti a ekologické udržitelnosti daného strojního zařízení.

Metodika práce

Typem této bakalářské práce je literární rešerše. Jako metodický postup byl zvolen především vědecký popis. Definice daných pojmů a procesů souvisejících s tématem této práce vycházejí z věrohodných aktuálních zdrojů a je při tom kladen důraz na maximální objektivitu teoretické části práce. V návaznosti na metodu vědeckého popisu je také použita metoda explanace. V mé práci se tato metoda odráží především ve vyvození teoretických závěrů a ve formulaci zdůvodnění příčin popisovaných jevů. Další významnou metodou mého postupu je analýza, která umožnila odhalit různé vlastnosti a souvislosti jevů a procesů souvisejících s problematikou abrazivního opotřebení a materiálů odolných vůči tomuto opotřebení. Tyto nové poznatky byly následně sumarizovány a spojeny za pomoci syntézy. V závěrečné části mé bakalářské práce je vyvozen platný závěr vycházející z informací a údajů uvedených v hlavní části práce, k němuž byla použita indukční metoda. Tato závěrečná část je také jedinou pasáží, která je z části ovlivněna mým subjektivním postojem vycházejícím z vlastních zkušeností a znalostí.

Opotřebení materiálů

1.1 Definice a význam opotřebení

V následující podkapitole se budu věnovat definici opotřebení materiálů. Toto téma mimo jiné podrobně popisuje profesor Pošta ve své publikaci Provozoschopnost strojů. Jako definici opotřebení materiálů uvádí: „*Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává.*“¹ Opotřebení hraje v provozuschopnosti strojů významnou roli, v jeho důsledku, spolu s dalšími druhy poškození, dochází k omezení funkčnosti strojních součástí a zařízení.

1.2 Základní druhy opotřebení

1.2.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení vzniká smykem povrchu dvou tuhých těles, která jsou navzájem přitlačována normálovou silou, aniž by mezi nimi byly přítomny jakékoliv cizí částice. Míru tohoto typu opotřebení ovlivňuje zejména přítomnost maziva mezi povrchy, míra normálového zatížení, relativní rychlost vzájemného pohybu, tvar a množství mikronerovností daných povrchů a schopnost konkrétních materiálů vytvářet adhezivní mikrospoje. Negativní účinky adhezivního opotřebení lze částečně eliminovat zavedením určitých opatření, jako například vhodným mazáním a důslednou údržbou, v první řadě však vhodnou konstrukcí a volbou materiálů. [1]

1.2.2 Vibrační opotřebení

Tento typ opotřebení je charakterizován oddělováním poškozováním daného povrchu v důsledku vzájemných kmitavých a tečných posuvů funkčních povrchů těles při působení normálového zatížení. Rozsah tohoto typu opotřebení je ovlivňován převážně technickými vlastnostmi materiálů, velikostí normálové síly a frekvencí a výchylkou pohybu. Minimalizace vibračního opotřebení lze dosáhnout přesnou výrobou a maximálním omezením vibrací. [1]

1.2.3 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je charakterizováno postupně nakumulovanými poruchami povrchových a podpovrchových vrstev vyvolaných cyklickými kontaktními tlaky. Projevuje se odlupováním částic povrchu, tzv. Pittingem. Vliv na rozsah tohoto druhu opotřebení má

¹ POŠTA, J. Provozoschopnost strojů. [Učební texty]. ČZU, TF, Praha, 2002, ISBN 80-213-0966-0

velikost kontaktního tlaku, frekvence jeho působení a technické parametry povrchových a podpovrchových vrstev daných materiálů. [1]

1.2.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení vzniká v důsledku výskytu kavitace v kapalině, která je v přímém kontaktu s opotřebovávaným povrchem. „*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).*“²

Vznik kavitace je podněcován především konstrukcí a provozními podmínkami. Dále pak obsahem plynů v kapalině, její viskozitou a povrchovým napětím, její teplotou a tlakovými poměry. Eliminovat vznik kavitace, a tím následně eliminovat výskyt kavitačního opotřebení lze správnou konstrukcí a dodržováním provozních podmínek. [1]

1.2.5 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení vzniká vymíláním materiálu proudem částic unášených kapalinou či plynem. V určitých případech je toto opotřebení způsobeno i částicemi samotné tekutiny. Rozsah opotřebení je ovlivněn relativní rychlostí částic, jejich druhem, velikostí a tvarem, úhlem dopadu těchto částic a jejich kinetickou energií, teplotou a vlastnostmi unášivého média a v neposlední řadě vlastnostmi opotřebovávaného materiálu. Negativní účinky erozivního opotřebení lze částečně minimalizovat použitím odolnějších materiálů; případně změnou rychlosti proudění. [1]

1.2.6 Abrazivní opotřebení

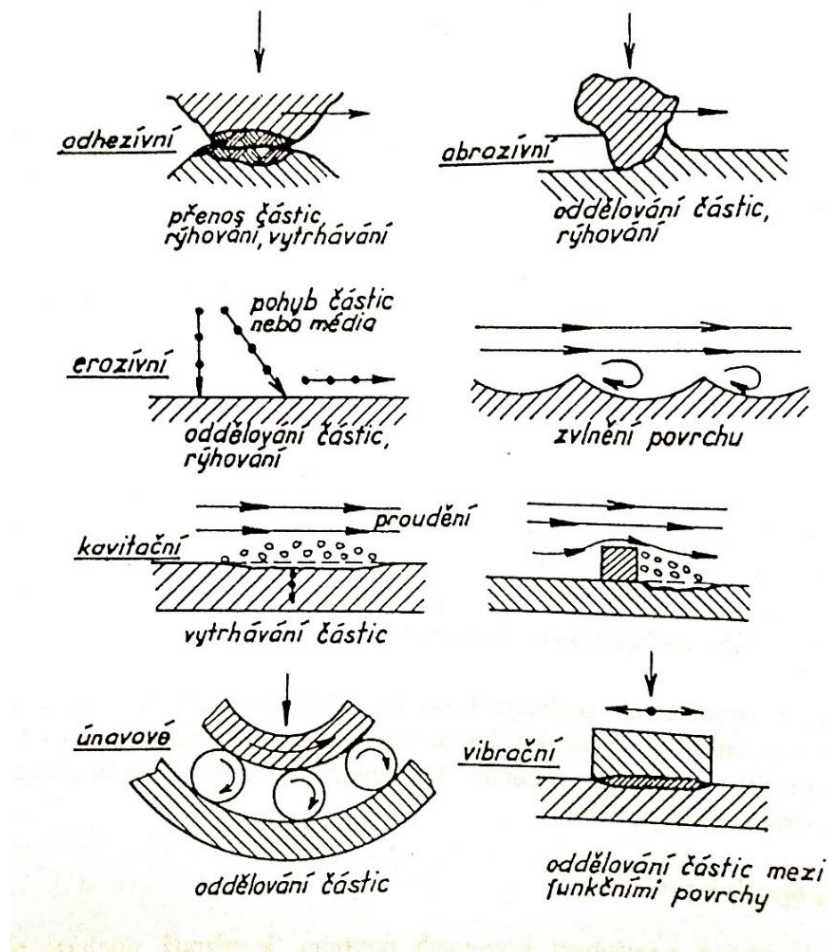
Abrazivnímu opotřebení, jakožto stěžejnímu tématu mé bakalářské práce, budu věnovat zvláštní pozornost v následujících kapitolách, viz kapitoly 2 a 3. Zde uvedu pouze stručnou charakteristiku tohoto opotřebení. Abrazivní opotřebení je charakterizováno souvislou ztrátou materiálu při kontaktu dvou pevných, drsných povrchů, mezi nimiž se vyskytují tvrdé částice. Při relativním pohybu vznikají na povrchu materiálu rýhy a valy podél těchto rýh. Část materiálu se obvykle odděluje ve formě mikrotřísek. Vliv na míru tohoto typu opotřebení má množství, velikost, tvar, tvrdost a pevnost abrazivních částic a vzájemný poměr tvrdosti materiálu součásti a abrazivních částic. Míru negativních dopadů abrazivního opotřebení lze primárně zmírnit vhodnou volbou materiálu součásti a jeho povrchového

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

zpracování, dále je pak žádoucí zabránit vnikání abrazivních částic mezi pohyblivé povrchy. [1] [3]

Na obrázku 1 lze vidět schematicky znázorněný princip výše zmíněných druhů opotřebení.

Obrázek 1- Schémata principu základních druhů opotřebení [3]



Mechanismy a vlivy abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení neboli abrazi, 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. [4]

Konkrétní podoba a rozsah dopadů abrazivního opotřebení ovšem závisí na mnoha faktorech, především na mechanismu působení částice na povrch, na vlastnostech částice a materiálu součásti. Prvním dvěma jmenovaným se budu věnovat v následujících podkapitolách.

1.3 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 [5]

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

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. [5]

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 trajektorie účinku abrazivní částice na povrch křehkého materiálu bude mít blízko normálovému směru a částice vyvíjí vysoký bodový tlak, vniká do povrchových vrstev materiálu a dochází tak k narušování jeho integrity a vzniku mikrotrhlin.
- c) Únava opakovaným působením částic – opakovaným kontaktem částice působící na povrch materiálu pod úhlem blízkým devadesáti stupňům vzniká plastická deformace, částice vytlačuje materiál do stran. 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.

1.4 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 míru vlivu jednotlivých faktorů. Základní faktory tvaru můžeme rozlišovat jako mikrogeometrii, makrogeometrii a rádius výstupků. [5]

Mikrogeometrií rozumíme hladkost hran a povrchu výstupků. Jejím detailním studiem se zabývali Chruščov a Babičev. Jejich výzkum částic korundu a karborundu přinesl poznatek, že hrany a výstupky abrazivních částic jsou téměř vždy zaoblených tvarů, na rozdíl od očekávání, že budou kopírovat řezy krystalografickými rovinami. [6]

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 větší četnost výstupků a hran na povrchu zrna, a tím bude i vyšší pravděpodobnost rýhování a oddělování dalších částic z funkčního povrchu při relativním pohybu. [5]

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

1.5 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.“³

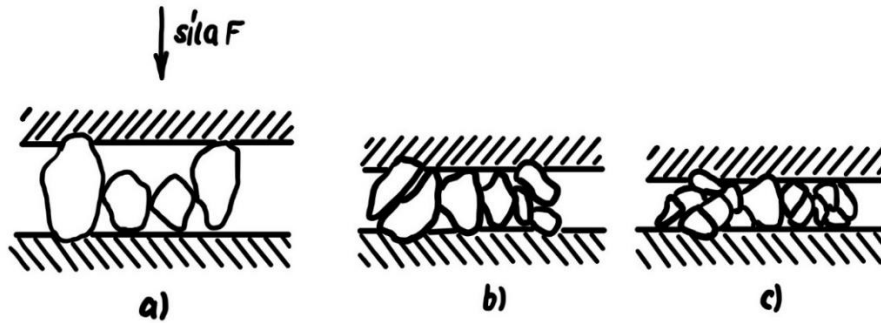
Tato kritická velikost se odvíjí od zatížení, rozměrů opotřebované plochy, od druhu použitých částic a vlastností opotřebovaného materiálu. Udává se, že průměrná kritická velikost abrazivních částic se pohybuje v rozmezí 40–125 μm . [4]

Výsledný mechanismus poškozování kovových 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 mikrorýhy na povrchu a vzniklé třísky jsou tlusté a člankovité.

³ [4] 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, kdy se částice vlivem kontaktních tlaků a zatížení abrazivní částice fragmentují, jak je schematicky znázorněno na obrázku 2. Typicky v případě mletí sypkých materiálů. Tím se kontinuálně mění jejich velikost i tvar a tím i vliv na průběh otěru.

Obrázek 2 - Fragmentace abrazivních částic [4]



„V praxi je nutné vždy počítat s širokým rozmezím velikosti abrazivních částic, přičemž rozhodující účinek mají velké částice.“⁴

1.6 Vliv poměru tvrdostí materiálu a abrazivních částí

Je obecně známo, že pro abrazivní opotřebení materiálu platí přímá úměra k přítláčné síle a délce dráhy, na které působí abrazivo na povrch opotřebovávaného materiálu, a nepřímá úměra tvrdosti 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 se zvyšováním tvrdosti opotřebovávaného materiálu. Maxima dosáhne ve chvíli, kdy platí vztah

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

Koeficient k se podle experimentů Chruščova a Tottenbauma nachází mezi 1,3 - 2,0. [6]

Závislost poměrné odolnosti ψ na poměru H_a/H_m demonstrujeme na výsledcích zkoušek tepelně zpracované nástrojové oceli s abrazivou o různých tvrdostech v tabulce 1.

⁴ [4] SUCHÁNEK, Jan. Abrazivní opotřebení. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06733-8. str.44

Tabulka 1- Závislost poměrné odolnosti proti abrazi na tvrdosti abraziva [5]

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.

Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení

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

1.7 Laboratorní zkoušení

Laboratorní zkoušení odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení lze provádět mnoha metodami. Ty přináší množství výhod, jako je relativně nízká cena a nenáročnost zkoušení, možnost zkoušení palety různých materiálů různými abrazivy v krátkém čase a jednoduché přizpůsobování parametrů opotřebení.

Je účelné tvořit podmínky zkoušení co nejpřesnější reálnému nasazení materiálu v provozu. Absence rázového zatěžování, rozdílná abraziva a neschopnost věrně napodobit komplexní mechanismus opotřebení v reálném provozu nám to ovšem značně ztěžují.

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

- Přístroje s volnými částicemi
- Přístroje s vázanými částicemi [5]

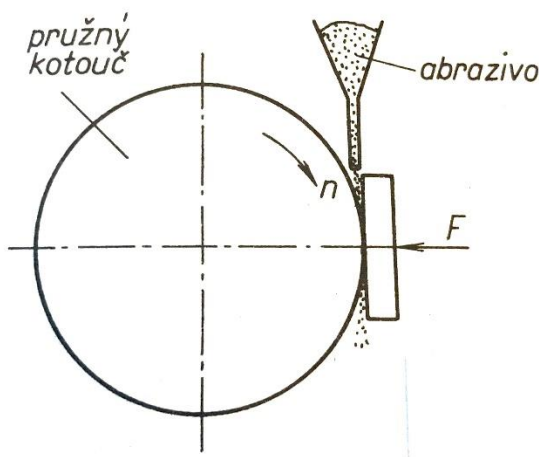
1.7.1 Přístroje s volnými částicemi

Přístroje s volnými částicemi jsou takové, kde 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, 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. [5]

Přístroje s volnými částicemi rozlišujeme na přístroje s pryžovým kotoučem, s brusnou nádobou a bubnové přístroje.

Přístroje s pryžovým kotoučem simulují abrazivní proces tak, že je abrazivo sypáno mezi rotující pryžový kotouč a vzorek zkoušeného materiálu, jak je zobrazeno na schématu na obrázku 3.

Obrázek 3 – Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [5]



Tyto přístroje obvykle umožňují nastavovat tyto parametry zkoušky:

- Obvodovou rychlost kotouče
- Abrazivo (až do velikosti 1,5 mm)
- Přítlačnou sílu
- Třecí dráhu

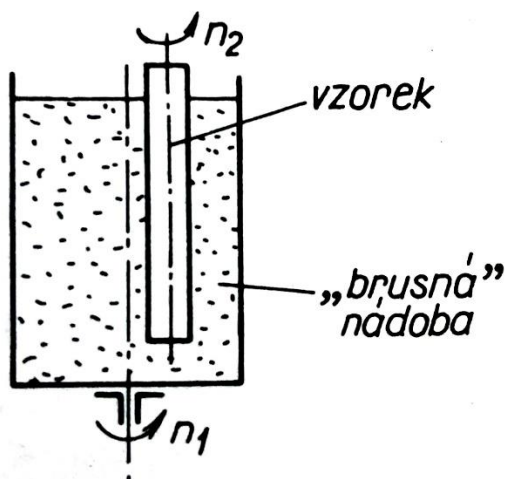
Odolnost vůči abrazivnímu opotřebení je vyhodnocována podle poměrné odolnosti etalonového materiálu zkoušeného za stejných procesních podmínek. Ta se určuje z poměru objemového opotřebení etalonového vzorku a vzorku zkoušeného materiálu. Tato zkušební metoda je normalizována podle ASTM G65 (za sucha), respektive ASTM G105 (za mokra). Příklad zkušebních parametrů podle ASTM G65 je v tabulce 2.

Tabulka 2 - Zkušební parametry podle ASTM G65 [4]

Postup	Zatížení [N]	Celkový počet otáček	Dráha [m]
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309

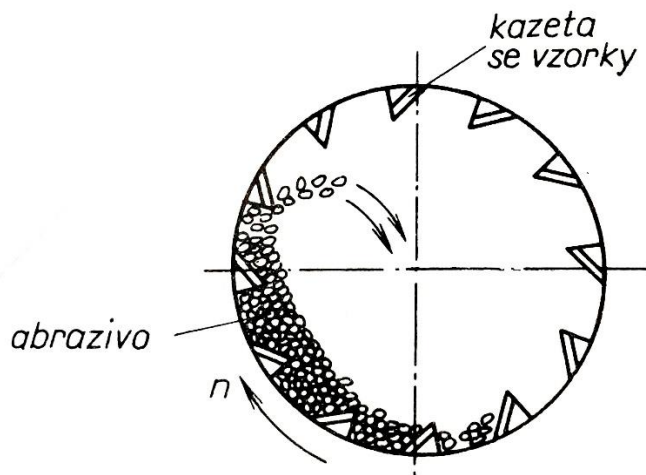
Přístroje s brusnou nádobou jsou složeny z nádoby naplněné abrazivem, v níž jsou umístěny rotující zkušební vzorky. Nádoba s abrazivem rovněž koná rotační pohyb, jak je patrné z obrázku 4. Vzájemným pohybem vzorků zkoušeného materiálu a abraziva probíhá opotřebení povrchu vzorků.

Obrázek 4 – Schéma přístroje s brusnou nádobou [5]



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 (viz. Obrázek 5) Jejich nevýhoda tkví ve vysoké časové náročnosti a omezené aplikaci výsledků do reálného provozu.

Obrázek 5 - Schéma bubnového zkoušecího přístroje [5]

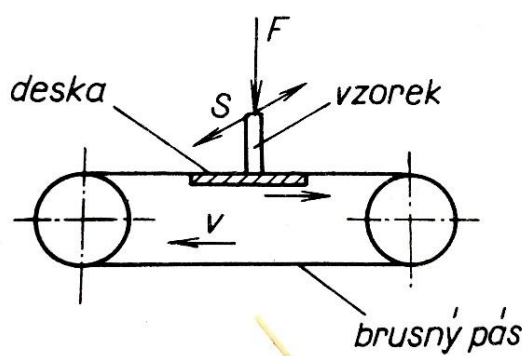


1.7.2 Přístroje s vázanými částicemi

Přístroje s vázanými částicemi mohou mít částice ve formě brusného kotouče, nebo plátna. Zásadní nevýhodou všech těchto přístrojů je zanášení brusných pláten i kotoučů, které zapříčiňuje snižování jejich abrazivity. Ta se proto musí kontrolovat etalonovými vzorky. Mimo to se používají přístroje s hrotem definovaného tvaru, které slouží k zjišťování vlastností povlaků.

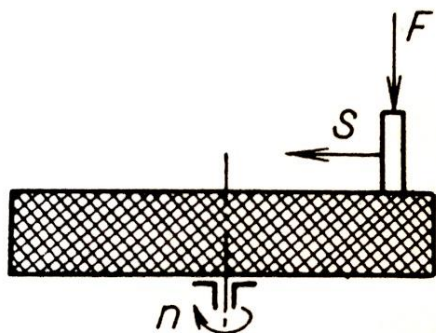
Nejčastěji využívány jsou přístroje s brusným plátnem (obr.6). Výhodami jsou spolehlivost, jednoduchost a malý rozptyl výsledků ($\pm 5\%$). Přístroje pracují rotačním pohybem, vratným přímočarým, nebo brusným pásem, který simuluje přímočarý pohyb.

Obrázek 6 - Schéma přístroje s brusným plátnem [5]



Přístroje s jedním nebo vícero brusnými kotouči (obr.7) přináší výhodu zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení i za vysokých teplot. Pokud se však brusná plocha kotouče příliš zanes, hrozí přechod opotřebení z abrazivního na adhezivně-abrazivní.

Obrázek 7 - Schéma přístroje s brusným kotoučem [5]



Přístroje s hrotem definovaného tvaru slouží ke zkoumání tribologických vlastností povlaků. Nejčastěji užívaná z těchto metod je tzv Scratch Tester, kdy je diamantový kužel či jehlan přitlačován k povrchu vzorku, který se pomalu přímočaře pohybuje. Sleduje se hodnota zatížení, kdy se v povlaku objevují první trhliny, případně celkové porušení povlaku.

1.8 Provozní zkoušení

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 přímo na dané strojní součásti nebo konstrukčním uzlu. Proto jejich výsledky nelze obecně aplikovat, mají význam jen pro konkrétní výrobní zařízení, případně pro zařízení pracující v obdobných podmínkách. [5]

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 smí ovlivňovat provozní podmínky jen nepatrně a celková doba zkoušení vzorku musí být oproti celkové životnosti dané součásti relativně krátká. [4]

Materiály odolné proti abrazivnímu opotřebení

Mimo vhodnou konstrukci a volbu přiměřených provozních podmínek je pro správnou funkčnost strojních zařízení klíčový právě výběr vhodného materiálu, který v daných podmínkách napomáhá k větší životnosti zatěžovaných strojních součástí. Při výběru vhodného materiálu je ovšem nezbytné zohledňovat i další neopomenutelné parametry. Těmi jsou například požadavky na ekonomičnost, technickou proveditelnost,

možnost správné údržby a v neposlední řadě také na ekologickou šetrnost. Jak lze z předchozích vět vydedukovat, nejedná se o jednoduchou problematiku. Konstruktor má před sebou několik možných variant řešení, která by mohla vyhovovat výše zmíněným požadavkům.

Jak bylo výše popsáno (viz podkapitola 2.4), odolnost materiálu vůči abrazivnímu opotřebení většinou roste úměrně s tvrdostí opotřebovávaného materiálu. Hlavním parametrem vhodných variant je tedy zvýšená tvrdost povrchu materiálu. Té lze docílit různými řešeními, která se liší technickým provedením. Lze použít odolnější materiál v celém rozsahu konstrukce, speciální úpravu povrchu (např. chemickotepelné zpracování či povlak), nebo na měkčí materiál nanést vrstvu odolného materiálu různými technologiemi, jako je plátování, pájení, navařování a nástřiky speciálními materiály. Tyto způsoby materiálové ochrany před abrazivním opotřebením blíže přiblížím v následujících podkapitolách.

1.9 Konstrukční materiály

K dosažení zvýšené ochrany před abrazivním opotřebením je příhodné použít pro konstrukce oceli a litiny s vylepšenými vlastnostmi pomocí procesů legování a tepelného zpracování. Se zlepšením odolnosti proti abrazi přináší tyto úpravy množství dalších výhod. Například lepší pevnost zušlechtnuté oceli umožňuje dimenzovat menší průřezy částí konstrukcí než pro nezpracovanou ocel. Tím lze dosáhnout hmotnostní úspory.

1.9.1 Tepelně zpracované oceli

K dosažení zvýšené tvrdosti a pevnosti, od kterých se odvíjí odolnost oceli vůči abrazivnímu opotřebení, je možno využít tepelného zpracování. Záměrem je docílit změnu struktury, která definuje základní mechanické vlastnosti oceli. Pro dosažení větší tvrdosti a pevnosti se používá tepelné zpracování, které podstatně brzdí nebo zamezuje průběhu difuze, jež má určující vliv na dosažení rovnovážného stavu. Tyto druhy tepelného zpracování jsou kalení a popouštění.

Kalení je proces, při kterém se v oceli s minimálním obsahem uhlíku 0,3% zahřáté nad kalicí teplotu vytvoří struktura nestabilního austenitu. Prudkým ochlazením nadkritickou rychlostí se potlačí vznik měkkých fází feritu a perlitu a dojde k přeměně austenitu na bainit, nebo na velmi tvrdý a křehký martenzit. Tvrdost martenzitické struktury stoupá s obsahem uhlíku, ale po překročení 0,8 % C již výrazně nestoupá.

Zakalená ocel s martenzitickou strukturou má sice velkou tvrdost, je ale rovněž velmi křehká a disponuje silným vnitřním pnutím. V tomto stavu je její použití v konstrukcích velmi ojedinelé, používá se převážně pro nástroje. Pro širší použití je potřeba její křehkost snížit dalším tepelným procesem, kterým je popouštění.

Popouštění se provádí ohřevem na popouštěcí teplotu a následným pomalým chladnutím. Pokud popouštěcí teplota nepřesáhne 200 °C, tvrdost klesne pouze nepatrně, zatímco křehkost se výrazně sníží. Při překročení 200 °C dojde k úplnému rozpadu martenzitu na velmi jemnou strukturu tvořenou feritem a cementitem. Tato struktura disponuje dobrou pevností, houževnatostí a určitou mírou odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení.

Kombinaci kalení a popouštění se souhrnně říká **zušlechťování**. Zušlechtěné oceli nemají tak vysokou tvrdost, výrazně se ale zvyšuje jejich pevnost a vrubová houževnatost.

V některých případech, typicky u součástí vystavených opotřebení, je vyžadována vysoká houževnatost a zároveň vysoká povrchová tvrdost. Ideálním výsledkem je pak získání dobré odolnosti povrchu proti opotřebení a zároveň dobrou odolnost jádra součásti proti rázovitému namáhání. K dosahování těchto vlastností slouží metoda **povrchového kalení**, pro kterou je vhodné použití uhlíkových ocelí s obsahem 0,45 – 0,60 % C, které se vyznačují kalitelností na vysokou tvrdost. Povrchové kalení se provádí ohřevem plamenem, kdy se dosahuje hloubky prokalení do 6 mm, nebo indukčním ohřevem, který umožňuje prokalit silnější vrstvu povrchu.

Závislost odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení na jeho tepelném zpracování lze demonstrovat na experimentu, který provedli Votava, Černý a Filípek z Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně. Vzorokly z oceli 14 260 byly tepelně zpracovány a podrobeny laboratorní zkoušce na brusném plátně a provozní zkoušce na orebním tělese. V tabulce 3 můžeme vidět průměrné hmotnostní opotřebení při zkoušce na brusném plátně. Kalený vzorek vykazuje více než o třetinu menší úbytek než materiál žíhaný naměkko. [7]

Tabulka 3 - Závislost odolnosti proti abrazi na tepelném zpracování [7]

Číslo měření	Etalon 12014.21	Ocel 14 260			
		<i>Na měkko</i>	<i>Normalizace</i>	<i>Zušlechtěno</i>	<i>Kaleno</i>
1	204	189	179	163	110
2	252	213	204	171	123
3	254	220	182	168	122
4	228	208	200	167	119
5	235	224	185	170	126
Průměr	235	211	190	168	120
Pravděp. chyba	6	4	4	1	2

1.9.2 Legované oceli

Legováním rozumíme metalurgický proces zlepšování mechanických vlastností materiálu přidáváním příměsí – legujících prvků. Rozlišujeme oceli nízkolegované (do 4 %

obsahu legur), středně legované (5-10 % obsahu legur) a vysocelegované (nad 10 % legur). [8]

Legující prvky, které pomáhají zlepšování vlastností oceli, aby se jí zvýšila odolnost proti abrazivnímu opotřebení, jsou:

- Mangan (Mn) – zvyšuje prokalitelnost, pevnost, aniž by zhoršoval plasticitu, zvyšuje tepelnou roztažnost
- Chrom (Cr) – zvyšuje pevnost a prokalitelnost, ve vyšším obsahu i odolnost proti korozi a tvoření okují
- Nikl (Ni) – zjemňuje krystalickou strukturu, zvyšuje mez kluzu a v kombinaci s Cr zvyšuje prokalitelnost a houževnatost
- Molybden (Mo) – v kombinaci s Cr zvyšuje prokalitelnost, snižuje popouštěcí křehkost, má schopnost tvořit karbidy
- Vanad (V) – zvyšuje odolnost proti opotřebení, napomáhá k růstu zrn
- Wolfram (W) – silně karbidotvorný, zvyšuje tvrdost, zlepšuje prokalitelnost a brzdí růst zrn
- Křemík (Si) – v kombinaci s Mn napomáhá k prokalitelnosti, samostatně zvyšuje odolnost proti oxidaci a žáruvzdornost
- Bór (B) – v podeutektoidních ocelích zvyšuje prokalitelnost, v austenitických zvyšuje pevnost za vyšších teplot
- Kobalt (Co) – zvyšuje tvrdost a odolnost proti popouštění
- Niob (Nb), Tantal (Ta) – vyskytují se společně, jsou silně karbidotvorné [8]

Nízkolegovaným ocelím přidané prvky přímo nenapomáhají k odolnosti v podmínkách s intenzivním abrazivním opotřebením, mohou však být nápomocné pro zlepšování prokalitelnosti. Z nízkolegovaných ocelí u zkoušek odolnosti nejlépe obstojí mangan-křemíkové nebo chromové oceli, ovšem až po zakalení, a tedy vzrůstem tvrdosti mikrostruktury. I tak ale nedosahují uspokojivých hodnot pro podmínky intenzivního abrazivního opotřebením. [4]

Změna nastává až u více legovaných ocelí se strukturou martenzitu a metastabilního austenitu, kde je vyšší obsah legur tvořících ve struktuře karbidy. Ty výrazně zvyšují odolnost proti abrazivnímu opotřebením, ale stále je nutné materiál i tepelně zpracovat.

Dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebením pak vykazují austenitické manganové oceli, o obsahu 11-14 % Mn a 1,0-1,3 % C (v poměru Mn/C 10 : 1). Jsou velmi houževnaté a mají schopnost dobrého zpevnění tvářením za studena, která zlepšuje abrazivzdornost. Tyto vlastnosti z nich dělají vhodné řešení pro podmínky abraze s výrazným dynamickým,

rázovitým zatěžováním. Při kluzné abrazi je ale její odolnost srovnatelná s uhlíkovými oceli obdobné tvrdosti, které jsou výrazně levnější. Proto nedává ekonomický smysl jejich použití v podmínkách bez dynamických rázů. [4]

1.9.3 Litiny

Litiny s lupínkovým grafitem mají při své struktuře feritu, ferito-perlitu nebo perlitu velmi malou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Zvýšit ji lze tepelným zpracováním, kde je snaha dosáhnout martenzitické nebo bainitické matrice. Problém ale přináší další složka – grafit. Lupínky grafitu vyloučené ve struktuře totiž koncentrují napětí, a i sám o sobě má grafit velmi malou odolnost proti abrazi. [4]

Litiny s kuličkovým grafitem mají díky tvrdší, martenzitické struktuře obecně lepší odolnost. Je také možné je dále tepelně zpracovávat, jakožto kalit, popouštět a povrchově kalit. Experimentálně bylo zjištěno, že nezávisle na typu matrice klesá odolnost vůči abrazi s rostoucím počtem grafitických částic. Jejich počet roste se zmenšující se tloušťkou stěny odlitku. [4]

Tvrzené litiny, tedy takové, kterým byla pomocí laseru, plazmy atd. přetavena povrchová vrstva, dosahují lepší odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. U litin s nízkým zastoupením Si totiž při přetavení nastává precipitace karbidů a významně roste tvrdost povrchu těchto litin. Obdobně pomáhá použití chladítek. [4]

Bílé litiny s vyšším obsahem uhlíku a nižším obsahem křemíku se používají pro odlitky vystavené abrazivnímu opotřebení. Hlavními fázemi jejich struktury je totiž tvrdý karbid železa Fe_3C (cementit) a poměrně měkký ferit či perlit. Výhodou jejich použití je hlavně nízká cena. Bílé litiny se také legují niklem (3-5 %) a chromem (1-3,5 %), u kterých je následně možné díky popuštění dosáhnout martenzitické struktury. Tyto litiny jsou výrazně odolnější proti abrazivnímu opotřebení. [4]

Bílé chromové litiny s obsahem chromu 11-35 % dosahují nejlepší odolnosti, protože chrom tvoří komplexní karbidy – trigonální $(Fe,Cr)_7C_3$ a kubický $(Fe,Cr)_{23}C_6$. Tyto komplexní karbidy jsou tvrdší, než cementit. Proto se celková odolnost zvyšuje. Bílé chromové litiny se dále legují prvky zlepšujícími jejich prokalitelnost (Mo, Ni, Cu). [4]

1.9.4 Jemnozrnné oceli termomechanicky zpracované

V poslední době se výrazně rozšířilo použití vysokopevnostních plechů s dobrou oteruvzdorností. Toho se docílí mechanicko-tepelným zpracováním – tj. kalení a vysokoteplotní popuštění ihned po válcování za tepla. Výsledkem je jemnozrnná struktura, kterou tvoří popuštěný martenzit. Tyto plechy tedy disponují vysokou tvrdostí a houževnatostí. Navíc se tyto oceli legují Nb a B, které zjemňují zrna, zpomalují fázovou transformaci a pomáhají precipitačně vytvrzovat. Na trh je dodáváno mnoho variant těchto

plechů pod různými obchodními názvy a mají širokou působnost v průmyslové výrobě. V tabulce 4 je uvedeno několik příkladů s hodnotami dosahovaných tvrdostí. Odolnost proti abrazi u nich roste spolu s dosahovanou tvrdostí. [4]

Tabulka 4 - Vysokopevnostní otěruvzdorné plechy [4]

Označení	Tvrdost (HB)	Označení	Tvrdost (HB)	Označení	Tvrdost (HB)	Označení	Tvrdost (HB)
HARDOX 400	370-430	XAR 400	360-440	Dillidur 325L	240-280	Durostat 400	360-440
HARDOX 500	450-540	XAR 500	450-530	Dillidur 400V	360-440	Fora 400	360-440
HARDOX 600	570-640	XAR 600	Min.550	Dillidur 500V	450-530	Brinar 500Cr	470

Poznámka: HARDOX je ochranná známka výrobce SSAB (Švédsko), XAR je o.z. Thyssenkrup (Německo), Dillidur je o.z. Dillinger (Německo), Durostat je o.z. Voestalpine (Německo), Fora je o.z. Champak Industries (Indie), Brinar je o.z. Salzgitter (Německo).

1.10 Speciální povrchové úpravy

Další možností, jak dosáhnou zvýšené odolnosti povrchu proti opotřebení abrazí je úprava povrchu. Již bylo zmíněno, že odolnost materiálů proti abrazivnímu opotřebení zpravidla roste se zvyšující se tvrdostí materiálu. Úpravy povrchu za účelem zlepšení odolnosti tedy budou směřovat za zvýšením tvrdosti při zachování houževnatosti jádra.

1.10.1 Chemicko-tepelně upravené povrchy

Při chemicko-tepelných úpravách jsou zlepšovány mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu nasycováním povrchových vrstev difuzními procesy za vysokých teplot. Nasycená vrstva získává odlišné chemické složení a mikrostrukturu než zbytek materiálu. Sytit povrch a tím upravovat jeho vlastnosti lze uhlíkem (cementace), dusíkem (nitridace), bórem (bórování), chromem (difuzní chromování), případně kombinací některých prvků.

1.10.1.1 Cementování

Cementování se preferuje u ocelí s nízkým obsahem uhlíku, jejichž špatná prokalitelnost zamezuje povrchové kalení. Vzhledem k faktu, že je hodnota difuzního součinitele úměrná teplotě, je žádoucí provádět cementaci za co nejvyšší teploty. Probíhá tedy nad teplotou A_{c3}

v oblasti austenitu. Aby se však eliminovalo zhrubnutí zrna a přesycení povrchu uhlíkem, omezuje se teplota cementace na rozmezí 850-950 °C a tloušťku cementační vrstvy na 2 mm. Nasycený povrch se dále kalí, čímž nabývá hodnoty tvrdosti 800-900 HV. Takto tvrdý, cementovaný povrch velmi dobře odolává abrazivnímu opotřebení. S ubývajícím materiálem v důsledku opotřebení ale obsah uhlíku a s ním tvrdost klesá. Rozsah opotřebení tak roste progresivně. [4]

1.10.1.2 Nitridování

Sycení povrchu dusíkem mechanismem difuze probíhá buďto v plynném prostředí – směsi vodíku a dusíku, nebo disociovaného čpavku. Teplota se při nitridování pohybuje mezi 450 a 600 °C a tloušťka nitridační vrstvy nepřesahuje 0,65 mm. Zároveň prosycení trvá výrazně delší dobu než u cementace. Po nitridaci již nenásleduje kalení. U legovaných ocelí Cr, Mo a Al dosahuje tvrdost nitridační vrstvy až 1200 HV, ale odolnost proti abrazi je srovnatelná s cementovanými oceli. Výhodou je možnost nitridovat nízko i vysoko legované oceli (konstrukční i nástrojové) o středním obsahu uhlíku. Jediným nutným předpokladem je obsah prvků schopných tvořit stabilní a tvrdé nitridy (V, Al, Mo). [4]

1.10.1.3 Bórování

Při sycení povrchu oceli borem dochází k vytváření jednofázové nebo dvoufázové vrstvy. Jelikož vnější složka dvoufázové vrstvy, tvořená FeB, je výrazně tvrdší ale i křehčí a má tak tendenci k praskání, je žádoucí tvorba pouze jednofázové vrstvy tvořené Fe₂B. Povrch nabórované oceli se vyznačuje vysokou tvrdostí a u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí zubovitým propojením povrchové vrstvy se základním materiálem. Teplota se při bórování pohybuje od 815 do 980 °C a tloušťka se pro podmínky abrazivního opotřebení doporučuje od 0,025 do 0,140 mm. Vrstva tlustší než 0,125 mm je náchylná k praskání a vydrolování. Bórováním se dosahuje tvrdosti povrchu 1600-2100 HV u uhlíkových ocelí. Lze ale bórovat i nízkolegované, korozivzdorné a nástrojové oceli, tvárnou litinu i litinu s lupénkovým grafitem, slitiny Co, Ni a Ti a slituté karbidy s minimálním obsahem pojiva 6 %. Škodí přísady Al a Si. Povrchy ošetřené bórováním vykazují lepší odolnost proti abraze než povrchy cementované či nitridované. [4]

Dalšími procesy chemicko-tepelné úpravy povrchu, jako je difuzní chromování nebo vanadování, se sice dá dosáhnout tvrdosti až 3000 HV, ale vrstva takto vzniklých povrchových karbidů je tak malá (5-12 μm), že se v praxi abrazivního opotřebení neaplikují. [4]

1.10.2 Povlakování

Povlakování je nanášení tenkých vrstev látek rozdílného chemického složení za účelem změny vlastností povrchu. Povlakování se provádí různými způsoby a materiály za

rozdílnými účely. Pro zlepšení odolnosti povrchu proti abrazivnímu opotřebení se nanáší PVD a CVD povlaky.

- PVD (physical vapour deposition) – nanášení odpařením z pevné fáze
- CVD (chemical vapour deposition) – nanášení z chemických par

PVD a CVD povlakování je povrchová úprava převážně kovových součástí povlakem o tloušťce 1-10 μm a tvrdostí 1000-4000 HV. Povlaky jsou tvořeny karbidy, nitridy či karbonitridy o vysoké tvrdosti (např. TiC, ZrC, VC, TiCN apod.) Probíhá ve vakuové komoře technologií pulzního magnetronového naprašování. Zachovává tak maximální hladkost povrchu. Jejich použití je kvůli malé tloušťce a vysokým vnitřním pnutím (v povlacích) velmi omezené. V podmínkách abraze s dynamickým zatěžováním je jejich použití téměř vyloučeno. [9]

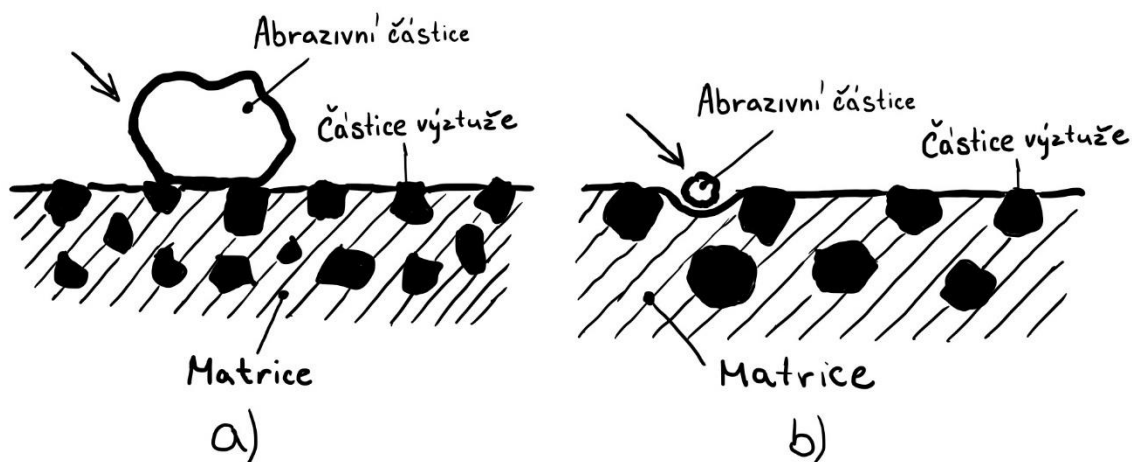
1.11 Plátování, navařování, nástřiky speciálními materiály

Nejširší skupinu možných řešení ochrany proti abrazivnímu opotřebení tvoří ta řešení, kdy se na materiál konstrukce s nízkou odolností proti abrazi přidá vrstva odolného materiálu. Dosáhnout toho lze různými technologiemi - od šroubování, připájení či lepení plátů, po navaření či nástřik. Každá z těchto metod se hodí pro různé skupiny materiálů, podmínky provozu a styl konstrukce strojního zařízení, pro které jsou tyto úpravy uvažovány.

Většina těchto materiálů má společný charakter kompozitu. Kompozit je materiál složený ze dvou či více chemicky odlišných složek (fází). Nespojité, 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 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 pak na vláknové a částicové kompozity. [4]

Pro podmínky intenzivního abrazivního opotřebení jsou zpravidla využívány kompozity částicové s různými typy matic. Základní tezí pro správnou volbu kompozitu je, že pro vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení musí být velikost částic tvrdé výztuže větší, než je velikost abrazivních částic (Obr.8a). Pokud tato podmínka není splněna, je opotřebovávána samostatně matrice kompozitu (Obr.8b) a kýžený výsledek vysoké odolnosti není naplněn.

Obrázek 8 - Vztah velikosti částic výplně kompozitu a abrazivních částic



Mimoto závisí odolnost kompozitu proti abrazivnímu opotřebení na dalších faktorech, například objemový podíl tvrdé výztuže, její tvrdost, adheze mezi výztuží a maticí a jiné.

1.11.1 Materiály pro plátování

Plátováním rozumíme připojování souvislého plátu odolného materiálu, vyrobeného zvlášť, k základnímu, konstrukčnímu materiálu pomocí jedné z možných technologií (šroubování, pájení, lepení atd.)

1.11.1.1 Keramické materiály

Keramika je v poslední době stále častěji využívaným materiálem pro ochranu součástí strojních zařízení před abrazivním opotřebením. Často se vyskytuje v důlním průmyslu při zpracovávání a dopravě nerostných surovin. Keramické materiály se vyznačují především svojí vysokou tvrdostí, odolností proti vlivům agresivních chemických látek a schopností udržovat si dobré mechanické vlastnosti i za vysokých teplot. Nevýhody použití keramických materiálů jsou jejich vysoká cena spojená se složitou výrobou a především křehkost. [4]

Keramické materiály jsou chemickými sloučeninami oxidů, karbidů, nitridů a boridů, které se vyznačují vysokými teplotami tavení, velmi jemnou mikrostrukturou, která je úzce spřažena s odolností proti otěru a velkou tvrdostí se zachovanou dobrou houževnatostí (v porovnání s ostatními keramickými materiály). [4]

Dělit keramické materiály používané v technické praxi lze podle chemického složení, a to na:

- Oxidovou keramiku – tvořena jednoduchými oxidy kovů (např. Al_2O_3 , ZrO_2 atd.)

- Neoxidovou keramiku – tvořena širokým spektrem nitridů, karbidů a boridů, nejčastěji karbidy a nitridy křemíku, bóru a hliníku
- Kompozitní keramiku – tvořena vícefázovými systémy [4]

Nejčastěji využívané jsou dnes oxid hlinitý, zirkoničitý a keramika na bázi karbidu křemíku. Například firma QiSHUAI nabízí abrazi odolné pláty z korundové, nebo křemíkonitridové keramiky (Si_3N_4). Ty jsou velmi odolné vůči abrazivnímu opotřebení i za vysokých teplot (použití do 1300°C), mají velmi malou tepelnou roztažnost a malou hustotu. Nevýhodou vysoké křehkosti, a tedy náchylnost k fatálním křehkým lomům tato firma úspěšně řeší zakomponováním keramických segmentů do kompozitních plátů, kde je matrice tvořena vulkanizovanou gumou (Obr.9). Ta pojímá rázy nepravidelného zatěžování a významně utlumuje hluk. Tyto kompozitní pláty umožňují montáž šroubováním, nebo lepením, a díky mozaikovému vzoru a pružnosti gumové matrice umožňují částečnou přizpůsobivost k tvaru plochy, na kterou jsou umístěovány. [10]

Obrázek 9 - Keramické destičky v matrici z vulkanizované gumy [10]



Firma Castolin Eutectic nabízí produkt vytvrzující dvousložkové pasty MeCaWear, která je tvořena kompozitem o polymerové matrici, karbidů hliníku a křemíku jako tvrdé fáze a karbonových vláken. Po vytvrzení vytváří povlak s dobrou odolností proti otěru s širokou škálou použití. Forma pasty umožňuje nanášení na tvarově složité součásti a obnovu těžko přístupných míst. [11]

1.11.1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou kompozitní materiály vyráběné technologií práškové metalurgie. Tvrdá fáze kompozitu, výztuž, je tvořena karbidy wolframu, titanu, niobu apod. Matrice kompozitu je tvořena kovem, nejčastěji kobaltem nebo niklem. Vyznačují se značnou

tvrdostí a houževnatostí, která roste se zastoupením kobaltu, a účinným vzdorováním plastické deformaci. Jsou lehké a jejich výroba umožňuje variabilitu parametrů, jako je obsahový poměr výztuže a matrice, velikost částic tvrdé fáze atd. [4]

Slinuté karbidy se instalují v podobě destiček, které mohou trpět křehkými lomy způsobenými rázy. Proto se často kombinují s polymerovým podkladem, který rázy pohlcuje. [4]

1.11.1.3 Plechy s otěruvzdorným návarem

Plátování lze provádět i montáží plechů s otěruvzdorným návarem. Tato varianta může být realizována tam, kde by bylo ideální variantou použití návaru, ale není přípustné tepelné ovlivnění základního konstrukčního materiálu, nebo základní materiál svými vlastnostmi neumožňuje navaření provést (např. špatná svařitelnost). O technologii navařování a v ní používaných materiálech budu pokračovat v následující kapitole.

1.11.2 Materiály pro navařování

Navařování je způsob ochrany, kdy je na základní, nedostatečně odolný materiál navařena vrstva návarové slitiny, která na povrch součásti přináší kýžené vlastnosti zlepšující odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Navařováním se nezlepšuje jen odolnost nových součástí, ale také se hojně využívá pro obnovu již opotřebovaných funkčních ploch. [3]

Navařovat součásti vystavené intenzivnímu abrazivnímu opotřebení je možné v podstatě všemi dostupnými metodami svařování. Nejčastěji se navařuje plamenem nebo elektrickým obloukem, ale v poslední době se velmi rozmáhá navařování pomocí laserového paprsku nebo plazmy. Zásadní vliv na výsledné vlastnosti má ale návarová slitina. Při její volbě je nadmíru důležité znát chemické složení základního materiálu a podmínky 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. Vidíme, že k úspěšnému aplikování návaru a dosažení očekávaných vlastností a trvanlivosti je třeba dbát mnoha zákonitostí. [4]

Návarů pro zlepšování odolnosti proti opotřebení je na trhu celá řada. Tyto se liší chemickými složeními, doporučeným způsobem navařování i vhodností do specifických podmínek abrazivního opotřebení. Norma ČSN EN 14700 dělí návarové slitiny podle chemického složení a doporučených použití. Slitiny určené pro podmínky abrazivního opotřebení jsou v tabulce v příloze 1.

Dawson a kol. rozdělili návarové materiály podle chemického složení, mechanických charakteristik a příhodných aplikací do sedmi skupin (Příloha 2 - Rozdělení návarů dle chem.

složení a aplikace). Z ní vyplývá, že pro použití v podmínkách intenzivního abrazivního opotřebení mají nejlepší vlastnosti a jsou k použití vhodné ty návary, které obsahují karbidy wolframu, chromu a niobu. [12]

Odolnost karbidového návaru závisí na velikosti a tvrdosti primárních karbidů a na pevnosti matrice. Lepší otěruvzdornosti dosahují návary s karbidy větších rozměrů, které lépe odolávají lomu. [4]

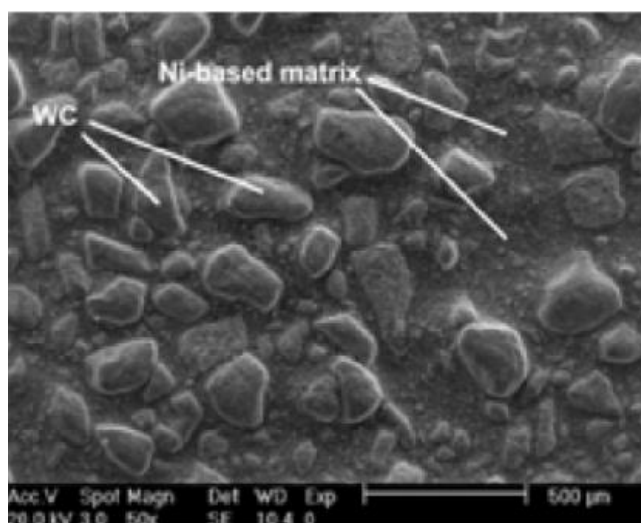
Jak již bylo výše zmíněno, první vrstva návaru se se základním materiálem promísí a zpravidla tak nedosahuje potřebných vlastností. Buchely a kol. zkoušeli odolnost různých dostupných návarů laboratorní metodou ASTM G65, a to jedno i více vrstevých. Výsledky zkoušení přinesly zjištění, že u většiny návarů odolnost po navaření pouze jedné vrstvy výrazně klesá. Pouze návar s vysokým obsahem karbidů wolframu (Návar 2 v tabulce 5) přináší velmi vysokou odolnost již v jedné vrstvě. [13]

Tabulka 5 - Závislost tvrdosti a objemového otěru návarů na počtu vrstev [13]

Návar	Směrné chemické složení (%)	Počet vrstev	Tvrdost [HRC]	Objemový otěr [mm ³]
Návar 1	4,3C, 35Cr, 1,1Mn	1	55,6	37,5
		2	57,5	19,5
Návar 2	4,5C, 26W, 2,1Mn	1	58,3	22,8
		1	54,6	49,4
Návar 3	4,2C, 23Cr, 3,5W, 5,4Nb, 4,1Mo, 1,5Si, 0,8V	2	58,9	35,7
		3	60,2	18,8

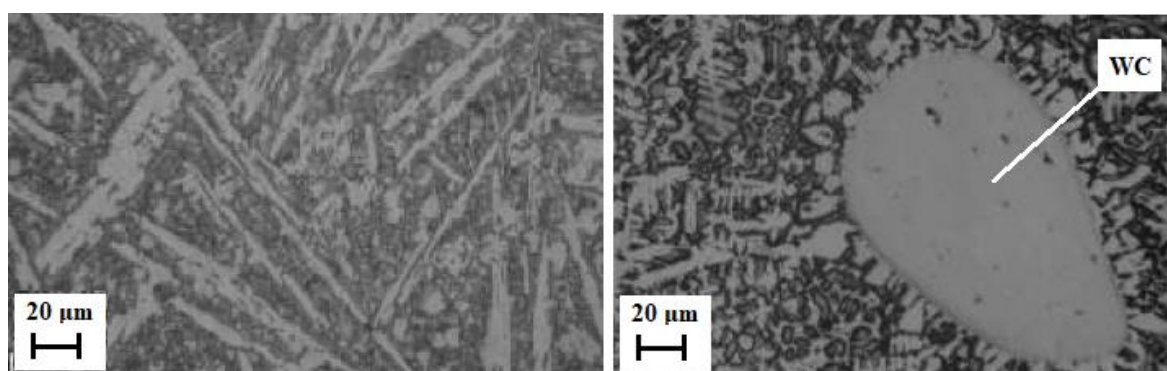
Příklad struktury karbidového návaru vidíme na obrázku 10. Karbidy wolframu úhlovitých tvarů jsou zde zality v niklové matrici.

Obrázek 10 - Struktura návaru s WC v niklové matrici [15]



Návary odolné abrazi na bázi karbidu wolframu dosahují velmi dobrých výsledků, ale kvůli nákladnosti výroby WC je jejich cena vysoká. To vedlo v poslední době americké metalurgie k vývoji abrazi odolných návarů, které by bez obsahu WC dosahovaly podobné úspěšnosti. Povedlo se jim vytvořit materiál na bázi železa legovaný < 5 % C, < 2,0 % Si, < 5,0 % Mn, < 20,0 % Cr, < 10,0 % Mo, < 10,0 % Nb, < 10,0 % W, < 5,0 % B. Při těchto specifických podílech dosáhli vytvoření nanostruktury. Mezi nanokrystaly slitinových kovů se v průběhu chladnutí vyloučí karbidy boru o velikosti odpovídající zrnům slitiny (jednotky nanometrů). Rozdíl velikosti boro karbidu v nanostrukturním návaru EnDOtec DO390N (71 HRC) a wolfram karbidu ve wolframkarbidovém návaru EnDOtec DO*48 (65 HRC) od firmy Castolin Eutectic můžeme vidět na obrázku 11. [14]

Obrázek 11 - Porovnání velikosti nanokrystalu BC a krystalu WC [14]



Návary tvořící vrstvu nanokrystalické struktury dosahují obdobné nebo lepší tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, jako návary na bázi wolfram karbidu v železné nebo niklové matici. Jsou ale úspornější z důvodu nižší výrobní ceny a nižší hustoty. [14]

Klimpel porovnával odolnost proti abrazivnímu opotřebení metodou ASTM G65 nanostrukturního návaru EnDOtec DO390N a wolframkarbidového návaru EnDOtec DO*48 od firmy Castolin Eutectic. Jako etalonový materiál byl použit vysokopevnostní plech HARDOX 400. Výsledky lze porovnat v tabulce 6. [14]

Tabulka 6 - Porovnání relativní odolnosti proti abrazi nanostrukturního a wolframkarbidového návaru [14]

Materiál	Průměrný objemový otěr (mm ³)	Relativní odolnost proti abrazi
HARDOX 400	185,7306	1,00
DO48	10,96	16,94
DO390N	12,90	14,40

1.11.3 Žárové nástřiky

Žárové stříkání neboli metalizace je tepelně mechanický proces, při kterém se jemné, natavené částice kovu či nekovu (např. karbidů) transportují s vysokou kinetickou energií na přehřátý povrch základního materiálu. Tam musí mechanicky zakotvit a po ztuhnutí vytváří povlak – vrstvu materiálu lepších vlastností. Tloušťka nastříkané vrstvy materiálu může být od 50 μm do 2-3 mm. Žárové nástřiky lze použít u celé řady kovových i nekovových materiálů pro dodání různých vlastností, které základní materiál postrádá. Velkou výhodou je malý rozsah tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. [3]

Pro zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení se většinou používají nástřiky tvořící kompozitní vrstvu. Pro aplikaci se používají speciální hořáky spalující acetylen a kyslík. Prášek je unášen proudem plynů do trysky, čímž získává svou kinetickou energii a je nataven průchodem skrze plamen. Další metody aplikace jsou nanášení pomocí plazmy, laseru, detonační nástřik, HVOF a jiné. [4]

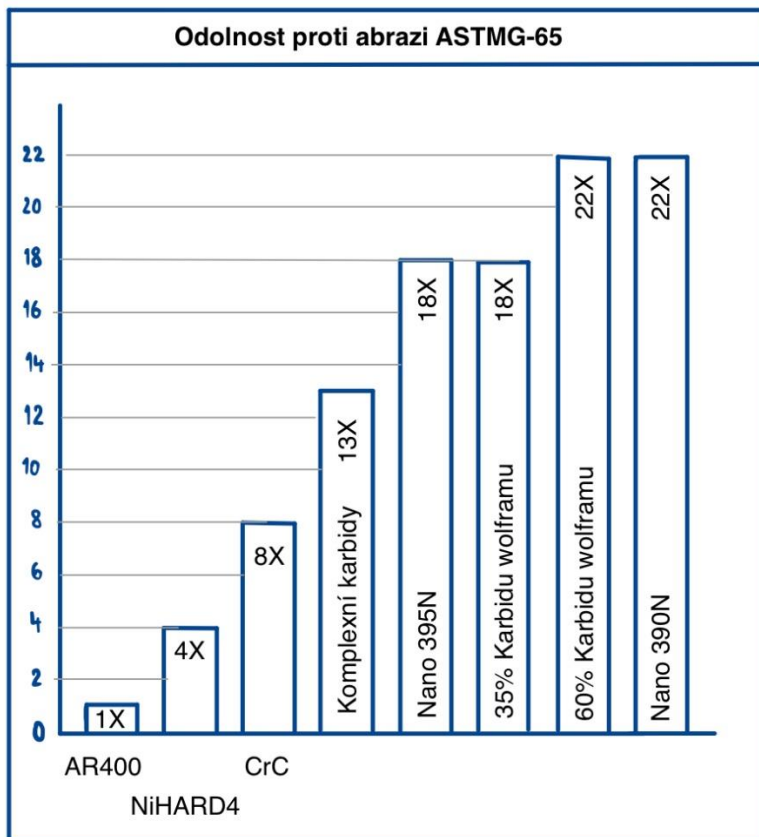
Prášek bývá složen z částic kovu (s podílem 20-30 %), např. NiCrBSi pro stavované povlaky a navařování plazmou, které se nataví a vytvoří matici pro částičky karbidů wolframu, chromu a titanu, které se v ní ukotví. Vrstvy nanášené žárovým nástřikem vykazují výborné vlastnosti v oblasti nejen abrazivního opotřebení. Je však důležité ovládnout správnou techniku aplikace a dodržet všechny potřebné parametry, jinak hrozí odlupování nástřiku. [3]

Volba vhodného materiálu

Jak je psáno v předchozí kapitole, technologických možností řešení materiálové ochrany je k dispozici mnoho. Pro konkrétní případy mohou přicházet v úvahu různá z nich. Z technologického hlediska bude vždy vítězná varianta s nejlepší odolností. Na protější straně však leží hledisko ekonomické. Při volbě výsledného materiálu je nezbytné hledat rovnováhu.

Pro představu v grafu na obrázku 12 vidíme porovnání několika návarových materiálů firmy Castolin Eutectic zkoušených metodou ASTM G65. Etalonem byl plech z abrazivzdorné oceli AR400 o tvrdosti 350-444 HB. Z grafu vidíme, že návar tvořený komplexními karbidy má 13x větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení než etalonový plech. Návar tvořený 60 % wolfram karbidu dokonce 22x. [15]

Obrázek 12 - Graf abrazivní odolnosti různých materiálů [15]



Před konstruktérem může kupříkladu být rozhodnutí, zda použít pouze otěruvzdorný plech AR400 o tloušťce 50 mm, nebo použít konstrukční ocel o tloušťce 20 mm a navařit 6 mm návaru komplexních karbidů, nebo použít plech o tloušťce 8 mm a navařit 4 mm wolfram karbidu v niklové matrici. Kvalitní návar wolfram karbidu bude sice dražší, ale úspora základního materiálu může tyto výdaje vykompenzovat.

Podobný přístup je potřeba aplikovat na každé rozhodnutí při návrhu součástí a strojních zařízení.

Závěr

Analýzou shromážděných poznatků jsem došel k závěru, že daná problematika opotřebení, především intenzivního abrazivního opotřebení a materiálů, které je vhodné využít pro ochranu strojních zařízení před následky tohoto typu opotřebení, je velmi komplexní a rozsáhlá. Na technickou stránku zkoumané problematiky nelze pohlížet pouze černobíle. Pro zajištění výroby a provozu spolehlivých strojů s uspokojivou životností je třeba přistupovat k jejich návrhu komplexně a vidět je v souvislostech. Nelze se zaměřit na řešení pouze jednoho technického problému, například abrazivního opotřebení, protože mechanismy namáhání a opotřebení se vždy vyskytují v kombinaci. V laboratorních podmínkách nikdy nedosáhneme dokonalé variability podmínek a nedokážeme věrohodně simulovat kombinovaná namáhání vzorků.

Pro drtivou většinu případů, se kterými se lze v praxi setkat, neexistuje jedno optimální řešení. Vždy se tak budeme muset potýkat s problémy, které nelze předvídat a předem eliminovat. Vždy může nastat situace, během které se provozní podmínky náhle změní a na tyto změny musí technici pružně zareagovat.

Díky pokroku ve zkoumání materiálů a jejich vlastností máme mnoho technických možností, jak se s problémem opotřebení potýkat. Pro zlepšování efektivity strojní výroby a neustálé zlepšování jakosti produktů je ale potřeba udržovat si rozhled, doplňovat si znalosti o nově objevené poznatky z materiálového inženýrství a tribologie a při navrhování technologických postupů následovat ekonomickou politiku podniku.

Seznam použitých zdrojů

- [1] POŠTA, J. *Provozní schopnost strojů. [Učební texty]*. ČZU, TF, Praha, 2002, ISBN 80-213-0966-0
- [2] LEVINSKÝ, Otto, Irena ŠELEPOVÁ a Josef ŽÁK. *Technický naučný slovník 3. díl. 2. dopl.vyd.* Praha 1: SNTL, 1982. ISBN 04-001-83
- [3] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Ivo HLA VATÝ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
- [4] SUCHÁNEK, Jan. *Abrazivní opotřebení*. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06733-8.
- [5] VOCEL, Milan, Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976.
- [6] CHRUŠČOV, M.M. – BABIČEV, M.A. *Abrazivnoje Iznašivánije*, Moskva, Nauka, 1970.
- [7] 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
- [8] TumliKOVO: *Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí* [online]. Praha: TumliKOVO, 2011 [cit.2022-03-21]. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>> 27.3.2022
- [9] ADVAMAT: *Technologie PVD povlakování* [online]. Jihlava: Advamat, 2018 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <<https://www.advamat.cz/technologie/>> 27.3.2022
- [10] QiSHUAI: *Silicon nitride ceramic* [online]. Yibo city, China: qishuai, 2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <<https://www.sdqishuai.com/info/silicon-nitride-ceramic-67878324.html>> 27.3.2022
- [11] Castolin Eutectic: *MeCaWear© A5 polymer coatings* [online]. Chrášt'any: Castolin, 2022 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <<https://www.castolin.com/cs-CZ/product/mecawear-a5-polymer-coatings>> 27.3.2022
- [12] DAWSON, R.J.,SCHEWCHUK, S. a PRITCHARD, J. E. *Selection and use of hardfacing alloys*. Welding J.,61, 1982. ISSN 0043-2296
- [13] BUCHELY, M. F. et al. *The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys*. Wear, 259, 2005. ISSN 0043-1648
- [14] Klimpel, A., Kik, T.. (2008). *Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits*. Archives of Materials Science and Engineering. 30.

- [15] *NanoAlloy Metal-Cored Wire for Extreme Abrasion Applications*. Milwaukee: Eutectic corp., 2008. Dostupné také z: https://issuu.com/castolin_eutectic/docs/nanoalloy-390n-wire_b5e6a7edb1ff30 > 27.3.2022
- [16] Jinaga, Rakesh & Kolekar, Shreedhar & Thim, Jagadeesha. (2020). *Tribology of Intelligent Magnetorheological Materials*. 10.1007/978-3-030-47451-5_7.
- [17] Badisch, E. & Kirchgaßner, M. & Polak, R. & Franek, Friedrich. (2008). *The comparison of wear properties of different Fe-based hardfacing alloys in four kinds of testing methods*. Tribotest. 14. 225-233. 10.1002/tt.61.
- [18] Badisch, E. & Kirchgaßner, M. & Polak, R. & Franek, Friedrich. (2008). *The comparison of wear properties of different Fe-based hardfacing alloys in four kinds of testing methods*. Tribotest. 14. 225-233. 10.1002/tt.61.
- [19] STOKES, R.J a T.J. VALENTINE. *Wear mechanisms of ABN abrasive*. Anglie: DE BEERS INDUSTRIAL DIAMOND DIVISION. ISBN 0 9506308 1 0.
- [20] WAHL, W. *Abrasive Verschleißschäden und ihre Verminderung*. VDI-Berichte Nr.243,1975. ISSN 0083-5560
- [21] TREZONA, R.I. a HUTCHINGS, I.M. *Three-body abrasive wear testing of soft materials*. Wear, 233-235, 1999. ISSN 0043-1648

Přílohy

Příloha 1 - Návarové slitiny pro abrazivní opotřebení podle ČSN EN 14700 [4]

Označení slitiny	Chemické složení (hmotnostní %)	Mikrostruktura	Tvrдость (HRC)
Fe 6	$\leq 2,5 \text{ C}; \leq 10 \text{ Cr}; \leq 3 \text{ Mn}; \leq 3 \text{ Mo}; \leq 10 \text{ Nb}; \text{ Ti}$	M + K	48-55
Fe 8	$0,2-2\text{C}; 5-18\text{Cr}; 0,3-3\text{Mn}; \leq 4,5\text{Mo}; \leq 2\text{W}; \leq 2\text{V}; \leq 10\text{Nb}; \text{Si}; \text{Ti}$	M + K	50-65
Fe 13	$\leq 1,5\text{C}; \leq 6,5\text{Cr}; \leq 4\text{Ni}; 0,5-3\text{Mn}; \leq 4\text{Mo}; \text{B}; \text{Ti}$	M/A + FeB	55-65
Fe 14	$1,5-4,5\text{C}; 25-40\text{Cr}; \leq 4\text{Ni}; 0,5-3\text{Mn}; \leq 4\text{Mo}$	M/A + K	40-60
Fe 15	$4,5-5,5\text{C}; 20-40\text{Cr}; \leq 4\text{Ni}; 0,5-3\text{Mn}; \leq 2\text{Mo}; \leq \text{Nb}; \text{B}$	M/A + K	55-65
Fe 16	$4,5-7,5\text{C}; 10-40\text{Cr}; \leq 3\text{Mn}; \leq 9\text{Mo}; \leq 8\text{W}; \leq 10\text{V}; \leq 10\text{Nb}; \text{B}; \text{Co}$	M/A + K	60-70
Fe 20		Karbidy WC* + matrice Fe	50-60
Ni 20		Karbidy WV* + matrice Ni	45-55

*Pozn.: M – martenzit, A – austenit, K – karbidy, * karbidy wolframu 1500–2800 HV.*

Příloha 2 – Rozdělení návarů dle chemického složení a aplikace [4]

Typ návaru	Typické složení	Charakteristika návaru	Aplikace
Ocel s nízkým obsahem uhlíku	0,1C; 1Mn; 0,5Si; 0,8Cr; 0,5Ni; základ Fe	Struktura – ferit; tvrdost – 20-35 HRC; obrobitelný; houževnatý; není omezení v tloušťce návaru; nízká odolnost proti abrazivnímu opotřebení	Renovace součástí z nízkouhlíkových ocelí; kola, hřídele, ozubená kola, válce, vačky, čepy
Manganová ocel	1,1C; 14Mn; 1Ni; 0,5Mo; 2Cr; 0,5Si; Základ Fe	Struktura – austenitická, tvrdost při zpevnění až 550 HB; houževnatá; tažná; nemagnetická; vynikající odolnost proti kombinaci abrazivního opotřebení a rázů	Renovace odlitek z austenitické manganové oceli, válce drtičů, tyče drtičů, kladiva mlýnů
Martenzitická ocel	0,5C; 1Mn; 0,5Si; 5Cr; 1,5Mo; základ Fe	Struktura – martenzitická, tvrdost – 45-60 HRC, pevná do 500 °C, odolává vydrolování, dobrá odolnost proti abrazivnímu opotřebení, nízká rázová houževnatost a tažnost	Nemazané součásti podvozků traktorů, kola jeřábů, válce pro tváření trubek apod.
Návar Fe-Cr	4C; 20Cr; 2Mn; 1Si; 1Mo; 0,5Ni; základ Fe	Struktura – martenzit-austenit+ karbidy M_7C_3 , tvrdost – 45-60 HRC, obvykle praská, nutno navařit 2-4 vrstvy; výborná odolnost proti abrazivnímu opotřebení do 500 °C	Zuby lžíce bagru, drtiče, korečky, řetězy dopravníku, kladiva kladivového mlýna, hrany škrabáku
Návar na bázi Cu	10Al; 1,5Fe; 0,3Sn; základ Cu	Nízké tření dvojice s ocelí, odolává adhezivnímu opotřebení, odolává korozi, dobře obrobitelný, neomezená tloušťka, nevhodný do podmínek abrazivního opotřebení	Ozubená kola, ložiska, hřídele, formy, hydraulické písty, oprava odlitek na bázi Cu
Návar s WC	60% částice WC; zbytek nízkouhlíková ocel	Karbidy WC + ocelová matrice, obvykle praská po navaření, výborná odolnost proti abrazivnímu opotřebení, oxidace > 400 °C, navařit pouze jednu vrstvu	Šroubovitě vrtáky, vrtáky, řezné zuby, vrtné objímky, zařízení na řezání SiO_2
Návary na bázi Co a Ni	28Cr; 5W; 1C; základ Co nebo Ni	Karbidy ve slitinové matrici, tvrdost -40-55 HRC, dobrá tvrdost od 800 °C, odolává adhezivnímu opotřebení za vysokých teplot, odolává erozivnímu opotřebení, kavitaci a nárazům	Nože, vodička pro manipulaci s odlitky za tepla, zápusťky na tváření za tepla