

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ú12133 – ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



Bakalářská práce

Povrchy, jejich opotřebení a renovace

Autor: **Ladislav Záhon**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE**

Praha, 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Záhon** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **483933**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Povrchy, jejich opotřebení a renovace

Název bakalářské práce anglicky:

Surfaces, their wear and renovation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor sledované problematiky opotřebení a renovace
- 2) Testování funkčních dvojic z hlediska jejich opotřebení
- 3) Návrh a testování funkčních dvojic
- 4) Diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.
2. AMBROŽ, O., KAŠPAR, J., Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 318 s. ISBN 80-030-0347-4.
3. POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M., Degradace strojních součástí. Praha: ČZU, 2002, 67 s. Monografie. ISBN 80-213-0967-9.
4. PETERSON, S., Touching Up: Selective Brush Plating in the Field. MMS. Aktualizace 2015. Dostupné z [www: http://www.mmsonline.com/articles/touching-up-selective-brush-plating-in-the-field](http://www.mmsonline.com/articles/touching-up-selective-brush-plating-in-the-field)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Bibliografické údaje

Název bakalářské práce: Povrchy, jejich opotřebení a renovace

Anglický název bakalářské práce: Surfaces, their wear and renovation

Akademický rok: 2020/2021

Jméno autora práce: Ladislav Záhon

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Údaje o práci:

Počet stran: 77

Počet obrázků: 55

Počet tabulek: 18

Anotace

V teoretické části je tato bakalářská práce zaměřena na problematiku opotřebení a renovací povrchů. Její součástí je podrobný popis principů jednotlivých druhů opotřebení a faktorů, které je ovlivňují. Práce dále obsahuje popis metod, které se nejčastěji využívají pro renovace opotřebovaných povrchů, je zde tedy shrnuta problematika navařování a žárových nástřiků. Závěr teoretické části je věnován základním typům tribometrů a principu jejich funkce.

Účelem experimentální části je testování a vyhodnocení tribologických charakteristik testovaných vzorků v závislosti na jejich chemickém složení, výsledkem je stanovení statického i dynamického součinitele smykového tření pro dané vzorky. Na základě hmotnostních úbytků je posouzena míra opotřebení testovaných vzorků, které jsou následně navzájem porovnány.

Klíčová slova: opotřebení, renovace povrchů, tribologie, tribometr, opravárenství

Annotation

In the theoretical part, this bachelor's thesis is focused on the issue of wear and renovation of surfaces. It includes a detailed description of the principles of individual types of wear and the factors that affect these types. The work also contains a description of methods most often used for surface renovation which include mainly thermal spraying and overlay welding. The conclusion of the theoretical part is devoted to the description of basic types of tribometers and their principles of function.

The purpose of the experimental part is to examine and evaluate tribological characteristics of tested samples in relation to their chemical composition, the result of which is determination of the static and dynamic coefficient of shear friction for the given samples. Wear intensity has been determined by weight loss of given samples. Resulting wear intensities of test samples were compared with each other.

Keywords: wear, surfaces renovation, tribology, tribometer, repair

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Při vypracování jsem použil pouze podklady, které jsou uvedeny v příloženém seznamu.

V Praze dne: 1.8.2021

.....

Ladislav Záhon

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jiří Kuchařovi, Ph.D., IWE a prof. Ing. Františce Pešlové, Ph.D., za vedení mé práce a za cenné rady při její tvorbě, dále pak Ing. Zdeňku Hazdrovi za pomoc s měřicí aparaturou, pro testování vzorků.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Abrazivní opotřebení.....	10
1.2	Adhezivní opotřebení	12
1.3	Kavitační opotřebení	15
1.4	Erozivní opotřebení.....	16
1.5	Vibrační opotřebení.....	18
1.6	Únavové opotřebení	19
1.7	Koroze	21
1.7.1	Dle typu napadení materiálu	21
2	Renovace.....	24
2.1	Obecný postup renovace	24
3	Navařování.....	25
3.1.1	Výhody navařování.....	26
3.1.2	Nevýhody navařování	26
3.1.3	Předúprava povrchu	26
3.1.4	Způsoby navařování.....	27
3.1.5	Navařování plamenem	27
3.1.6	Navařování elektrickým obloukem.....	28
3.1.7	Navařování plazmatem	29
3.1.8	Navařování laserem	30
4	Žárové nástřiky	31
4.1	Struktura povlaku	32
4.2	Vlastnosti povlaku.....	32
4.2.1	Vlastnosti obecného charakteru	32
4.2.2	Speciální vlastnosti povlaku	33
4.3	Předúprava povrchu	34

4.4	Rozdělení metod žárových nástřiků	34
4.4.1	Žárový nástřik plamenem	35
4.4.2	Nástřik detonační vlnou	37
4.4.3	Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF.....	38
4.4.4	Studený kinetický nástřik.....	39
4.4.5	Nástřik elektrickým obloukem.....	40
4.4.6	Plazmatický nástřik.....	41
5	Tribometrie	43
5.1	Metoda PIN-on-DISC	43
5.2	PIN-on-PLATE	44
5.3	BLOCK-on-RING.....	44
5.4	Four ball test.....	45
6	Experimentální část.....	46
6.1	Chemické složení vzorků	47
6.2	Příprava tribologického testu	48
6.3	Měření na tribometru TOP3	49
6.4	Popis metodiky měření na tribometru TOP3	50
6.5	Vyhodnocení měření koeficientu smykového tření	51
6.5.1	Naměřené hodnoty pro vzorek č.1	52
6.5.2	Naměřené hodnoty pro vzorek č.2	54
6.5.3	Naměřené hodnoty pro vzorek č.3	56
6.5.4	Naměřené hodnoty pro vzorek č.4	58
6.5.5	Naměřené hodnoty pro vzorek č.5	60
7	Shrnutí naměřených hodnot	62
7.1	Srovnání hmotnostních úbytků	62
7.2	Srovnání dynamického součinitele smykového tření.....	63
7.3	Srovnání statického součinitele smykového tření	64

8	Závěr	65
9	Citovaná literatura.....	66
10	Seznam obrázků	74
11	Seznam tabulek	76
12	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	77

1 Úvod

Opotřebení je definováno jako nežádoucí změna rozměru nebo povrchu tuhého tělesa. Tato změna je trvalá a dochází k ní při vzájemném působení funkčních ploch povrchů, nebo působením média na funkční povrch. Při opotřebení dochází k přemísťování nebo odstraňování částic hmoty z daného povrchu působením mechanický sil. Tyto síly mohou být doprovázené chemickými či elektrochemickými vlivy. [1, 2]

Základní rozdělení opotřebení:

- abrazivní
- adhezivní
- kavitační
- únavové
- erozivní
- vibrační
- korozní

V praxi ovšem dochází nejčastěji ke kombinaci těchto základních druhů. [1, 2]

1.1 Abrazivní opotřebení

Jedná se o opotřebení, které je způsobeno přítomností tvrdých částic. Tento typ opotřebení se řadí mezi velmi intenzivní degradační procesy. Obecně se uvádí, že více jak polovina všech případů opotřebení strojních součástí je způsobena právě tímto typem opotřebení. [1, 2, 3, 4]

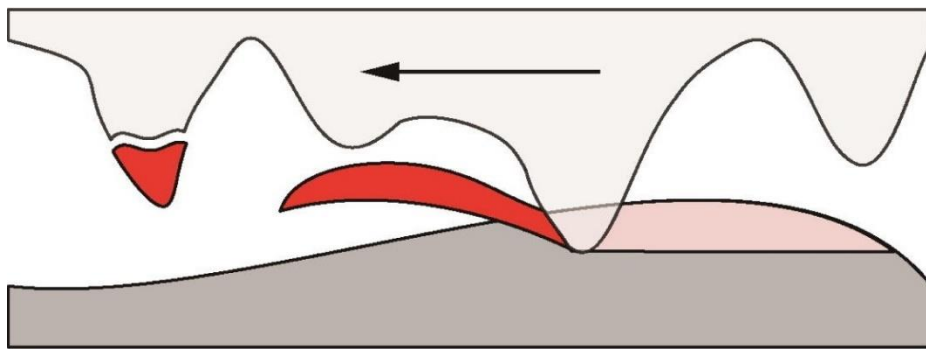
K tomuto typu opotřebení dochází při vzájemném silovém působení tvrdých, často minerálních částic a funkčního povrchu. Tyto částice mohou být volné, nebo určitým způsobem ukotvené, jako je tomu například u brusného papíru. [1, 2, 3]

Vznik abrazivního opotřebení v důsledku přítomnosti volných tvrdých částic mezi dvěma funkčními povrchy, které jsou ve vzájemném pohybu, je velmi častý jev. Dochází k němu především mezi různými kluznými dvojicemi, které jsou vzájemně nedostatečně utěsněny. [1, 2, 3, 4, 5]

Nedostatečným utěsněním pak mohou vniknout různé částice mezi tyto kluzné povrchy a následně způsobit abrazivní opotřebení. Při abrazivním opotřebení může docházet ke vzniku tvrdých částic otěru, které následně přispívají k dalšímu abrazivnímu opotřebení.

[1, 2, 3, 4, 5]

Abrazivní opotřebení se často dělí na dva případy. Jedním je případ opotřebení, kdy dochází k plastické deformaci a rýhování povrchu. To je způsobeno tím, že před abrazivní částicí vzniká nárůstek a ten je souvisle vtlačován do boků, a tím se kolem rýhy vytváří valy. V tomto případě nedochází k žádnému oddělování materiálu. V druhém případě dochází k oddělování materiálu tzv. mikrořezáním. V takovém případě se vlivem abrazivní částice odděluje tříška z povrchu, ovšem nevznikají zde žádné valy kolem vzniklé rýhy. [1, 2, 3, 4]



Obr.1: Abrazivní opotřebení [5]

Vliv různých faktorů na abrazivní opotřebení

Jedním z faktorů, které ovlivňují abrazivní opotřebení je tvar abrazivních částic, pokud mají částice ostré hrany, dochází k několikanásobně většímu opotřebení než v případě částic, které jsou oblé. [1, 2]

Dalším faktorem je velikost abrazivních částic, v případě, že jsou částice volně umístěny mezi povrchy, dochází k opotřebení povrchů jen těmi částicemi, které mají tzv. nadkritickou velikost. Jedná se o částice s velikostí větší, než je velikost vůle mezi povrchy. Pokud mají částice nadkritickou velikost, pak prakticky není možné snížit abrazivní opotřebení ani přítomností mazacího filmu mezi povrchy. [1, 2]

Poměrně velkou roli hraje také množství abrazivních částic. Pokud je mezi povrchy přítomné větší množství menších částic (jejich velikost je menší než hodnota nadkritické velikosti), pak bude pravděpodobně docházet k jejich shromažďování

a vrstvení. To následně způsobuje abrazivní opotřebení povrchů. Při menších částicích se zvyšuje pravděpodobnost výskytu částic, které jsou ostrohranné. Ty pak zvyšují intenzitu abrazivního opotřebení. [1, 2, 6]

Dalším faktorem je pevnost částic, čím je nižší je, tím snadněji dochází k jejich rozdrčení mezi povrchy a k otupování hran částic. Při drcení částic dochází k jejich rozpadu na menší částice, tyto rozdrčené částice jsou však ostrohranné, to může mít vliv na intenzitu opotřebení. [1, 2, 4, 6]

Důležitým faktorem je také tvrdost, pokud mají abrazivní částice vyšší tvrdost než materiál, pak do tohoto materiálu snadněji pronikají a tím roste intenzita opotřebení. [1, 2, 6]

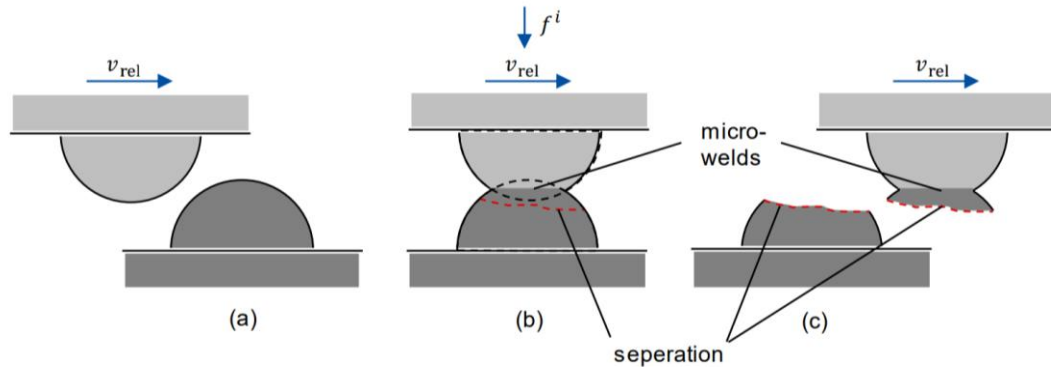
1.2 Adhezivní opotřebení

K tomuto typu opotřebení dochází nejčastěji v případech, kdy se funkční povrchy součástí dostanou do kontaktu a jsou k sobě přitlačovány normálovou silou při jejich vzájemném valení či smýkání. Při odvalování totiž také dochází ke smyku. V takovém případě dochází ke vzniku velkých adhezivních sil, které mají za následek vznik adhezivního opotřebení. [1, 2, 7, 8, 9]

Při adhezivním opotřebení je nutné si uvědomit, že styčné povrchy nejsou dokonale hladké. A tak dochází ke styku těchto povrchů lokálně, v místech nerovností povrchů. V těchto místech styku vrcholů mikronerovností z počátku dochází k elastické deformaci. Ovšem pokud se v těchto místech zvýší tlakové napětí a překročí mez kluzu v tlaku, dojde postupně ke vzniku plastické deformace povrchových vrstev tohoto materiálu. Atomy obou povrchů jsou v těsném kontaktu, a tak začínají vznikat tzv. mikrospoje. [1, 2, 7, 8, 9]

Následně při relativním pohybu dochází k přerušování vzniklých mikrospojů. Povrchové vrstvy materiálu jsou zpevněné plastickými deformacemi, jsou tedy výrazně pevnější než vrstvy, které se nacházejí pod nimi. Dochází tak k porušování soudržnosti materiálu ve slabších vrstvách, tedy uvnitř jednoho z těles. Současně s přerušováním mikrospojů, dochází k prudkému nárůstu teploty. Může tak docházet ke vznikům oxidických vrstev. Zároveň však nárůst teploty způsobí snadnější difuzní přenos atomů materiálu jednoho z povrchů na povrch druhý. Obvykle se přenáší měkký materiál na povrch tvrdšího materiálu. Běžně jsou povrchy kovových materiálů pokryty vrstvami oxidů nebo jinými

produkty chemických reakcí. Tyto vrstvy jsou většinou tenké, a tak kontaktem s lokálními nerovnostmi povrchů dochází poměrně snadno k jejich porušování. Tím se odhalí materiál bez těchto vrstev, tento materiál je následně mnohem náchylnější na tvorbu



mikrospojů a tedy i přenosu materiálu. [1, 2, 7, 8, 9]

Obr.2: Adhezivní opotřebení (a) před kontaktem, (b) během kontaktu, (c) po kontaktu, microwelds – mikrospoje, separation – oddělení [10]

Pokud je rychlost tvorby povrchové oxidační vrstvy větší, než je rychlost jejího porušování, dochází k nižšímu počtu adhezivních mikrospojů a zároveň jsou vzniklé mikrospoje výrazně méně pevné, nejsou tak „kvalitní“, tím se snižuje i přenos částic materiálu. Rychle se obnovující oxidační vrstva totiž působí jako tenká zábrana, která brání tvorbě „kvalitnějších“ mikrospojů. Povrch materiálu tak není nějak výrazně opotřebovaný, proto nazýváme takové opotřebování mírným adhezivním opotřebováním. [1, 2, 7, 9]

Pokud je rychlost porušování povrchové oxidační vrstvy vyšší než rychlost obnovy této oxidační vrstvy, dochází bez její přítomnosti k mnohem četnější tvorbě mikrospojů, které jsou zároveň mnohem „kvalitnější“. Tyto spoje jsou následným pohybem porušovány a dochází tak k přenosu materiálu mezi povrchy, nebo ke vzniku volných částic materiálu, ty se označují jako otěrové částice. Tento proces má za následek výrazné porušování povrchu materiálu, v extrémním případě je opotřebení vidět pouhým okem. Tvoří jej různé rýhy, částice otěru, které mohou přilnout k povrchu materiálu. Tento proces je nazýván intenzivním adhezivním opotřebováním. [1, 2, 7, 9]

V technické praxi dochází poměrně často ke kombinaci abrazivního a adhezivního opotřebení. Tedy dochází k tomu, že ze začátku se opotřebení jeví jako adhezivní, následně dochází k tvorbě otěrových částic, které v podstatě tvoří abrazivo

a tím dochází ke sloučení adhezivního a abrazivního opotřebení. Poté většinou nastává úplná změna a výsledné opotřebení se jeví pouze jako abrazivní. [1, 7]

Vliv různých faktorů na adhezivní opotřebení

Významný vliv na adhezivní opotřebení má zatížení, které působí na součásti. Zatížení může působit stálou silou nebo může docházet k přerušování zatížení. Zároveň může zatížení působit v různých směrech. Tyto charakteristiky zatížení mají také významný vliv na míru a rychlost opotřebení třecí dvojice. Pokud při opotřebení nedochází ke změnám stavu povrchů třecí dvojice, můžeme v takovém případě uvažovat, že velikost zatížení je přímo úměrná vznikajícímu opotřebení. [1, 6, 7]

Dalším významným faktorem ovlivňujícím adhezivní opotřebení je rychlost relativního pohybu. Tento faktor významně ovlivňuje především teplotu mezi povrchy. Při pohybu totiž ke vzájemnému tření povrchů a tím dochází k přeměně mechanické energie na tepelnou. Na teplotu má však vliv více faktorů, včetně plastické deformace a tvorby a následného porušování vznikajících mikrospojů. Vysoká teplota může mít na opotřebení povrchů negativní i pozitivní vliv. Například, oxidy některých kovů mohou působit jako jakási ochrana proti dalšímu opotřebení, ovšem u některých kovů vznikající oxidy mohou působit jako abrazivo a tím významně zvýšit opotřebení povrchů. Teplota má samozřejmě vliv i na mechanické vlastnosti povrchů. Dalšími důležitými faktory jsou velikost stykových ploch, tepelná vodivost materiálů, kvalita maziva, které se nachází mezi povrchy a tím snižuje tření, nebo například kombinace povrchů z různých materiálů s různými mechanickými vlastnostmi. Dalším faktorem může být například i krystalová mřížka, ze které je daný materiál složen. [1, 7, 10]

1.3 Kavitační opotřebení

Obecně lze kavitační opotřebení označit za velmi intenzivní proces opotřebení probíhající v kapalinách. Toto opotřebení je založeno na kavitaci. Při kavitaci dochází v místě prudkého poklesu tlaku kapaliny ke vzniku tzv. kavitačních dutin. Počet těchto dutin roste a tím dochází k opotřebení materiálu a porušení pevnosti součásti. [1, 2, 11]

Ke kavitaci dochází nejčastěji v rychle proudící kapalině, v místě lokálního snížení tlaku podle Bernoulliova zákona. Takovým místem může být například rychle rotující lodní šroub. Na povrchu lopatek se nachází místo, kde dochází k lokálnímu snížení tlaku kapaliny. Pokud dojde v takových místech ke snížení tlaku až pod úroveň tlaku nasycených par dané kapaliny, dojde následně k tvorbě kavitačních dutin. Tyto dutiny jsou naplněné parami dané kapaliny. V místě, kde narůstá tlak kapaliny dochází k implozi těchto dutin. Imploze je jev, který je opakem exploze. Dochází při něm v podstatě ke zhroucení objektu, v tomto případě kavitačních dutin. Při implozi dochází ke vzniku hydrodynamických rázových vln, imploze může být také asymetrická, v takovém případě dochází ke vzniku mikroproudů dané kapaliny. Takto vzniklé mikroproudy mají vysokou rychlost, jejich silové účinky působí na velice malé plochy. Hydrodynamické rázy a mikroproudy působí na povrch součásti a dochází k elastické a plastické deformaci. Vznikáním těchto deformací dochází k růstu pnutí v povrchu součásti. Vysoká frekvence implozí má pak za následek vysokocyklové namáhání, při kterém dochází ke vzniku mikrotrhlin a postupem času i k oddělování částic daného materiálu. [1, 2, 9, 11]



Obr.3: Kavitační opotřebení [12]

Vliv různých faktorů na kavitační opotřebení

Mezi základní parametry ovlivňující kavitaci se obecně řadí například viskozita dané kapaliny. Viskozita ovlivňuje především rychlost vniku kapaliny do zanikající kavitační dutiny při její implozi. Čím vyšší viskozita je, tím nižší je rychlost vnikající kapaliny. Dalším důležitým faktorem je povrchové napětí dané kapaliny. Hodnoty povrchového napětí ovlivňují počet vznikajících dutin. Čím je napětí nižší, tím vzniká více drobných dutin. Čím je vyšší hodnota povrchového napětí, tím vzniká méně větších kavitačních dutin. Větší kavitační dutiny při jejich implozi způsobují větší intenzitu kavitačního

opotřebení. Na intenzitu opotřebení má vliv i rozdíl vnějšího tlaku kapaliny a tlaku nasycených par. Při zvyšování tohoto rozdílu dochází i ke zvyšování intenzity kavitačního opotřebení. [1, 11]



Obr.4: Kavitační dutiny při pohybu lodního šroubu [13]

1.4 Erozivní opotřebení

Příčinou erozivního opotřebení je vzájemné působení funkčního povrchu a media. Při tomto typu opotřebení dochází k oddělování částic povrchu působením částic, které jsou nesené médiem. Kinetické energie částic nesených médiem se při nárazu mění na deformační práci a ta následně způsobuje deformaci funkčního povrchu dané součásti. [1, 2, 14]

Částice povrchu mohou být oddělovány účinkem:

- částic, které jsou nesené proudem kapaliny
- částic, které jsou nesené proudem plynu
- kapkami kapaliny nebo jejím proudem [1]

Vliv různých faktorů na erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je velmi komplikovaný děj, neboť zde současně působí řada faktorů, které mají zásadní vliv na výslednou intenzitu opotřebení. Faktory ovlivňující erozivní opotřebení se obecně rozdělují do 3 základních skupin. [1, 14]

Podmínky nárazu, tato skupina zahrnuje následující faktory. Relativní rychlost dopadajících částic a úhel pod kterým tyto částice na povrch dopadají. [1, 2, 14]

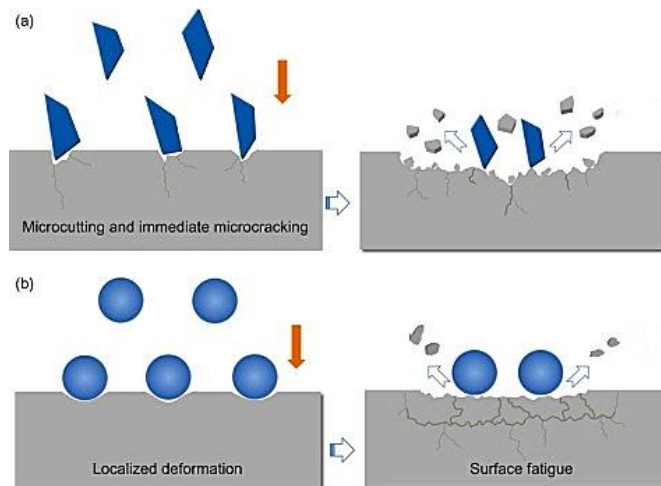
Charakteristické vlastnosti směsi media a jeho částic, tato skupina zahrnuje velikost, tvar a tvrdost dopadajících částic. Dále jsou zde zahrnuty i vlastnosti media, tedy jeho

teplota, rozložení a množství částic v mediu i jeho chemické účinky na povrch materiálu. [1, 2, 14]

Charakteristické vlastnosti materiálu erodovaného povrchu, především jeho pevnost, tvrdost a houževnatost. [14]

Na částici dopadající na povrch působí současně několik sil, mohou na ni působit síly okolních částic, které také dopadají na povrch. Dále na ni působí medium, které tuto částici unáší podél povrchu, ovšem největší silové účinky vznikají v důsledku brždění této částice z její dopadové rychlosti, která ji byla udělena mediem. [1, 2, 4, 14]

Při dopadu částic na povrch kovu, může dojít k několika procesům. Pokud je povrch kovového materiálu dostatečně tvrdý, dochází k roztržení částic. Může dojít také k řezání povrchu, pokud má částice ostré hrany, nebo pokud je úhel dopadu dostatečně malý. Dopadající částice také mohou způsobovat deformaci povrchových vrstev a následně způsobovat šíření trhlin v materiálu. Při adhezivním nebo abrazivním opotřebení dochází k lokální deformaci v místech nerovností, naopak u erozivního opotřebení dochází k nerovnoměrnému opotřebení povrchu bez ohledu na lokální nerovnosti. [1, 2, 4, 14]



Obr.5: Erozivní opotřebení *Microcutting and immediate microcracking* – Mikrořezání a okamžité praskání, *localized deformation* – lokální deformace, *surface fatigue* – únava povrchu [15]

Odolnost materiálů je silně závislá na úhlu dopadu. Pro velké úhly dopadu jsou vhodnější měkké a houževnaté materiály. Dopadající částice tak mohou snižovat svoji rychlost na delší dráze a lépe tak tlumí nárazy dopadajících částic. Naopak pro malé úhly dopadu jsou vhodnější materiály s vyšší tvrdostí. Tyto materiály mají při malém úhlu

dopadajících částic vyšší odolnost proti vnikání částic do povrchových vrstev materiálu. Jsou také odolnější proti možnému rýhovacímu účinku dopadajících částic. [1, 2, 4, 14]

Erozní opotřebení má uplatnění i v technologické praxi, například tryskání je poměrně častá předúprava povrchů. Dalším častým využitím eroze je řezání vodním paprskem. [14]

1.5 Vibrační opotřebení

Při tomto typu opotřebení dochází k oddělování materiálu v místě lokálních mikronerovností mezi povrchy, které jsou vůči sobě v tangenciálním kmitavém pohybu a jsou současně zatěžovány normálovými silami. Vzájemný tangenciální posuv je poměrně malý, pohybuje se v rozmezí 10^{-4} - 10^{-1} mm. [1, 16, 17]

V místě mikronerovností povrchů dochází k tvorbě a následnému porušování mikrospojů. Tento proces způsobuje elastickou a plastickou deformaci v povrchových vrstvách materiálu. Dochází ke zpevňování povrchových vrstev, následně však dochází k vyčerpání plasticity daného materiálu a začínají vznikat uvolněné částice otěru. Vzniklé částice na vzduchu oxidují, obecně mají oxidy kovů výrazně vyšší tvrdost než samotné kovy, to způsobuje výrazně intenzivnější opotřebení. V důsledku malé amplitudy pohybu nemůže docházet k odstraňování otěrových částic. Tyto částice otěru tak působí v lokálním místě abrazivním opotřebením na povrchy součástí. [1, 2, 16, 17]

Vliv různých faktorů na vibrační opotřebení

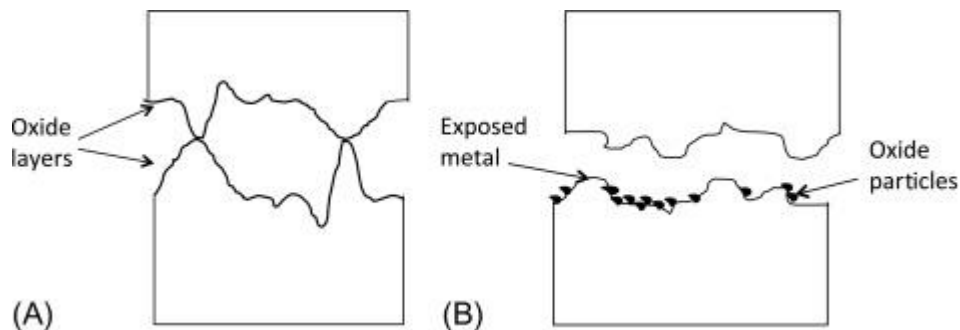
Jedním z mnoha faktorů, které ovlivňují vibrační opotřebení je amplituda pohybu. Obecně se uvádí, že s rostoucí amplitudou pohybu roste i množství vznikajících otěrových částic, tím roste i intenzita opotřebení. Pokud však velikost amplitudy přesáhne určitou hodnotu, dochází následně k odstraňování otěrových částic z oblasti stykových povrchů. V takovém případě se mění vibrační opotřebení na adhezivní, které má výrazně nižší intenzitu opotřebení. [1, 2, 16, 17]

Významnou roli hraje měrný tlak. Pokud měrný tlak roste, může docházet k tlumení kmitavého pohybu a tím se sníží i intenzita opotřebení. Pokud však s rostoucím měrným tlakem nedochází k tlumení pohybu intenzita opotřebení naopak roste. [1, 16]

Dalším faktorem jsou vlastnosti prostředí, ve kterém tento proces opotřebení probíhá. Zejména je důležitá přítomnost kyslíku, pokud je kyslík přítomen dochází ke vzniku oxidických částic otěru s výrazně vyšší tvrdostí oproti kovovým částicím. Důležitá

je i relativní vlhkost prostředí. Vlhkost má na vibrační opotřebení opačný vliv než na atmosférickou korozi, se zvyšující se relativní vlhkostí klesá intenzita vibračního opotřebení. V praxi se místa s vyšší pravděpodobností vzniku vibračního opotřebení chrání vrstvou maziva, které zabraňuje přístupu kyslíku k povrchům. [1, 16]

V neposlední řadě mají vliv na vibrační opotřebení i vlastnosti materiálu. Jejich vliv však snižuje vznikající oxidická vrstva. A opotřebení pak závisí na vlastnostech vzniklých oxidů. Obecně se dá říci, že měkké materiály jsou ve většině případů náchylnější na vibrační opotřebení. V některých případech však mohou vzniklé oxidické částice, které jsou tvrdší než materiál povrchu, vnikat do tohoto materiálu a měkký materiál tak nemusí jevit známky intenzivního opotřebení. [1, 16]



Obr.6: Vibrační opotřebení, oxide layers – oxidické vrstvy, exposed material – nechráněný materiál, oxide particles – oxidické částice [18]

1.6 Únavové opotřebení

Jedná se o poměrně častý typ opotřebení, které vzniká při cyklickém namáhání povrchu součástí. V důsledku cyklického namáhání povrchu dochází ke zvyšování hustoty poruch povrchové vrstvy součástí. Pokud napětí při namáhání překročuje mez kluzu daného materiálu, jedná se o nízkocyklové namáhání. Pokud nedochází k překročení meze kluzu, jedná se o vysokocyklové namáhání. [1, 2, 4, 6, 9]

K únavovému opotřebení dochází při opakovanému kontaktu těles, při kterém vznikají vysoké lokální tlaky působící na povrchy součástí. Zejména se jedná o tělesa, která mají zakřivené povrchy a síla se koncentruje na menší stykové ploše. V některých případech může tento proces doprovázet i tahové a smykové namáhání, typicky u ozubených kol, toto namáhání způsobuje intenzivnější opotřebení. [1, 2, 4, 6, 9]

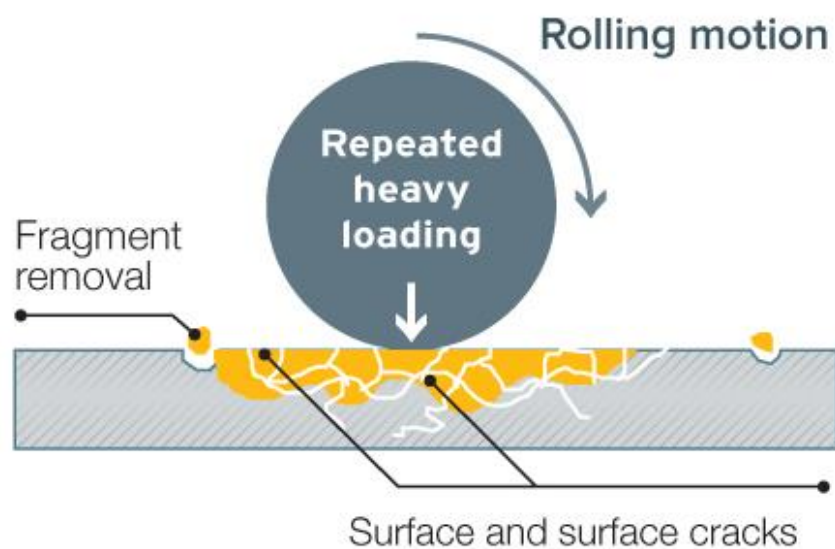
Cyklické namáhání povrchu tedy způsobuje růst hustoty poruch povrchové vrstvy, vznikají tak mikrotrhliny v povrchu součástí. Tyto trhliny se postupně šíří a spojují,

tím roste oblast únavového opotřebení. V krajním případě dochází k oddělování částí povrchu. [1, 4, 6, 9]

Vliv faktorů na únavové opotřebení

Na únavové opotřebení má vliv řada faktorů, jedním z nich je i přítomnost maziva. To může mít i negativní vliv. Pokud mezi povrchy při cyklickém namáhání dojde k tvorbě mikrotrhlin, mazivo pak následně vniká do takových mikrotrhlin. Opakovaným namáháním povrchu dochází k uzavření maziva a následně dalším silovým působením roste tlak tohoto maziva v povrchových vrstvách součásti. To pomáhá dalšímu šíření mikrotrhlin a růstu intenzity únavového opotřebení. Pro takový proces opotřebení je typický vznik důlků označovaný výrazem „pitting“. [1, 4, 6]

Únavové opotřebení značně ovlivňuje tvrdost povrchových vrstev součásti. Míra opotřebení klesá s rostoucí tvrdostí povrchu. Intenzitu opotřebení ovlivňuje také drsnost povrchu, drsnější povrchy jsou náchylnější na únavové opotřebení v důsledku vrubových účinků nerovností na povrchu. Dalším faktorem ovlivňujícím únavové opotřebení je přítomnost nečistot a vměstků, které přispívají ke vzniku mikrotrhlin kvůli jejich vrubovému účinku na daný materiál. [1, 2, 4, 6, 9]



Obr.7: Únavové opotřebení, *Fragment removal* – odstranění částic, *Surface and surface cracks* – povrch a povrchové trhliny, *Repeated heavy loading* – opakované zatížení, *Rolling motion* – valivý pohyb [19]

1.7 Koroze

Koroze je proces, při kterém dochází k samovolnému chemickému, nebo fyzikálně-chemickému znehodnocování materiálu. Toto znehodnocování materiálu se může projevovat různými způsoby, a závisí především na složení materiálu a jeho struktuře. Dále závisí také na prostředí, ve kterém se daný materiál nachází. Vliv různých prostředí na degradaci materiálu se výrazně liší, jednotlivá prostředí mohou ovlivnit intenzitu degradace materiálu i její mechanismus. Vliv na intenzitu napadení, může mít i mechanické namáhání součásti. Koroze se dělí do několika skupin, a to podle jejího mechanismu, korozního prostředí, nebo typu napadení materiálu. [20, 21]

1.7.1 Dle typu napadení materiálu

V této kapitole bude představena rovnoměrná koroze, ale i vybrané typy lokálního korozního napadení.

Rovnoměrná koroze

Při rovnoměrné korozi dochází k rovnoměrnému přibývání korozních produktů na povrchu materiálu. Tyto korozní produkty následně umožňují rovnoměrnou difuzi iontů. U tohoto typu koroze lze poměrně snadno určit úbytek materiálu za určitý čas a tím lze zjistit i délku životnosti součásti v daném prostředí. Jedná se o nejpříjemnější druh koroze. [20, 21, 22, 23]

Bodová koroze

Jedná se o typ koroze, který se vyskytuje u materiálů s dobrou pasivační schopností. Nejčastěji se jedná o korozivzdorné oceli a hliníkové slitiny. Základní princip je stejný jako u důlkové koroze, ta má vůči průměru poměrně nízkou hloubku. U bodové koroze je tomu opačně a vůči průměru je hloubka větší. K tomuto typu koroze dochází při lokálním porušení pasivační vrstvy v místech, kde má tato vrstva zhoršené ochranné vlastnosti. Takovými místy jsou například okraje nebo hranice zrn. Bodová koroze probíhá především v roztocích obsahující agresivní ionty, nejčastěji se jedná o roztoky obsahující jód, chlór nebo bróm. Po porušení pasivační vrstvy dochází ke vzniku makročlánku mezi odhaleným povrchem a pasivační vrstvou. V místě, kde je porušena pasivační vrstva vzniká důlek. V tomto důlku následně roste hustota agresivních iontů a dochází ke snížení pH. Tyto faktory napomáhají šíření koroze. Malý otvor důlku zabraňuje výměně roztoku. [20, 21, 22, 23]

Důlková koroze

Jedná se o obdobu bodové koroze, základní princip je tedy totožný. Dochází k ní také u materiálů s poměrně dobrou pasivační schopností. Rozdíl proti bodové korozi je v menší hloubce a ve větší šířce. Tento poměr zůstává zachován s postupující korozi. [20, 22, 23]

Galvanická koroze

Ke galvanické korozi dochází při spojení různých materiálů s různým standardním potenciálem. Kov s nižším standardním potenciálem, tedy méně ušlechtilý kov je anoda a kov s vyšším standardním potenciálem, je katodou. V takovém spojení dochází ke korozi materiálu, který je anodou. Tento materiál tak koroduje výrazně rychleji, než by korodoval samostatně. Tento jev se často používá v praxi, je označován jako tzv. katodická ochrana obětovanou anodou. [20, 22, 23]

Štěrbinová koroze

Štěrbinová koroze probíhá v místech mezer (štěrbin) mezi povrchy. Takovými místy mohou být například nýtované nebo šroubové spoje, kde jsou spojované plochy v těsném kontaktu. V těchto štěrbinách je v podstatě odděleno malé množství elektrolytu, a téměř nedochází k jeho výměně. Samotná koroze je pak způsobena rozdílnou koncentrací iontů v elektrolytu, který je ve štěrbině a elektrolytu mimo štěrbinu. [20, 22, 23]

Interkrystalická koroze

Tento typ koroze je specifický tím, že se koroze šíří vyšší rychlostí po hranicích zrn než v samotném zrně. Pokud přejde až do zrna, pak je označována jako transkrystalická. Tento typ koroze není možné odhalit vizuální kontrolou, povrch součásti nevykazuje žádné viditelné korozní napadení. Pod povrchem však může docházet k výraznému poškození materiálu součásti. To vede ke zhoršení mechanických vlastností tohoto materiálu. Příčinou interkrystalické koroze může být ohřev korozivzdorné oceli na teploty v rozmezí 500–800 °C. Při zvýšené teplotě dochází k precipitaci karbidů chromu. Tím dochází ke vzniku míst ochuzených o rozpuštěný chrom, následně v takových oblastech dochází ke korozi. [20, 23]

Vliv různých faktorů na korozi

Proces koroze je ovlivňován řadou činitelů. Tito činitelé ovlivňují rychlost i samotný charakter korozního napadení. Korozní činitelé se nejčastěji dělí na vnitřní a vnější. [24]

Vnitřní činitelé

Jedním z představitelů tohoto typu činitelů je chemické složení kovů. Kovy v technické praxi obsahují různé příměsi. Ty mohou být žádoucí, např. pokud se jedná o legující prvky. Kovy však obsahují i nežádoucí příměsi, které negativně ovlivňují jejich vlastnosti. V obou případech mohou mít tyto příměsi významný vliv na proces koroze. Dalším faktorem, který se řadí mezi vnitřní činitele je struktura daného kovu. Zejména v případě vícefázových slitin. Struktura materiálu nezávisí pouze na chemickém složení, je možné ji výrazně ovlivnit zpracováním kovu. Proces koroze dále ovlivňuje i povrch kovů. Korozní procesy tak závisí i na způsobech opracování materiálu. Například při tryskání povrchu dochází ke vnášení pnutí do povrchových vrstev materiálu, a to následně přispívá k intenzivnějšímu průběhu koroze. Dalším faktorem jsou i samotné korozní produkty. Ty mohou mít v závislosti na materiálu různé povahy. Mohou přispívat k rychlosti koroze, v jiném případě nemusí mít žádný vliv na průběh koroze. V některých případech mohou mít korozní produkty i ochranný charakter a tím omezit další korozní procesy. [23, 24]

Vnější činitelé

Mezi vnější korozní činitele se řadí chemické složení prostředí, kterému je materiál vystaven. Korozní procesy závisí na kyselosti daného prostředí. Dalším vnějším činitelem je teplota, ta má vliv na průběh transportních dějů a chemických reakcí. Rychlost transportních dějů zvyšuje i rychlost proudění prostředí, kterému je materiál vystaven. [24]

2 Renovace

Ve strojírenství se tento pojem využívá pro opravování poškozených součástí. Renovací se označuje soubor operací, které vedou k navrácení nebo vylepšení vlastností dané součásti. Zároveň lze renovací navrátit součásti i její původní tvar. Součást, která podstoupí renovaci by měla být kvalitou na stejné úrovni jako součást nová.

[25, 26, 27]

Hlavní výhodou je především to, že není nutné vyřazovat opotřebenou součást a následně kupovat součást novou. Renovací součásti je možné výrazně snížit náklady, dochází tím k úspoře materiálu a energie, které by bylo potřeba vynaložit na výrobu nové součásti. Další výhodou je, že vhodně zvolenou metodou renovace lze prodloužit životnost strojní součásti ve srovnání s novými díly. Nejčastěji dochází k vyřazování strojních součástí z provozu kvůli opotřebením povrchových vrstev. Obecně se uvádí, že z tohoto důvodu je vyřazeno 80 – 90% strojních součástí. [25, 26, 27]

Opotřebené součásti je možné renovovat na opravné rozměry, principem je upravit opotřebenou povrchovou vrstvu, tak aby byl obnoven geometrický tvar dané součásti, její drsnost a poloha renovované plochy vůči ostatním částem součásti. Při tom dochází ke změně rozměrů strojní součásti na tzv. opravné rozměry. Součásti, která byla renovovaná na opravné rozměry je pak potřeba přizpůsobit součásti sdružené. Tedy součásti, které jsou v kontaktu s renovovanou součástí, a změna rozměrů ovlivní jejich vzájemnou funkčnost. [25, 26, 27]

Dalším způsobem je renovace opotřebených součástí na původní rozměr. Při tomto procesu je obnoven tvar povrchu i jeho původní rozměry. Zároveň mohou být některé vlastnosti povrchu upraveny, výsledný povrch tak může mít například vyšší tvrdost, nebo může být odolnější vůči korozi. [25, 26, 27, 28]

2.1 Obecný postup renovace

Nejdříve je nutné zhodnotit opotřebením součásti, především příčinu jeho vzniku a o jaký druh opotřebením se jedná. Dále je důležité vhodně zvolit metodu renovace, tu je nutné zvolit dle vlastností, které jsou od součásti očekávány. Následně je potřeba zvážit i podmínky v jakých se bude součást při jejím provozu nacházet. Po zvolení nejvhodnější technologie renovace je potřeba zvážit náklady, které je nutné vynaložit na zvolenou metodu renovace. [25, 26, 27]

3 Navařování

Jedná se o metalurgický proces, jehož principem je natavení základního a návarového materiálu, toho je docíleno vnějším zdrojem tepla. Tímto procesem může vzniknout vrstva slitiny základního a přídavného materiálu, nebo může dojít ke vzniku homogenní vrstvy kovu. [4, 27, 29]

Nejčastějšími zdroji tepla pro navařování jsou:

- laser
- plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem
- elektrický oblouk
- plazma [29]

Při navařování je důležité definovat rozdíl mezi povlakem a vrstvou. Jako vrstva se označuje případ, kdy navařovaný materiál zasahuje do struktury základního materiálu a opačně. Navařovaný a základní materiál jsou tedy difuzně promíseny. Termín povlak se používá v případě, že přídavný materiál nezasahuje do struktury základního materiálu. Navařováním lze vyšší korozivzdornosti nebo vyšší odolnosti proti kavitačnímu, adheznímu, eroznímu nebo abrazivnímu opotřebení. [29, 30, 31]

Důležité při navařování je, aby byla volena co nejmenší hloubka návaru. Tím je totiž možné omezit množství vneseného tepla a tím výrazně snížit výsledné vnitřní pnutí a deformace navařované součásti. Zároveň se nízkou hloubkou návaru snižuje obsah základního materiálu v návarovém kovu a nedochází k negativnímu ovlivnění vlastností navařovaného kovu. [29, 31]

Navařování je v současnosti nejvíce využíváno pro renovace strojních součástí, které jsou opotřebené a nesplňují tak požadované vlastnosti. Při renovaci je volen návarový materiál, který je chemickým složením podobný, nebo shodný se základním materiálem. Často se pro prodloužení životnosti součásti volí návarový materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi. Před samotnou renovací navařováním je nejprve nutné analyzovat druh opotřebení a specifikovat okolnosti, které vedly k jeho vzniku. Následně je možné na základě zjištěných informací zvolit vhodný návarový materiál a vhodnou technologii navařování. Poté je potřeba zvážit zjištěné skutečnosti a na jejich základě se rozhodnout, zda je navařování uskutečnitelné. Pokud je, následuje ekonomická rozvaha, zda se tato technologie renovace vyplatí. V naprosté většině případů je tato

metoda výhodná právě z ekonomického hlediska. Obecně se uvádí, že navařování se v naprosté většině případů pohybuje do 70% ceny nové součásti. [27, 29, 30, 31]

3.1.1 Výhody navařování

Návarový kov je se základním materiálem spojen metalicky. Pevnost tohoto spojení je minimálně na úrovni pevnosti základního materiálu, může být i vyšší. Navařováním lze na základní kov nanášet poměrně tlusté vrstvy přídavného materiálu, mohou to být i desítky milimetrů. Další výhodou může být i možnost tepelného zpracování, tím lze pozitivně ovlivnit výsledné vlastnosti návarového i základního materiálu. Při ručním navařování není potřeba vysoká počáteční investice. Ta je nutná, při automatizaci navařovacího procesu. Samotná automatizace je však i přes poměrně vysokou počáteční investici obrovskou výhodou navařování. Kombinací vhodně zvoleného přídavného materiálu a výkonných zdrojů tepla lze následně zvyšovat produktivitu navařování. [29, 31]

3.1.2 Nevýhody navařování

Jednou z hlavních nevýhod navařování je ovlivnění základního materiálu vysokou teplotou, tím dochází ke změně struktury materiálu, především se tak děje v tepelně ovlivněné oblasti. Vysoká teplota přispívá ke vzniku vnitřních pnutí v materiálu, to závisí i na dalších faktorech, mezi které patří i volba návarového materiálu nebo zvolená metoda navařování. Další nevýhodou navařování je obtížné vytváření tenkých vrstev návaru. Po navařování je také nutné, aby následovalo opracování povrchu, to se nejčastěji provádí broušením, nebo třískovým obráběním. Tím je dosaženo požadované drsnosti povrchu a rozměru součásti. [29, 31]

3.1.3 Předúprava povrchu

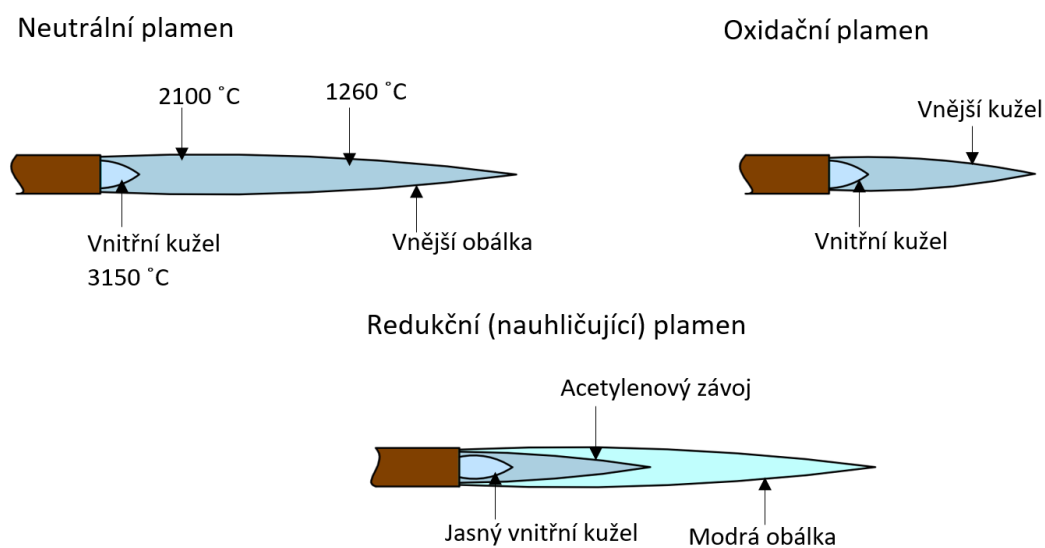
Před navařováním je nutné odstranit poškozený materiál, aby nedošlo k jeho roztavení. Tím by se zvýšil obsah základního materiálu v návarovém kovu, a byly by tak negativně ovlivněny mechanické vlastnosti navařeného kovu. Poškozený materiál je odstraňován broušením, nebo drážkováním. Odstraňování materiálu drážkováním se provádí speciální elektrodou. Obal této elektrody způsobuje silný proud plynů. Tyto plyny následně vyfukují roztavený materiál z místa poškození součásti. [30]

3.1.4 Způsoby navařování

Znalost různých způsobů navařování a jejich charakteristických vlastností je důležité, zejména pro volbu vhodné metody navařování pro konkrétní aplikaci. Při technologii navařování je důležitá znalost tavicí teploty přídatného i základního materiálu, dalším důležitým faktorem je relativní hustota těchto materiálů. Při podobných teplotách tavení, nebo pokud má základní materiál mírně vyšší teplotu tavení, nedochází většinou ke komplikacím. Příliš velký rozdíl teplot tavení materiálů způsobuje komplikace při navařování, nebo ho úplně znemožňuje. Nízká relativní hustota základního materiálu může způsobit, že při natavení základního materiálu dojde k „vyplavání“ částic tohoto materiálu do návaru a tím negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti. [29, 31]

3.1.5 Navařování plamenem

Jedná se o jednu z nejčastějších metod navařování, to zejména kvůli nízkým nákladům na provoz a technologické nenáročnosti. V naprosté většině případů probíhá navařování kyslíko-acetylenovým plamenem. Před navařováním plamenem probíhá většinou přehřev, který snižuje vznikající vnitřní pnutí a deformace materiálu. Při navařování přídatného kovu na ocelový základ se nejčastěji používá redukční plamen. Jeho výhoda spočívá v přebytku acetylenu, ten způsobuje nauhličení povrchu základu z oceli. To způsobí nižší teplotu tání povrchu, do taveniny se následně taví i návarový materiál. Tento proces způsobuje snížení podílu základního materiálu v návarovém kovu a tím nejsou negativně ovlivněny mechanické vlastnosti povrchu. Hloubka závaru při použití redukčního plamene je výrazně nižší, než je tomu u neutrálního plamene. [29, 31]



Obr.8: Druhy plamenů, vytvořeno autorem dle [32]

Plochy, na které bude nanášen návarový kov musí být předem připraveny, případné nerovnosti mohou způsobovat nežádoucí natavení základního materiálu do navařovaného kovu a tím negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti. [29, 31]

3.1.6 Navařování elektrickým obloukem

Technologie navařování, která využívá jako zdroj tepla elektrický oblouk je v porovnání s navařováním plamenem znatelně produktivnější, ovšem při navařování elektrickým obloukem dochází k vyššímu podílu základního materiálu v návarovém kovu, tím jsou samozřejmě negativně ovlivněny mechanické vlastnosti povrchu. To lze částečně eliminovat postupným nanášením vrstev přídavného materiálu. Dle navařovaného materiálu a tvaru součásti je nutné zvolit přehřev. Tím je sníženo vnitřní pnutí a riziko trhlin v součásti. Povrch musí být před navařováním řádně očištěn, aby nedošlo při tavení materiálu k degradaci návarového materiálu uvolněnými nečistotami. Po navaření by mělo následovat tepelné zpracování, žihání. Tím je opět sníženo riziko vzniku různých deformací a trhlin. [29, 31]

Nejčastější metody navařování využívající elektrický oblouk jako zdroj tepla jsou:

- navařování obalenou elektrodou (s bazickým obalem)
- navařování kontinuálně podávanou elektrodou (MIG, MAG)
- navařování pod tavidlem (SAW)
- navařování neodtavující se elektrodou (TIG/WIG) [29]



Obr.9: Metoda SAW [33]

3.1.7 Navařování plazmatem

Navařování plazmatem lze rozdělit do dvou základních skupin. Pokud je přídavný materiál přiváděn do návaru ve formě drátu, jedná se o metodu PAW (Plasma Arc Welding). Častěji se však používá metoda PTA (Plasma Transfer Arc), při tomto způsobu plazmového navařování je přídavný materiál dodáván do návaru ve formě prášku. [29, 34, 35]

Metoda plazmového navařování je založena na modifikaci elektrického oblouku. V případě metody PTA dochází k hoření elektrického oblouku mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem, to zajišťuje ionizaci (nebo disociaci a následně ionizaci) plynu protékajícího plazmovým hořákem, tím dochází ke vzniku plazmatu. Plazmovým plynem je inertní plyn, nejčastěji argon a jeho směsi s heliem, nebo vodíkem. [29, 34, 35]

Při plazmovém navařování je přídavný materiál (nejčastěji ve formě prášku) přidáván do proudícího plazmatu, a přenášen do svarové lázně. Navařovaný a základní materiál jsou spolu metalurgicky propojeny, tím jsou pozitivně ovlivněny mechanické vlastnosti navařované součásti a je to jedna z výhod navařování. Plazmatem lze vytvářet i návary poměrně velkých tloušťek, bez toho, aby došlo k významnému promísení základního a navařovaného materiálu. Tím je docíleno požadované čistoty návaru nejčastěji již v první vrstvě, a dochází tak ke snižování času potřebného pro navařování. Další výhodou použití plazmatu je přesnost návaru, tolerance výsledného povrchu se pohybuje v rozmezí 0,5 mm. A nejsou tak potřeba velké přídavky na obrábění. Také je tím sníženo i potřebný čas pro dokončovací operace. [29, 34, 35]

Při navařování pomocí plazmatu se nejčastěji používá stejnosměrný proud 40 – 250 A. Konstrukce hořáků je přizpůsobena druhu přídavného materiálu a také tvaru navařovaného povrchu. Samotný hořák je také ochlazován průtokem vody. Výslednými vlastnostmi je navařování plazmatem podobné navařování laserem, výhodou metody používající plazma je nižší počáteční investice. [29, 34, 35]

3.1.8 Navařování laserem

Tato technologie navařování je v porovnání s ostatními poměrně nová, ovšem kvůli vlastnostem této technologie se stává stále častěji používanou a nahrazuje starší technologie navařování. [29, 31]

Výhodou této technologie je nízké teplotní namáhání materiálu, laserový paprskem je schopen přivádět tepelnou energii bez toho, aby došlo k většímu tepelnému vlivu na okolí návaru. Při navařování laserem se teplota v místě návaru pohybuje kolem 36 °C, ve vzdálenosti do 1,5 mm (u kovů s velkou teplotní vodivostí) od místa kde byl prováděn návar materiálu. Při navařování elektrickým obloukem je teplota v místě návaru materiálu mnohonásobně vyšší a tím je tak několikanásobně větší tepelně ovlivněná oblast základního materiálu. Relativně nízká teplota u laserového navařování nezpůsobuje velké vnitřní pnutí, deformace a další negativní změny struktury základního materiálu, proto je tato technologie vhodná i pro součásti malých rozměrů. [29, 31, 36]

Návary laserem jsou vysoce kvalitní a přesné. Tím dochází ke snížení počtu a intenzity následujících úprav povrchu návaru. Jedná se o poměrně rychlou a efektivní metodu renovace strojních součástí. [29, 31, 36]

Samotný laser je usměrňován soustavou zrcátek a optických čoček až k základnímu materiálu. Do laserového paprsku se přivádí přídavný materiál, ve formě prášku, nebo drátu. Do místa návaru je přiváděn ochranný plyn, který chrání návar a zabraňuje jeho pórovitosti. [29, 31, 36]



Obr.10: Navařování laserem [37]

4 Žárové nástřiky

Touto metodou je možné vytvářet nové povlaky na povrchu základního materiálu. Princip žárových nástřiků spočívá v natavení přídavného materiálu, ten může být ve formě jemného prášku, nebo drátu. Natavené částice přídavného materiálu jsou rozprašovány proudem plynu na povrch základního materiálu. Zde jsou částice rozprostřeny a dochází u nich k rychlému tuhnutí. Tím vzniká výsledná struktura, ta se označuje jako lamelární, je tvořena tzv. splaty (rozprostřené částice). Tyto částice jsou k základnímu povrchu ukotveny mechanicky, při jejich rychlém tuhnutí dochází k jejich smrštění a tím vzniká velice pevný spoj založený na adhezni přilnavosti mezi základním a přídavným materiálem. Tím se výrazně liší od navařování, při navařování totiž dochází k ohřátí základního a přídavného materiálu nad teplotu liquidu. Dochází tak k vytvoření metalurgického spoje, jeho výhodou je vysoká pevnost, ovšem pokud je přídavný materiál výrazně naředěn základním, dochází ke zhoršení mechanických vlastností výsledného povrchu součásti. Při žárovém nástřiku má přídavný materiál teplotu blízkou teplotě tání, základní materiál má obvykle teplotu okolí. Při nanášení přídavného materiálu se teplota povrchu součásti zvyšuje, ovšem ve většině případů nepřesáhne 120 °C. Jednotlivé metody žárových nástřiků se rozdělují především podle zdroje energie, který natavuje přídavný materiál. Nejčastěji se při žárových nástřicích využívá elektrického oblouku, nebo kyslíko – acetylenového plamene. Ve specifických aplikacích se využívá i plazmatu. [23, 25, 38, 39, 40]

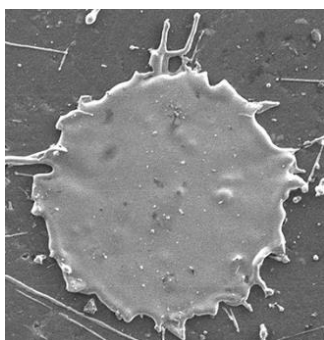
Vlastnosti výsledného povrchu jsou ovlivňovány řadou faktorů, jedná se například o přípravu povrchu základního materiálu pro nástřik, dále povlak ovlivňují i samotné parametry žárového nástřiku. Dalším faktorem, který ovlivňuje výslednou kvalitu je opracovávání povlaku na požadované rozměry součásti. [38]

Žárové nástřiky se používají pro:

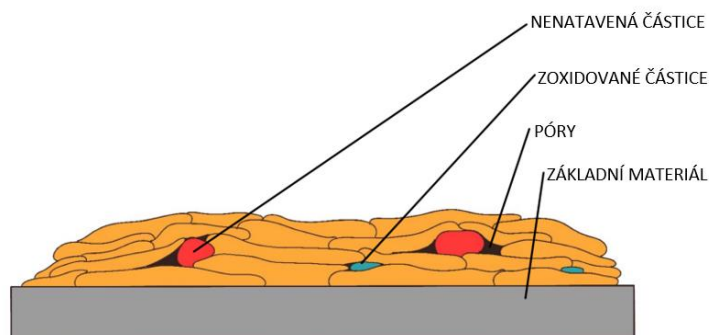
- odolnost proti korozi
- odolnost proti opotřebení
- odolnost proti vysokým teplotám
- dekorativní účely
- nanášení biokompatibilních materiálů
- nanášení elektricky vodivých povlaků
- renovace opotřebovaných strojních součástí [23, 25]

4.1 Struktura povlaku

Struktura povlaku vytvořeného žárovým nástřikem je téměř stejná pro všechny metody. Tato struktura je tvořena splaty, tedy zdeformovanými, rozprostřenými částicemi přídavného materiálu. Splaty jsou uspořádány ve vrstvách, z tohoto důvodu je struktura povlaku označována jako lamelární. V povlaku se mohou nacházet i nenatavené nebo částečně natavené částice přídavného materiálu, dále může povlak obsahovat i oxidické částice a póry. Přítomnost těchto nehomogenit, může výrazně ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti naneseného povlaku. [25, 38, 39, 40]



Obr.11: Splat [41]



Obr.12: Struktura žárového nástřiku, vytvořeno autorem dle [42]

4.2 Vlastnosti povlaku

Vlastnosti povlaků vytvářených metodou žárových nástřiků se dělí do dvou skupin. [38]

4.2.1 Vlastnosti obecného charakteru

Jedná se o souhrn vlastností, které se sledují u všech druhů žárových nástřiků. [38]

Vzhled povlaků

Kontrola vzhledu může probíhat prostým okem, případně lupou. Správně vytvořený povlak musí být souvislý a nanesený rovnoměrně. Dále se sleduje, zda vytvořený povlak neobsahuje viditelné póry nebo trhliny. Zrnitost povlaku je ovlivněna formou přídavného materiálu. [38]

Tloušťka povlaků

Tloušťku povlaku je možné určit destruktivními i nedestruktivními metodami. Důležité je, aby průměrná hodnota tloušťky vytvořeného povlaku byla vyšší než jeho jmenovitá tloušťka. Současně musí povlak splňovat podmínku, že všechny naměřené hodnoty tloušťky musí být vyšší než polovina jmenovité tloušťky daného povlaku. [38]

Tvrдость povlaků

Tvrдость povlaků vytvořených žárovým nástřikem je primárně závislá na chemickém složení daného přídavného materiálu. Zároveň však tvrдость povlaku mohou ovlivnit i jiné faktory, především metoda, jakou byl nástřik vytvořen a parametry této metody při nástřiku povlaku. [25, 38]

Přilnavost povlaků

Přilnavost udává sílu na určité ploše, která je nutná k odtržení daného povlaku. Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů povlaku, který má poměrně významný vliv na výslednou kvalitu naneseného povlaku. [25, 38]

Pórovitost povlaků

Povlak nanášený žárovým nástřikem obsahuje póry vždy, záleží ovšem na hustotě těchto pórů, tedy pórovitosti. Je ovlivňována zvolenou metodou a jejími parametry při samotném nanášení žárového nástřiku. [25, 38]

Drsnost povlaků

Ve většině případů následují po žárovém nástřiku mechanické úpravy povrchu podle požadavků na daný povrch. Drsnost povrchu po žárovém nástřiku ovlivňuje náklady na tyto úkony. Drsnost povlaku vytvořeného žárovým nástřikem je ovlivněna metodou a parametry zvolené metody při nanášení povlaku. [38]

4.2.2 Speciální vlastnosti povlaku

Tato skupina vlastností je sledována u konkrétních druhů nástřiků a bere v potaz jejich specifické pracovní podmínky, kterým bude povlak vystaven. [38]

Příklady speciálních vlastností povlaku:

- propustnost plynů
- odolnost proti vysokým teplotám
- korozní odolnost
- hustota povlaku
- odolnost proti teplotním změnám
- odolnost proti opotřebení [38]

4.3 Předúprava povrchu

Jedná se o nedílnou součást procesu všech metod nanášení žárového nástřiku. Předúprava povrchu silně ovlivňuje vlastnosti výsledného povlaku, zejména pak jeho přilnavost k základnímu materiálu. Před všemi mechanickými úpravami musí být povrch základního materiálu řádně odmaštěn a očištěn od hrubých nečistot a koroze. [38, 39]

Nejčastěji používané mechanické předúpravy jsou:

- tryskání
- obrábění
- broušení [38]

Cílem mechanické předúpravy je zvýšení přilnavosti povlaku. Mechanickými předúpravami dochází ke zdrsnění povrchu. Tvoří se tedy makronerovnosti, které zvětšují plochu, na kterou je povlak nanášen a zároveň připívají k pevnějšímu zakotvení povlaku na základním materiálu. Zdrsnění povrchu se využívá především při vytváření větších tloušťek povlaků. Velice častou metodou mechanické předúpravy je tryskání, při něm dochází kromě zdrsnění povrchu také k uvolnění meziatomových vazeb povrchových atomů, tím dochází k aktivaci povrchu. [38, 39]

4.4 Rozdělení metod žárových nástřiků

Metody žárových nástřiků se nejčastěji dělí dle zdroje tepla používaného pro natavování přídavného materiálu, který je nanášen na předem připravený povrch součásti. [38, 39]

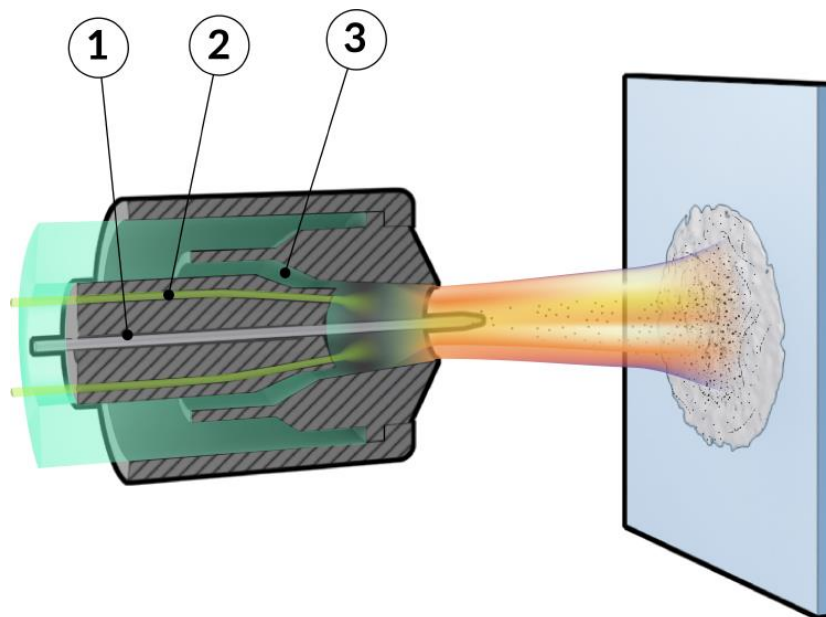
Rozdělení dle zdroje tepla:

- žárový nástřik plamenem
- plazmatický žárový nástřik
- žárový nástřik detonací
- žárový nástřik elektrickým obloukem
- žárový nástřik indukcí
- studený kinetický nástřik [38]

4.4.1 Žárový nástřik plamenem

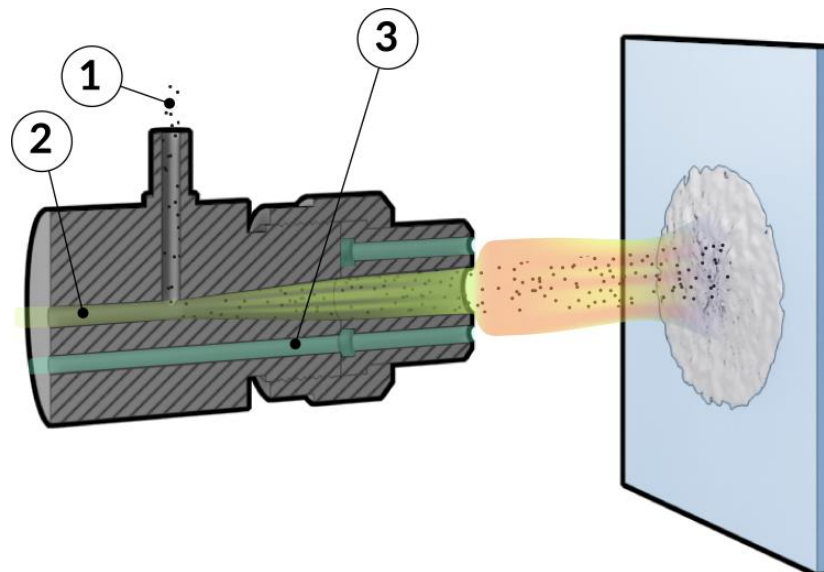
Jedná se o nejstarší technologii nanášení povlaku žárovým nástřikem. Přídavný materiál může být ve formě prášku či drátu. Tato metoda využívá tepla z chemické reakce hoření nejčastěji kyslíko–acetylenového plamene. V některých případech se používají i směsi jiných hořlavých plynů např. kyslík-propan-butan a kyslík-propylen. Do plamene se přivádí přídavný materiál, ten je zde následně nataven. Výstupní rychlost plamene je však příliš nízká na to, aby byly částice přídavného materiálu dostatečně urychleny pro požadované vlastnosti nanášeného povlaku, zejména jeho přilnavost. Z tohoto důvodu jsou částice nanášeného materiálu dodatečně urychlovány suchým a čistým stlačeným vzduchem. [38]

Žárový nástřik plamenem má svá omezení, při volbě přídavného materiálu je nutné si uvědomit, že kyslíko-acetylenový plamen dosahuje maximální teploty $\approx 3100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aby byl zaručen kvalitní povlak, s požadovanými vlastnostmi, je důležité volit přídavné materiály s teplotou tavení do $\approx 2600\text{ }^{\circ}\text{C}$. [38]



Obr.13: Žárový nástřik plamenem, přídavný materiál ve formě drátu, 1 – přídavný materiál (drát), 2 – hořlavá směs kyslíku a acetylenu, 3 –rozstřikovací vzduch [43]

Nejčastěji je přídavný materiál přiváděn do plamene středem (obr. 13), ve formě prášku nebo drátu. Tento centrální přívod umožňuje používat přídavné materiály s vyšší teplotou tavení, v porovnání s bočním přiváděním přídavného materiálu. Boční přívod se využívá převážně u přídavných materiálů ve formě prášku. [38]



Obr.14: Žárový nástřik plamenem, přídavný materiál ve formě prášku, 1 – vstup přídavného materiálu (prášku), 2 – vstup dopravního plynu, 3 – vstup směsi hořlavého plynu a kyslíku [44]

Přídavný materiál ve formě prášku je tvořen částicemi o rozměrech od 60 μm do 120 μm . V případě přídavného materiálu ve formě drátu, se průměry těchto drátů nejčastěji pohybují od 2 mm do 3,15 mm, lze však použít i větší průměry drátů. Metoda žárového nástřiku plamenem je založena na jednoduchém principu, to přispívá k její ekonomické nenáročnosti a širokému rozšíření, a to i přes některé její nevýhody, např. poměrně vysokou pórovitost naneseného povlaku. Tato metoda je tak vhodná především pro nenáročné aplikace, kde se klade velký důraz na náklady spojené s nákupem a provozem zařízení pro žárový nástřik. [38]

Vlastnosti povlaku naneseného touto metodou lze ovlivnit následujícími parametry:

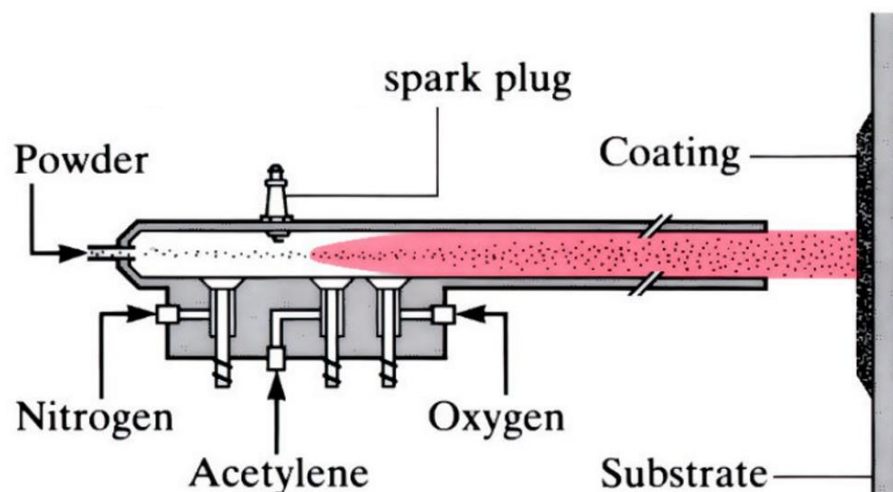
- poměr hořlavého plynu a kyslíku
- vzdálenost nástřiku
- tlak rozstřikovacího plynu
- druh a velikost přídavného materiálu
- množství přídavného materiálu [38]

4.4.2 Nástřik detonační vlnou

Jedná se o metodu využívající energii získanou spalovacím procesem plynů ve spalovací komoře. To umožňuje natavování částic přídavného materiálu a následně i jejich urychlení směrem k povrchu základního materiálu. [38, 39]

Do pracovní (spalovací) komory je jako palivo přiváděna směs kyslíku a hořlavého plynu, nejčastěji acetylen, dále se do spalovací komory přivádí i přídavný materiál ve formě prášku. V pracovní komoře je umístěna elektrická svíčka, která v určitých intervalech zapaluje směs plynů. V momentě zapálení směsi dochází k detonaci, částice přídavného materiálu jsou nataveny a současně urychleny k povrchu základního materiálu. Následně dochází k propláchnutí spalovací komory přivedením dusíku. Frekvence tohoto cyklu dosahuje až 100 detonací za minutu. [38, 39, 45]

Teplota plamene je podobná jako u žárového nástřiku plamenem, pohybuje se tedy v rozmezí od 2700 °C do 3100 °C. Rychlost částic přídavného materiálu je však výrazně vyšší, při nástřiku detonační vlnou bývá často rychlost těchto částic vyšší než 1000 m/s. Důsledkem vysoké rychlosti jsou výborné hodnoty přilnavosti (adheze) povlaku, většinou vyšší než 70 MPa. Nanesený povlak současně disponuje nízkou porozitou. Doporučovaná tloušťka naneseného povlaku touto metodou je 0,1-2 mm. Jedná se o poměrně ekonomicky nenáročnou metodu a lze jí nanášet nejrůznější typy přídavných materiálů. Nevýhodou této metody je především vysoká hluchnost. [38, 39, 45]



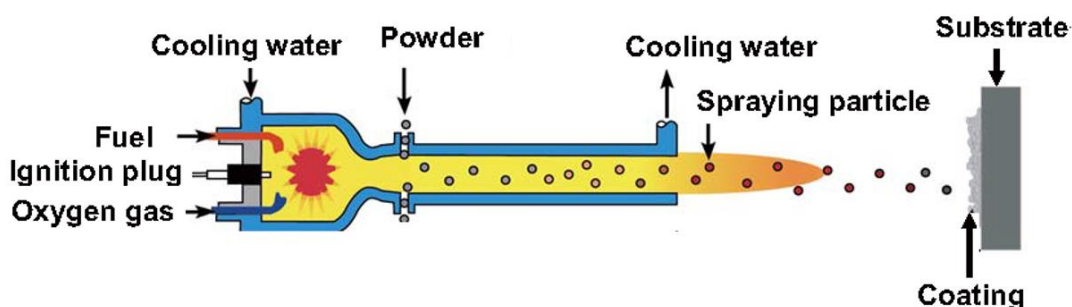
Obr.15: Nástřik detonační vlnou, Powder – prášek, Nitrogen – dusík, Acetylene – acetylen, Oxygen – kyslík, Spark plug – zapalovací svíčka, Coating – povlak, Substrate – základní materiál [46]

4.4.3 Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF

Jedná se o metodu založenou na podobném principu jako u žárového nástřiku detonační vlnou. Ve spalovací komoře dochází ke kontinuálnímu spalování paliva. V případě kapalného paliva se nejčastěji jedná o směs kyslíku a kerosinu, palivem však může být i směs plynů, nejčastěji kyslíku a propanu, či acetylenu. Následně dochází k urychlení produktů hoření pomocí konvergentně-divergentní trysky. V meziplášti hořáku proudí voda, která slouží k ochlazování. Přídavný materiál má formu prášku a je přiváděn nosným plynem (dusíkem) do plamene, kde dochází k natavení částic přídavného materiálu a jejich urychlení k povrchu základního materiálu. [38, 39, 40, 45]

Částicím přídavného materiálu je vlivem expandujících produktů hoření udělena velmi vysoká rychlost, až 1000 m/s. Důsledkem toho je vysoká přilnavost (>60 MPa), tedy silné zakotvení těchto částic na povrchu základního materiálu. Vysoká rychlost částic přídavného materiálu způsobuje také nízkou porozitu naneseného povlaku. [39, 45]

Teplota plamene se pohybuje v rozmezí od 2700 °C do 3100 °C, poměrně nízká teplota tak snižuje míru nežádoucí oxidace částic přídavného materiálu při jejich nanášení na povrch součásti. Zároveň tato teplota znemožňuje použití přídavných materiálů s vysokou teplotou tavení, částice takového materiálu by nebyly dostatečně nataveny a nedocházelo by ke správnému rozložení těchto částic. Výhodou této metody je nízká hodnota tepelného ovlivnění základního materiálu, jeho teplota je vždy nižší než 180 °C. Tedy výrazně nižší než teploty fázových přeměn ocelí. Nedochází tak tvoření pnutí a deformací v základním materiálu. [38, 39, 40, 45]

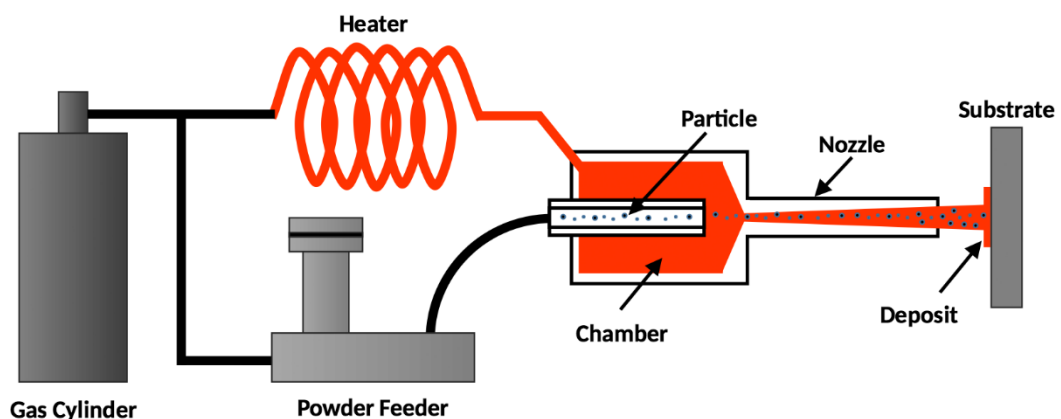


Obr.16: Vysokorychlostní nástřik plamenem, Cooling water – chladicí voda, Powder – prášek, Fuel – palivo, Ignition plug – zapalovací svíčka, Oxygen gas – kyslík, Spraying particle – stříkané částice, Substrate – základní materiál, Coating – povlak [47]

4.4.4 Studený kinetický nástřik

Tato metoda se od ostatních zásadně liší v teplotě aplikačního plynu. Ten má teplotu nižší než 700 °C a nedochází tak k natavení částic přídavného materiálu. Princip této metody spočívá v přehřevu aplikačního plynu, tím může být dusík, nebo hélium. Plyn je přehříván především pro zvýšení jeho tlaku, následně je společně s přídavným materiálem (ve formě prášku) přiváděn do Lavalovy konvergentně-divergentní trysky. Tím dochází k urychlování částic přídavného materiálu na velmi vysoké rychlosti, až 1200 m/s. Částice nejsou nataveny, k jejich zakotvení dochází využitím jejich kinetické energie a plastické deformace, ke které dochází při kontaktu částice se základním materiálem. Tato metoda se často používá pro nanášení povlaků především z měkkých kovů a jejich slitin (Al, Cu, Ag). [39, 45]

Výhodou této metody je, že při nanášení částic přídavného materiálu na povrch součásti nedochází k jejich natavení a tím je omezena jejich oxidace, nanesený povlak tedy v podstatě neobsahuje zoxidované částice. Zároveň při aplikaci povlaku nedochází k výraznému ohřívání základního materiálu, není tedy tepelně ovlivňována struktura základního ani přídavného materiálu, nedochází k tvoření výrazného pnutí v materiálu. Tato metoda je vhodná pro nanášení povlaků s poměrně velkou tloušťkou. Výsledný povlak vykazuje nízkou porozitu a poměrně vysokou přílnavost až 100 MPa. Nevýhodou této metody je omezená aplikace tvrdých a křehkých přídavných materiálů. Mezi nevýhody lze zařadit i vysoký průtok aplikačního plynu, tím i jeho vysokou spotřebu a náklady s ním spojené. [39, 45]



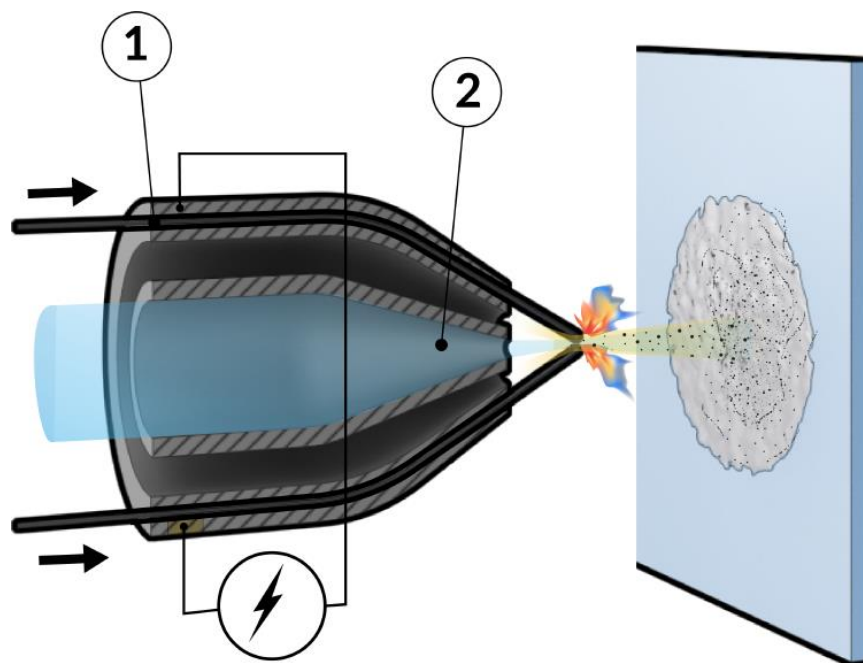
Obr.17: Studený kinetický nástřik, Heater – ohříváč, Particle – částice, Nozzle – tryska, Substrate – základní materiál, Gas cylinder – plynová láhev, Powder feeder – podavač prášku, Chamber – komora, Deposit – povlak [48]

4.4.5 Nástřik elektrickým obloukem

Tato metoda využívá k natavení přídavného materiálu teplo uvolňované hořením elektrického oblouku. Přídavný materiál je ve formě drátů, ty jsou přiváděny k sobě a následně mezi nimi dochází k hoření elektrického oblouku. Uvolněné teplo natavuje přídavný materiál, který je poté urychlován stlačeným plynem, (nejčastěji čistý, suchý vzduch) na povrch základního materiálu. Částice přídavného materiálu dosahují rychlosti až 240 m/s. [38, 39, 40, 45]

Pro tuto metodu žárového nástřiku existují jistá omezení přídavného materiálu, je důležité, aby byl elektricky vodivý a zároveň dostatečně plastický pro výrobu drátu. V některých případech je možné touto metodou vytvářet povlak z přídavných materiálů, které nemají požadované vlastnosti, toho lze docílit použitím trubičkových drátů, které umožňují zapálení a hoření elektrického oblouku. [38, 39, 40, 45]

Hlavní výhodou této metody je její jednoduchý princip, z toho pramení nízké provozní náklady. Současně se jedná o poměrně mobilní metodu s vysokým výkonem. Další výhodou je široké spektrum možných přídavných materiálů, i přes jistá omezení. Při tomto typu žárového nástřiku nedochází k výraznému teplotnímu ovlivnění základního materiálu. [38, 39, 40, 45]



Obr.18: Nástřik elektrickým obloukem, 1 – přídavný materiál, 2 – stlačený vzduch [49]

Touto metodou žárového nástřiku jsou nejčastěji nanášeny povlaky o tloušťce od 0,1 mm do 15 mm. Částice urychlované stlačeným vzduchem a nanášené na povrch základního materiálu mají výrazně nižší rychlost, než je tomu například u metody HVOF. Z tohoto důvodu má výsledný povlak vyšší porozitu a nedisponuje tak vysokou přílnavostí, ta je při této metodě maximálně 40 MPa. [38, 39, 40, 45]

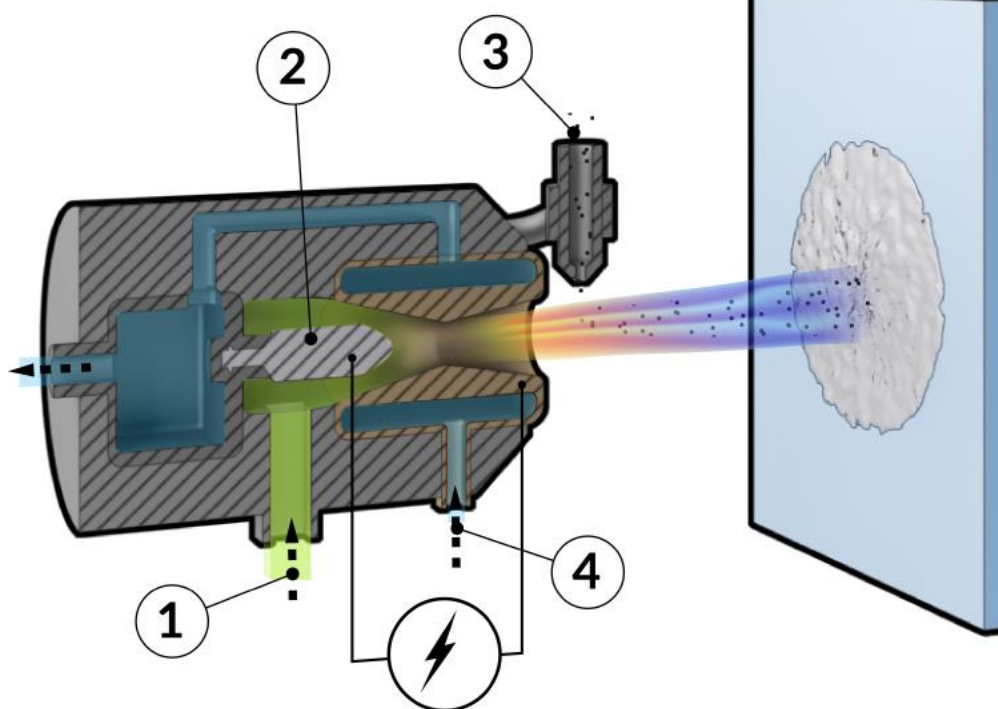
Výsledné vlastnosti naneseného povlaku jsou ovlivňovány těmito parametry:

- velikostí stříkacího proudu a napětí
- vzdáleností nástřiku
- množstvím naneseného přídavného materiálu
- tlakem rozstříkovacího plynu [38]

4.4.6 Plazmatický nástřik

Při plazmatickém nástřiku je hořák tvořen wolframovou katodou a měděnou anodou, která je zároveň i tryskou. Mezi těmito elektrodami hoří elektrický oblouk a dochází k ionizaci plazmotvorného plynu, ten je do hořáku napouštěn axiálně a elektrický oblouk ho přivádí do stavu plazmatu. Nejčastěji se jako plazmotvorný plyn používá argon, vodík, nebo dusík. Následně z výstupní trysky, která je chlazená vodou vystupuje plazma o velmi vysoké teplotě až 20000 K. Do plazmatu je nosným plynem dopravován přídavný materiál ve formě prášku, ten je při vysoké teplotě nataven a urychlen k povrchu základního materiálu. Částice přídavného materiálu mohou při nanášení na povrch součásti dosahovat rychlosti až 400 m/s. [38, 39, 45, 50]

Existuje mnoho typů konstrukcí hořáků pro plazmový nástřik. Mohou se lišit například velikostí elektrod, nebo jejich tvarem. Změna velikosti a tvaru elektrod může ovlivnit i průtok plynů a tím změnit i množství uvolňovaného tepla. Existují i různé typy vstupu přídavného materiálu do plazmatu, tím je ovlivněno jeho natavování. Všechny tyto parametry mají poměrně velký vliv na výsledný povlak nanesený na základním materiálu. [38, 39, 45, 50]



Obr.19: Plazmatický nástřík, 1 – vstup plazmotvorného plynu, 2 – katoda, 3 – prášek, 4 – vstup chladicí vody [51]

Tato metoda žárového nástříku umožňuje díky vysoké teplotě plazmatu nanášet nejrůznější typy základních materiálů. Přítomnost vysoké teploty však může být i nevýhoda, přispívá k oxidaci, způsobuje fázové přeměny a může docházet i k vyhoření některých prvků během nástříku. Mezi nevýhody se řadí i složitost a náročnost celé metody. Porozita výsledného povlaku je podobná jako u metody nástříku elektrickým obloukem, přilnavost povlaku je vyšší a dosahuje až 70 MPa. [38, 39, 45, 50]

Vlastnosti povlaku naneseného metodou plazmatického žárového nástříku lze ovlivnit řadou parametrů:

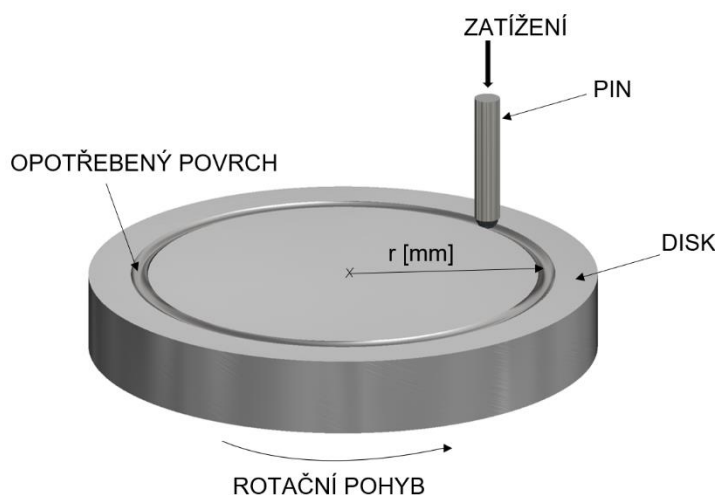
- velikostí plazmového proudu
- velikostí napětí plazmového paprsku
- množstvím dopravního plynu
- množstvím plazmotvorného plynu
- vzdáleností nástříku
- množstvím přídavného materiálu [38]

5 Tribometrie

Tribometrie se zabývá měřením a vyhodnocováním tření a opotřebení. Je zaměřena také na testování maziv. K vyhodnocování těchto aspektů se používají tribometry, tedy zařízení konstruovaná speciálně pro tyto účely. Tato zařízení se mohou dělit do několika skupin, dle typu opotřebení, pro které je zařízení určeno. Existují tedy tribometry určené speciálně pro abrazivní, adhezivní, nebo například kavitační opotřebení. Dále se tribometry mohou rozdělovat dle povahy styku třecích ploch. Kontakt mezi třecími plochami může být plošný, liniový nebo bodový. Níže jsou uvedeny nejčastější typy tribometrů. [52, 53]

5.1 Metoda PIN-on-DISC

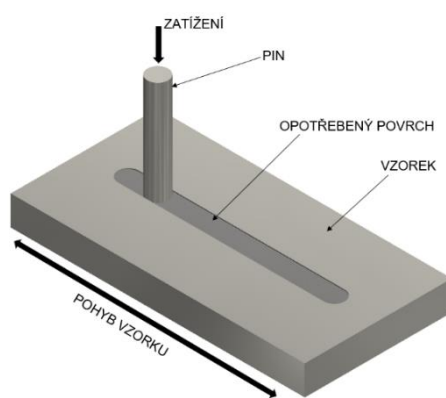
Princip této metody spočívá v rotačním pohybu vzorku. Rychlost rotace vzorku a počet otáček se stanoví před začátkem testu. Na vzorek je umístěn „PIN“. Tedy tělísko, které je zatěžováno předem definovanou normálovou silou. Zatěžující síla může být vyvíjena závažím, hydraulicky, nebo pružinou. Tělísko může mít tvar kuličky, nebo válce. V případě válce je místem dotyku jeho čelní plocha. Tělísko je upevněno na rameni a přiloženo na konkrétní vzdálenosti od středu vzorku. Během testu je měřen koeficient tření, po skončení testu se analyzuje rozsah poškození. Analyzuje se například tvar a hloubka vzniklé stopy. Výsledky tohoto testování závisí na řadě parametrů, jedním z těchto parametrů je vhodně zvolený materiál tělíska. Dalším parametrem jsou vlastnosti okolního prostředí, zejména teplota a vlhkost. Výsledky testování pak ovlivňuje i velikost zatížení tělíska, nebo celková doba testu (počet otáček). [53, 54, 55]



Obr.20: Metoda PIN-on-DISC, vytvořeno autorem dle [56]

5.2 PIN-on-PLATE

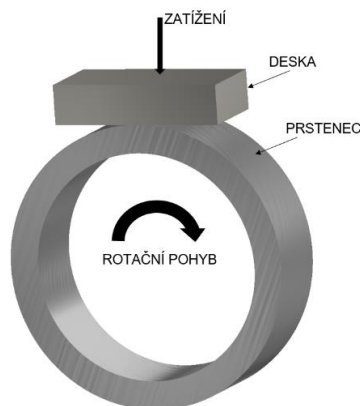
Tato metoda je založena na podobném principu jako metoda PIN-on-DISC. Na vzorku je umístěn „PIN“, toto tělíčko může být ve tvaru kuličky, nebo válečku. V případě válečku je „PIN“ na vzorek umístěn čelní plochou. Podobně jako u předchozí metody je tělíčko upevněno na rameni a zatěžováno předem definovanou normálovou silou. Testovaný vzorek je po celou dobu testu v pohybu. Metoda je specifická tím, že při testování dochází k lineárnímu vratnému pohybu, který je v praxi důležitý pro specifické třecí mechanismy. Po dobu testu přístroj zaznamenává třecí sílu, ze které je následně určen koeficient tření. [57, 58]



Obr.21: Metoda PIN-on-PLATE, vytvořeno autorem dle [57]

5.3 BLOCK-on-RING

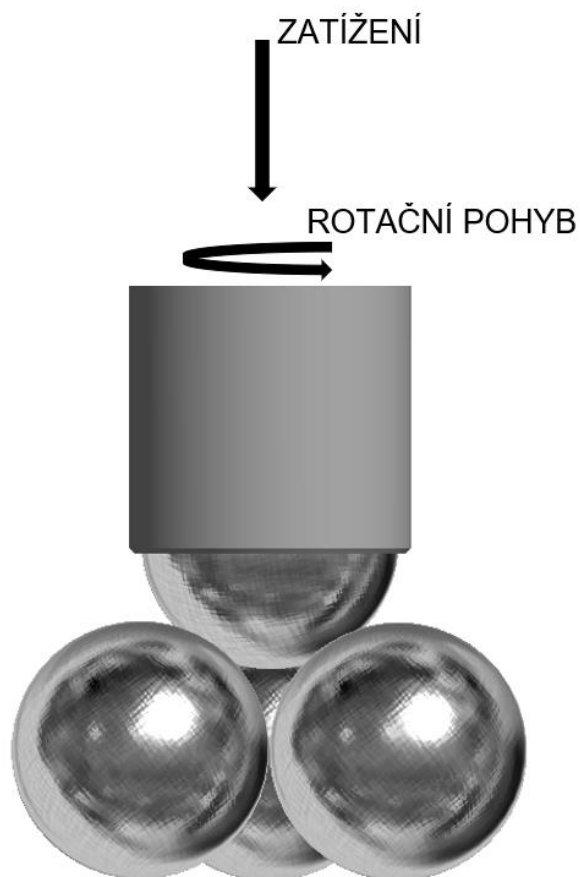
Zařízení toho typu pracuje na principu rotujícího prstence. Tento prstenec se po svém obvodu dotýká destičky a dochází mezi nimi ke tření. Kontakt mezi těmito díly je liniový. Deska je po dobu testování upevněna na rameni a zatěžována předem definovanou konstantní silou. Prstenec při testu rotuje také předem určenou rychlostí. Po ukončení testu je analyzován rozsah poškození. [59, 60]



Obr.22: Metoda BLOCK-on-DISC, vytvořeno autorem dle [61]

5.4 Four ball test

Jedná se o poměrně častou metodu testování opotřebení a lubrikačních vlastností mazacích prostředků. Při tomto testu jsou použity čtyři kuličky, z toho tři jsou pevně uloženy v přípravku a jedna vykonává rotační pohyb. Rotující kulička je po dobu testu zatěžována předem definovanou silou. Kuličky jsou vůči sobě vzájemně vystředěny, z počátku testu jsou v bodových kontaktech. V průběhu testu dochází k opotřebení kuliček a tím se zvětšuje i jejich vzájemná kontaktní plocha. Po skončení testu se analyzuje rozsah opotřebení na kuličkách. [62]

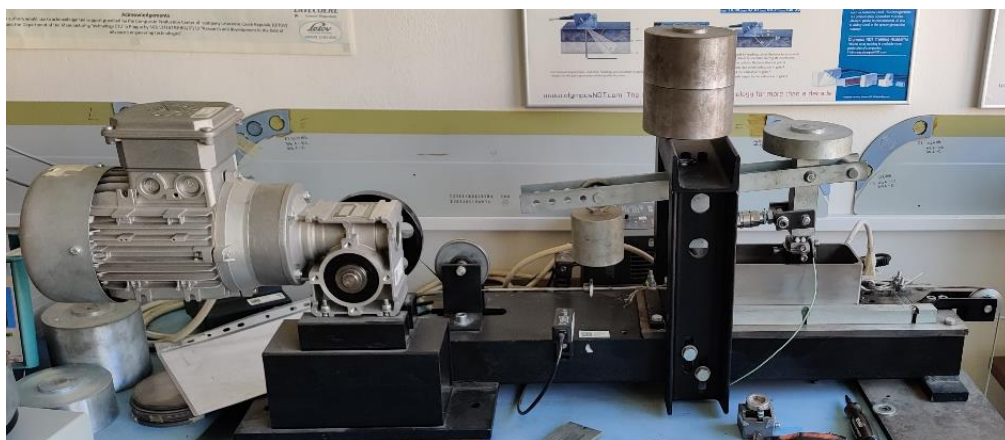


Obr.23: Metoda 4 - ball test, vytvořeno autorem dle [62]

6 Experimentální část

Experimentální část práce je zaměřena na testování třecích dvojic. Tyto dvojice jsou tvořeny vždy jedním z pěti testovaných vzorků a testovací deskou z oceli S235. Testované vzorky se od sebe vzájemně liší chemickým složením. U třecích dvojic byl otestován jejich dynamický a statický součinitel smykového tření. Zároveň byla vyhodnocena i intenzita opotřebení jednotlivých vzorků. Ta byla stanovena na základě hmotnostních úbytků testovaných vzorků v průběhu testu.

Tribologický experiment probíhal na tribometru, který má k dispozici Ústav strojírenské technologie ČVUT v Praze. Jedná se o tribometr TOP3. Tento přístroj převádí rotační pohyb elektromotoru na lineární vratný pohyb testovaného vzorku. Vzorek o průměru 15 mm je při testu zatížen předem stanoveným závažím, v tomto případě bylo použito závaží o hmotnosti 2 kg. Závaží působí na vzorek normálovou silou. Celý průběh tribologického testu je zaznamenáván v počítačovém programu. Z naměřených dat lze vyhodnotit dynamický i statický součinitel smykového tření. Statický součinitel smykového tření se uvažuje při počátku pohybu, dynamický součinitel smykového tření se uvažuje při pohybu tělesa. Tribometr TOP3 může zaznamenávat oba tyto součinitele, protože testovaný vzorek se pohybuje lineárním vratným pohybem. Tato vlastnost tribometru TOP3 je jednou z jeho hlavních předností v porovnání s tribometry, které využívají pouze rotační pohyb vzorku, takové tribometry jsou schopny zaznamenávat pouze dynamický součinitel smykového tření.



Obr.24: Tribometr TOP3

6.1 Chemické složení vzorků

Chemické složení jednotlivých vzorků bylo otestováno pomocí spektrometru BAS Delta. Při měření tímto spektrometrem může dojít k drobným odchylkám hodnot obsahu prvků v daném materiálu proti jeho reálnému složení. Tato drobná nepřesnost může být způsobena například přítomností oxidů daného prvku ve vzorku. Tyto drobné nepřesnosti by neměli mít významný vliv na výsledky tribologického testu.



Obr.25: Spektrometr BAS Delta [63]

Tab.1: Chemické složení vzorku č.1

Vzorek č. 1									
Prvek	Cu	Ti	Zr	Si	Zn	Cr	Fe	V	Mn
Obsah [%]	35,2	19,2	14,7	9,5	9,1	5,7	4,6	2	0,1

Tab.2: Chemické složení vzorku č.2

Vzorek č. 2								
Prvek	Cu	Zn	Al	Si	Zr	Sn	Cr	Fe
Obsah [%]	71	8,2	5,9	4,8	3,6	3,1	2,4	0,9

Tab.3: Chemické složení vzorku č.3

Vzorek č. 3								
Prvek	Si	Cu	Ti	Fe	V	Mn	Zr	Ni
Obsah [%]	31	22,5	20,4	14,6	9,5	1,6	0,4	0,1

Tab.4: Chemické složení vzorku č.4

Vzorek č. 4									
Prvek	Cu	Ti	Zr	Zn	Cr	Si	V	Fe	Mn
Obsah [%]	39,2	21,5	17,3	9,5	5,6	3,4	2,3	1,1	0,2

Tab.5: Chemické složení vzorku č. 5

Vzorek č. 5						
Prvek	Cu	Ni	Sn	Si	Fe	Cr
Obsah [%]	53,3	22	8,6	7,9	4,5	3,7

6.2 Příprava tribologického testu

Před samotným tribologickým testem bylo nutné provést několik úkonů. Prvním bylo změření drsnosti třecích dvojic. Tedy drsnost vzorků i drsnost testovacích desek. Toto měření bylo provedeno, aby bylo možné vzájemně porovnávat výsledky jednotlivých vzorků, které byly testovány na různých testovacích deskách. Velké rozdíly v drsnosti, by ovlivnily hodnotu koeficientu smykového tření dané třecí dvojice. Dalším úkonem před testem bylo změření hmotnosti vzorků. Hmotnost vzorků před tribologickým testem je důležitá pro stanovení hmotnostních úbytků testovaných vzorků v průběhu testu. Tyto data slouží pro porovnání intenzity opotřebení. Před tribologickým testem byla digitálním posuvným měřítkem změřena i tloušťka každého vzorku. Všechna tato měření byla provedena vícekrát, aby výsledné hodnoty byly co nejméně ovlivněné nepřesnostmi v měření. Pro měření drsnosti byl použit drsnoměr Mitutoyo. Hmotnost vzorků byla měřena na analytické váze Ohaus EP214C Explorer Pro. Posuvné měřítko bylo použito SHAHE/5100-200.



Obr.26: Analytická váha
Ohaus EP214C Explorer Pro [64]



Obr.27: Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [65]



Obr.28: Digitální posuvné měřítko SHAHE/5100-200 [66]

6.3 Měření na tribometru TOP3

Hodnoty drsnosti před tribologickým testem

Tab.6: Drsnost vzorků před testem

Vzorek	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Ra [μm]	4,15	3,48	2,73	3,36	2,57
Rz [μm]	26,21	23,44	19,86	21,24	17,43

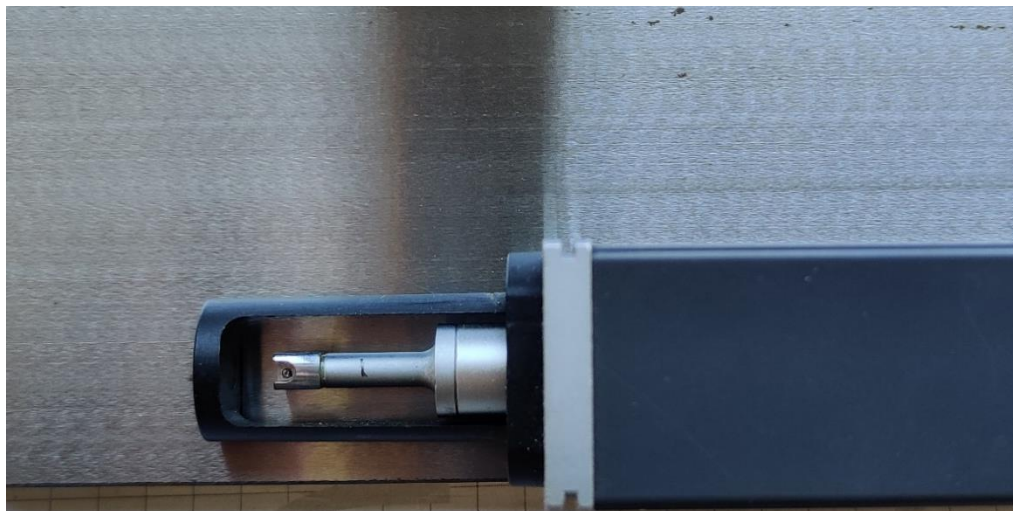
Tab.7: Drsnost testovacích desek před testem

Testovací deska	č. 1	č. 2
Ra [μm]	0,26	0,25
Rz [μm]	1,76	1,72

Hodnoty drsnosti po tribologickém testu

Tab.8: Drsnost vzorků po testu

Vzorek	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Ra [μm]	3,87	3,32	2,57	3,15	2,23
Rz [μm]	24,56	21,78	19,57	19,94	16,85



Obr.29: Měření drsnosti testovací desky

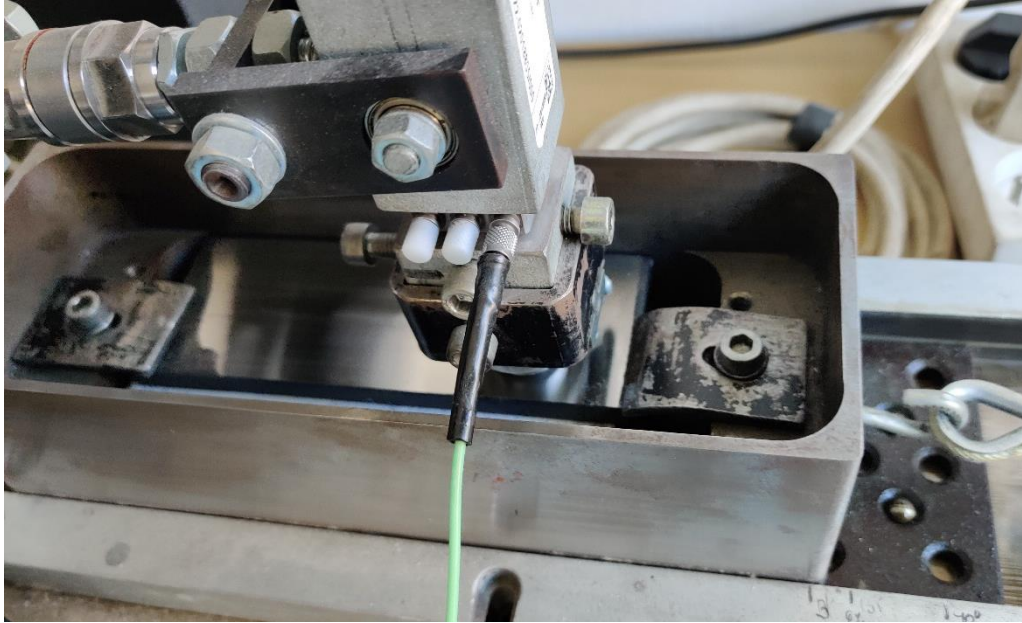
6.4 Popis metodiky měření na tribometru TOP3

Před samotným spuštěním testu, se upne do pohyblivého vozíku tribometru zkušební deska. Materiál testovací desky byla ocel S235. Testovací deska byla řádně očištěna, aby nedošlo k ovlivnění výsledků tribologického testu přítomností různých mastnot a nečistot. Následně byl do tribometru upnut vždy i testovaný vzorek, ten musel být také řádně očištěn, podobně jako testovací deska. Před testem byly změřeny jeho vstupní parametry, tedy tloušťka, hmotnost a drsnost. Po upnutí testovaného vzorku bylo na tribometr umístěno závaží o hmotnosti 2 kg, které vyvíjí na vzorek normálovou sílu o velikosti 19,62 N. Zařízení je nastaveno pro spuštění testování do jedné z úvratí pohybu. Následně je možno spustit samotný test. Vzorek při testu vykonává lineární přímočarý vratný pohyb. Průběh třecí síly je zaznamenáván pomocí softwaru, z něhož je následně nutné vyhodnotit součinitele smykového tření.

Testování probíhá v cyklech časově oddělených po 10 minutách, z tribometru se vyjme testovaný vzorek. Následně se očistí od částic, které vznikaly v důsledku pohybu vzorku po testovací desce. Po očištění následovalo změření tloušťky vzorku. Dalším krokem bylo pak změření hmotnosti vzorku, z toho je pak stanoven hmotnostní úbytek. Tento úbytek slouží k posouzení intenzity opotřebení daného vzorku. Z tohoto důvodu je důležité, aby vzorek byl řádně očištěn od částic vzniklých pohybem vzorku po testovací desce. Jinak by došlo k ovlivnění hodnot hmotnostních úbytků.

Po tomto dílčím měření testovaného vzorku následovalo očištění testovací desky, která byla upnuta v tribometru. Na té se také nacházely částice, které vznikaly pohybem vzorku po testovací desce. Tyto částice by mohly ovlivnit další testování třecí dvojice. Po očištění testovací desky byl vzorek upnut opět do tribometru, následně byl zatížen závažím a umístěn do krajní polohy svého pohybu. Následně byl tribometr opět spuštěn po dobu deseti minut, poté se celý proces opakoval.

Každý vzorek byl měřen v šesti intervalech. Při měření byly použity hygienické rukavice, které zamezovaly přenosu nečistot přítomných na rukách, tím byl vyloučen další parametr, který by mohl ovlivnit výsledky měření.



Obr.30: Detailní pohled na tribometr TOP3

6.5 Vyhodnocení měření koeficientu smykového tření

Třecí síla působící proti pohybu vzorku byla po dobu tribologického testu zaznamenávána snímačem a přenášena do vyhodnocovací jednotky Kistler. Tato vyhodnocovací jednotka byla kabelem propojena s počítačem. Data z měření jsou graficky znázorňována v počítačovém programu Charge Meter 5015A. [67]

Získaná data tvoří textový soubor. Jednotlivá měření představují měřené stopy. Každá stopa byla následně pomocí počítačového programu vyhodnocována. Tento program byl sestaven speciálně pro vyhodnocování měření na tribometru TOP3 a pracuje v softwaru Matlab. [67]

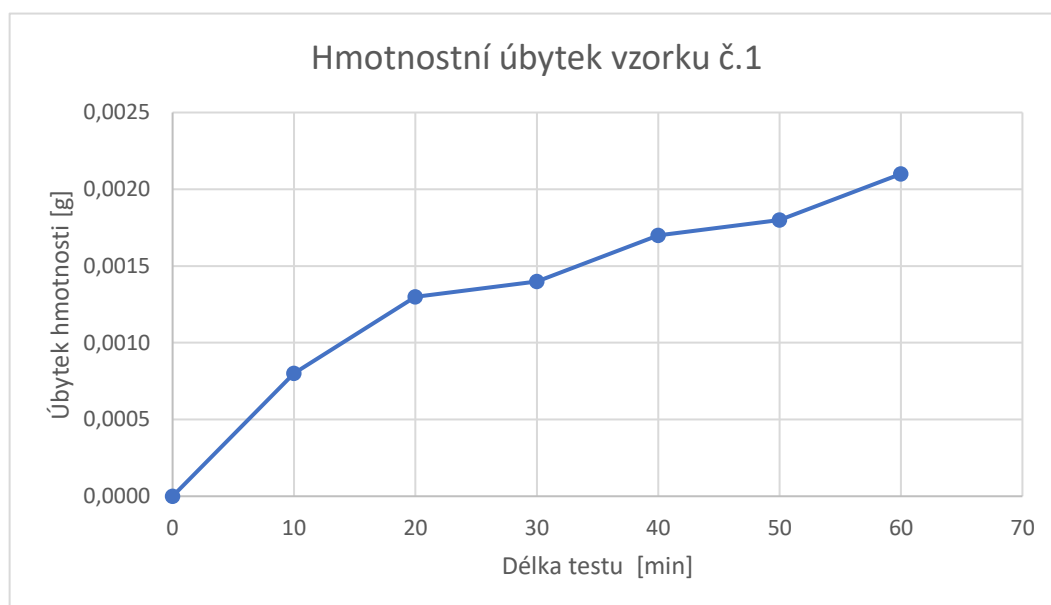
6.5.1 Naměřené hodnoty pro vzorek č.1



Obr.31: Vzorek č.1

Tab.9: Naměřené hodnoty vzorku č.1

Délka testu [min]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Úbytek hmotnosti [g]
0	4,005	3,4241	0,0000
10	3,995	3,4233	0,0008
20	3,995	3,4228	0,0013
30	3,990	3,4227	0,0014
40	3,990	3,4224	0,0017
50	3,985	3,4223	0,0018
60	3,985	3,4220	0,0021



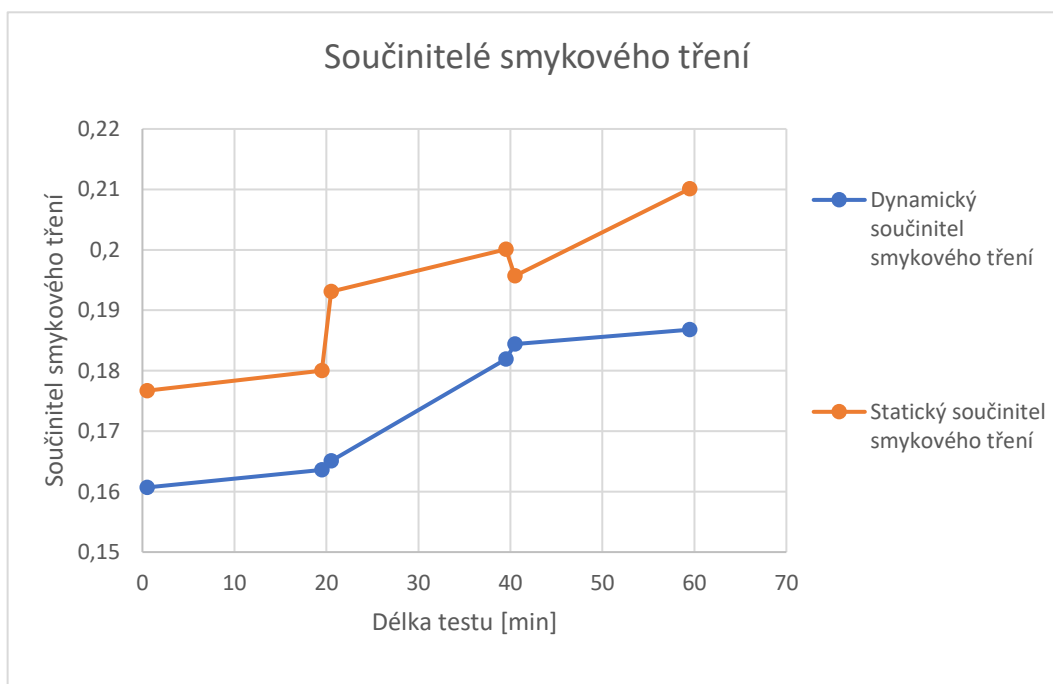
Obr.32: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.1



Obr.33: Vzorek č.1 s testovací deskou

Tab.10: Součinitelé smykového tření vzorku č.1

Časový interval [min]	20		40		60	
Úsek [s]	20 - 40	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180
μ_d	0,1607	0,1636	0,1651	0,1819	0,1844	0,1868
μ_s	0,1767	0,1800	0,1931	0,2001	0,1957	0,2101



Obr.34: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.1

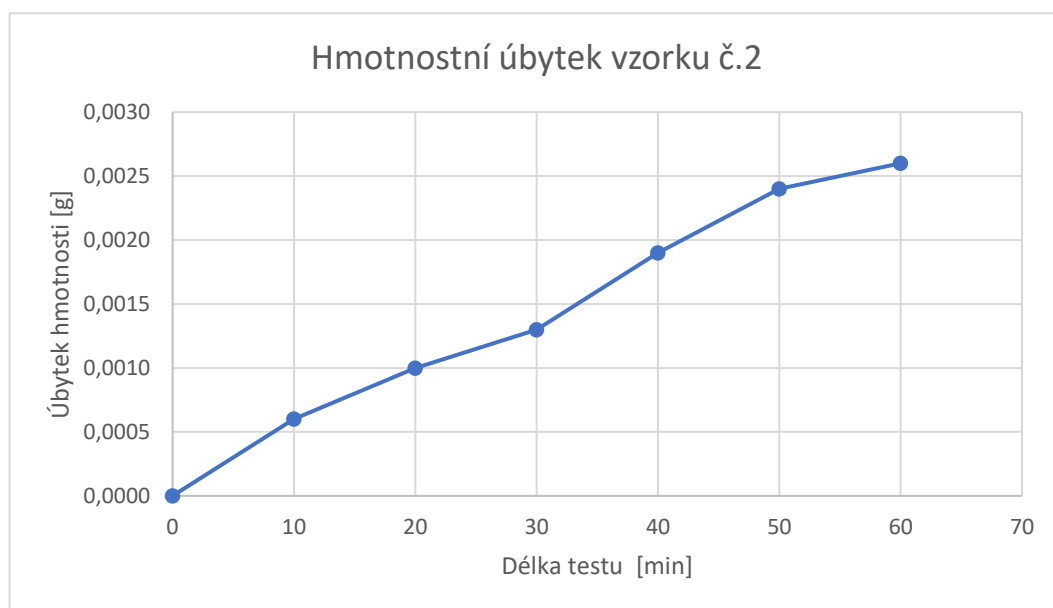
6.5.2 Naměřené hodnoty pro vzorek č.2



Obr.35: Vzorek č.2

Tab.11: Naměřené hodnoty vzorku č.2

Délka testu [min]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Úbytek hmotnosti [g]
0	3,965	2,1583	0,0000
10	3,965	2,1577	0,0006
20	3,965	2,1573	0,0010
30	3,960	2,1570	0,0013
40	3,960	2,1564	0,0019
50	3,960	2,1559	0,0024
60	3,960	2,1557	0,0026



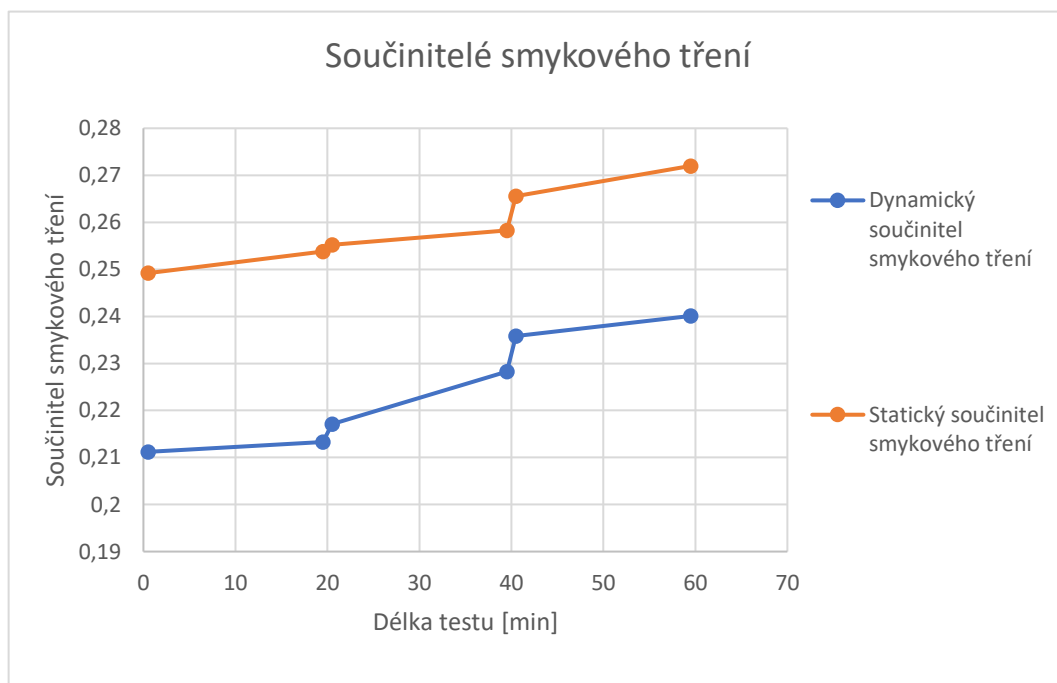
Obr.36: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.2



Obr.37: Vzorek č.2 s testovací deskou

Tab.12: Součinitelé smykového tření vzorku č. 2

Časový interval [min]	20		40		60		
	Úsek [s]	1160 - 1180	Úsek [s]	1160 - 1180	Úsek [s]	1160 - 1180	
μ_d	20 - 40	0,2112	0,2133	0,2171	0,2283	0,2358	0,2401
μ_s	20 - 40	0,2552	0,2583	0,2492	0,2538	0,2656	0,2720



Obr.38: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.2

6.5.3 Naměřené hodnoty pro vzorek č.3



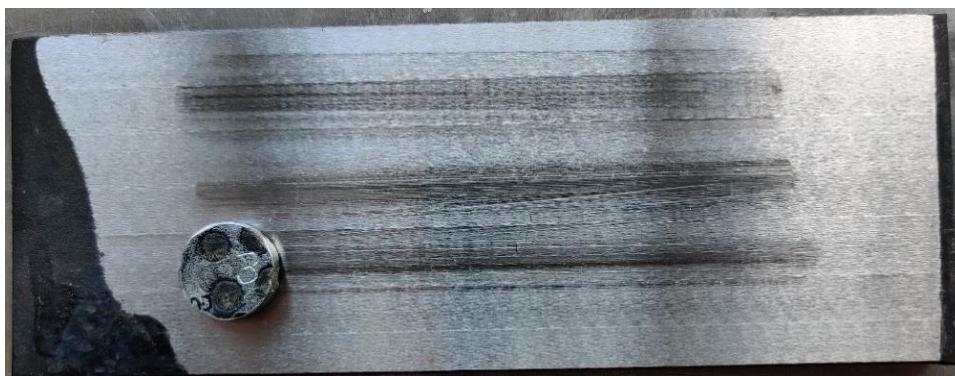
Obr.39: Vzorek č.3

Tab.13: Naměřené hodnoty vzorku č.3

Délka testu [min]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Úbytek hmotnosti [g]
0	3,995	2,5314	0,0000
10	3,985	2,5309	0,0005
20	3,98	2,5303	0,0011
30	3,975	2,5318	-0,0004
40	3,970	2,5319	-0,0005
50	3,970	2,5318	-0,0004
60	3,970	2,5305	0,0009



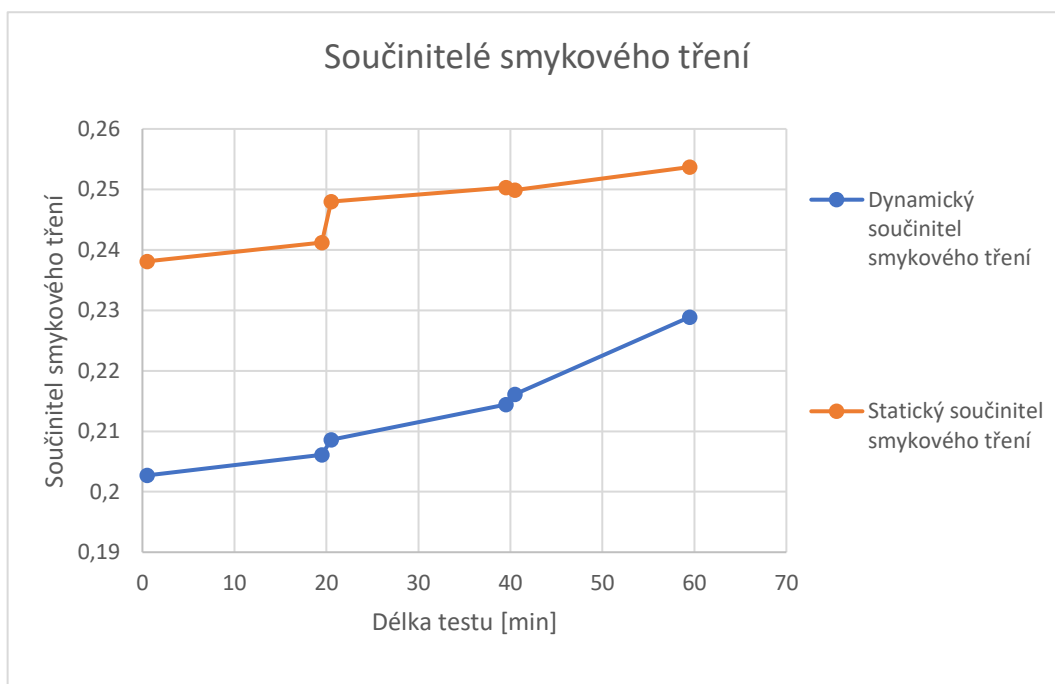
Obr.40: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.3



Obr.41: Vzorek č.3 s testovací deskou

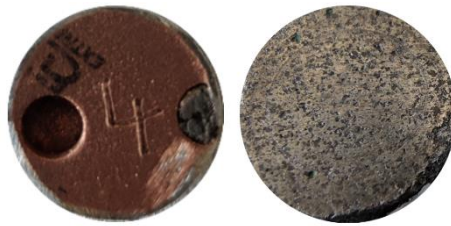
Tab.14: Součinitelé smykového tření vzorku č.3

Časový interval [min]	20		40		60	
	Úsek [s]	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180
μ_d	0,2027	0,2061	0,2086	0,2144	0,2161	0,2289
μ_s	0,2381	0,2412	0,2480	0,2503	0,2499	0,2537



Obr.42: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.3

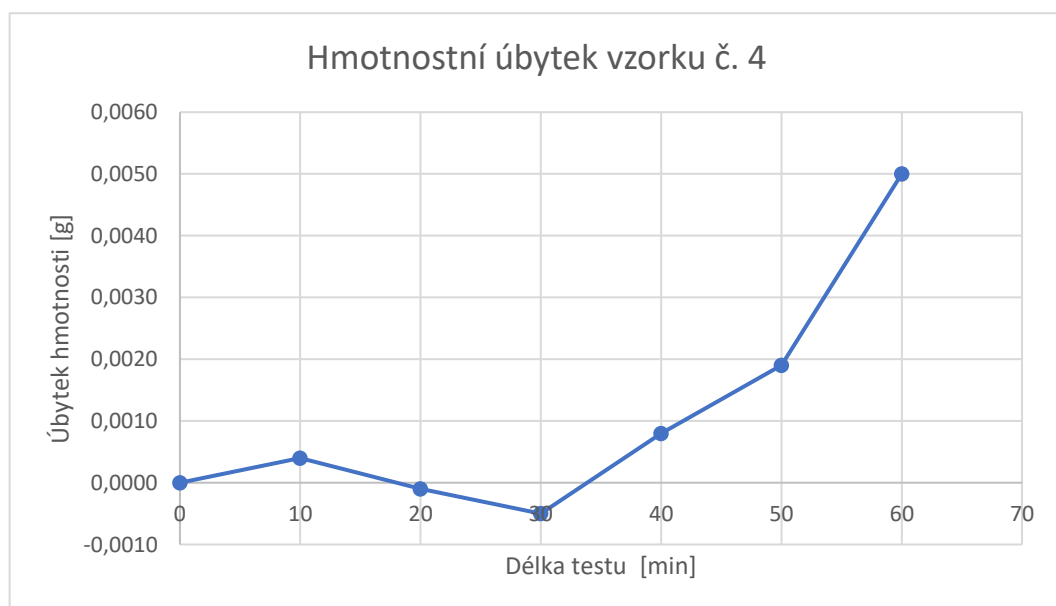
6.5.4 Naměřené hodnoty pro vzorek č.4



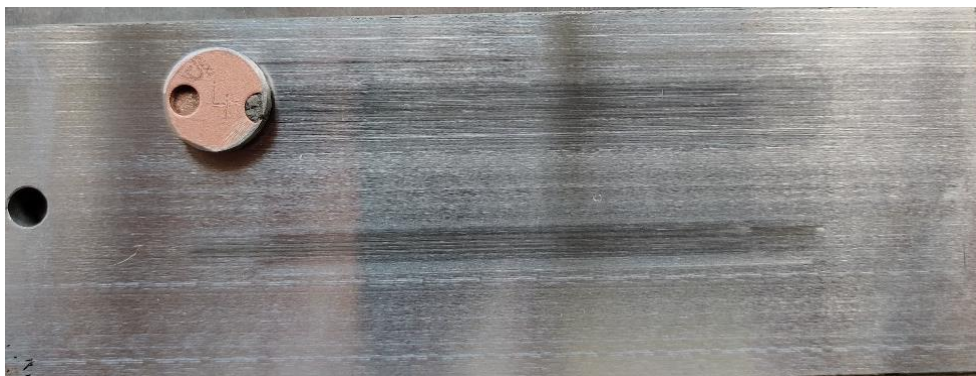
Obr.43: Vzorek č.4

Tab.15: Naměřené hodnoty vzorku č.4

Délka testu [min]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Úbytek hmotnosti [g]
0	3,940	2,9859	0,0000
10	3,93	2,9855	0,0004
20	3,93	2,9860	-0,0001
30	3,920	2,9864	-0,0005
40	3,920	2,9851	0,0008
50	3,905	2,9840	0,0019
60	3,905	2,9809	0,0050



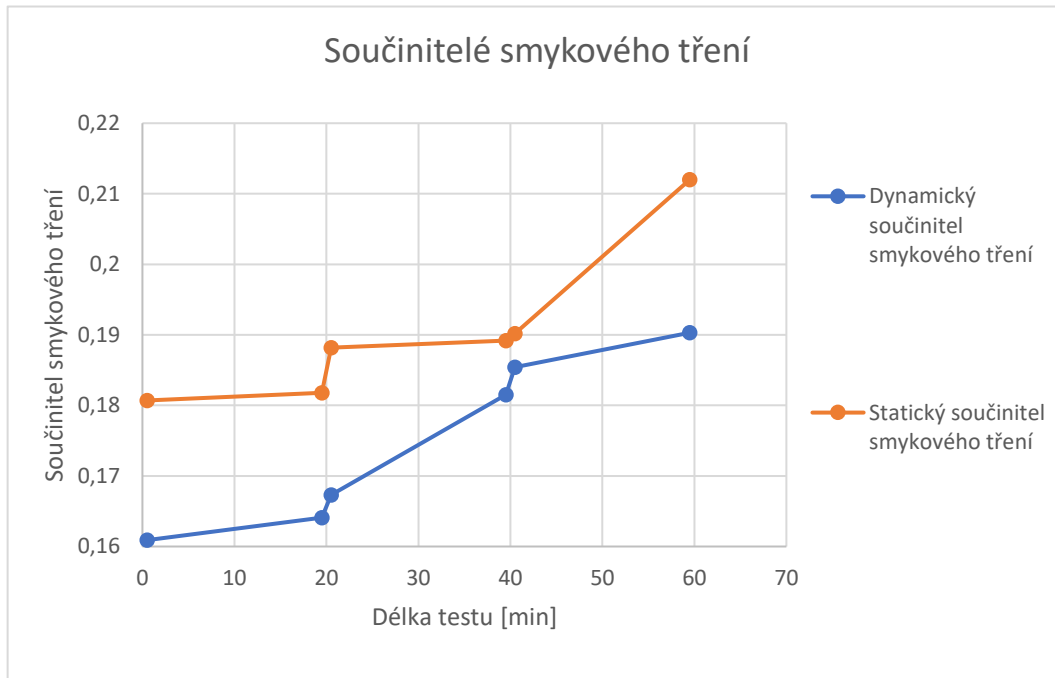
Obr.44: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.4



Obr.45: Vzorek č.4 s testovací deskou

Tab.16: Součinitelé smykového tření vzorku č.4

Časový interval [min]	20		40		60	
	Úsek [s]	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180
μ_d	0,1609	0,1641	0,1673	0,1815	0,1854	0,1903
μ_s	0,1807	0,1818	0,1882	0,1892	0,1902	0,2120



Obr.46: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.4

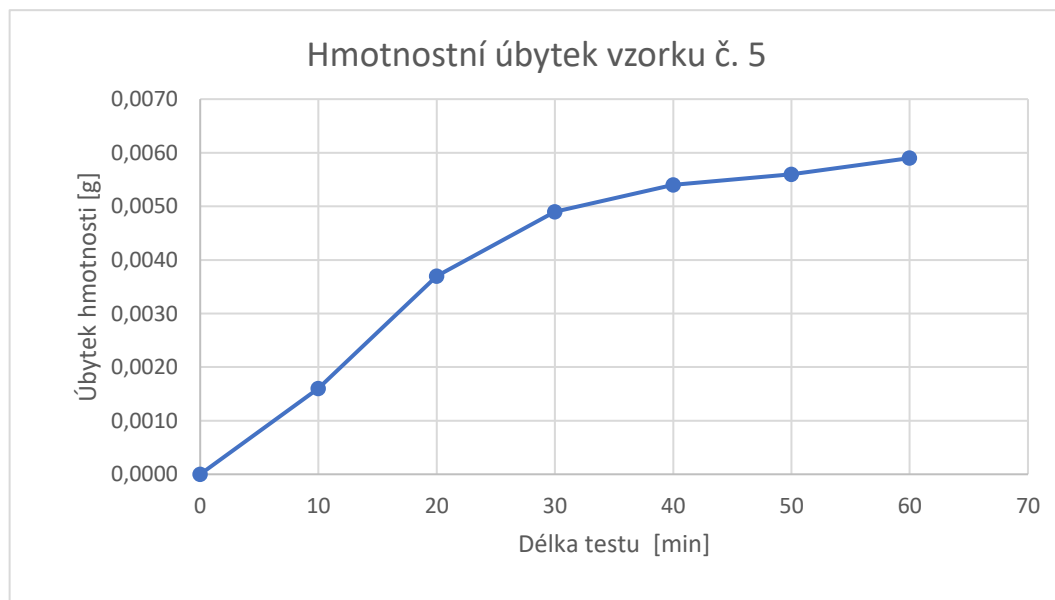
6.5.5 Naměřené hodnoty pro vzorek č.5



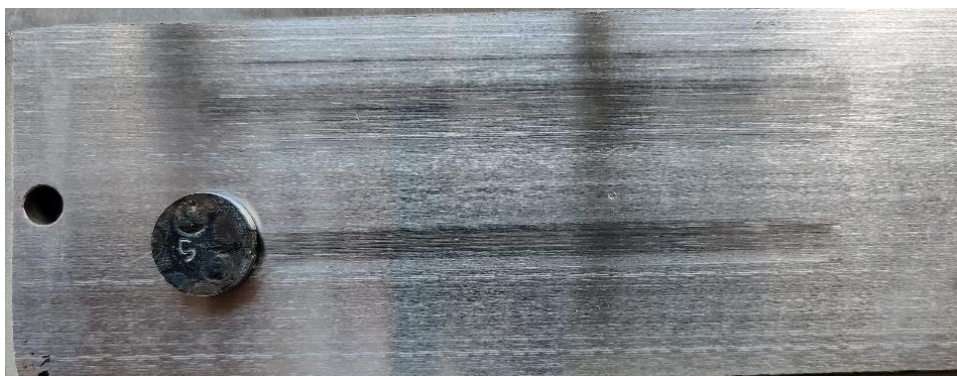
Obr.47: Vzorek č.5

Tab.17: Naměřené hodnoty vzorku č.5

Délka testu [min]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Úbytek hmotnosti [g]
0	3,220	2,1005	0,0000
10	3,215	2,0989	0,0016
20	3,200	2,0968	0,0037
30	3,180	2,0956	0,0049
40	3,175	2,0951	0,0054
50	3,170	2,0949	0,0056
60	3,165	2,0946	0,0059



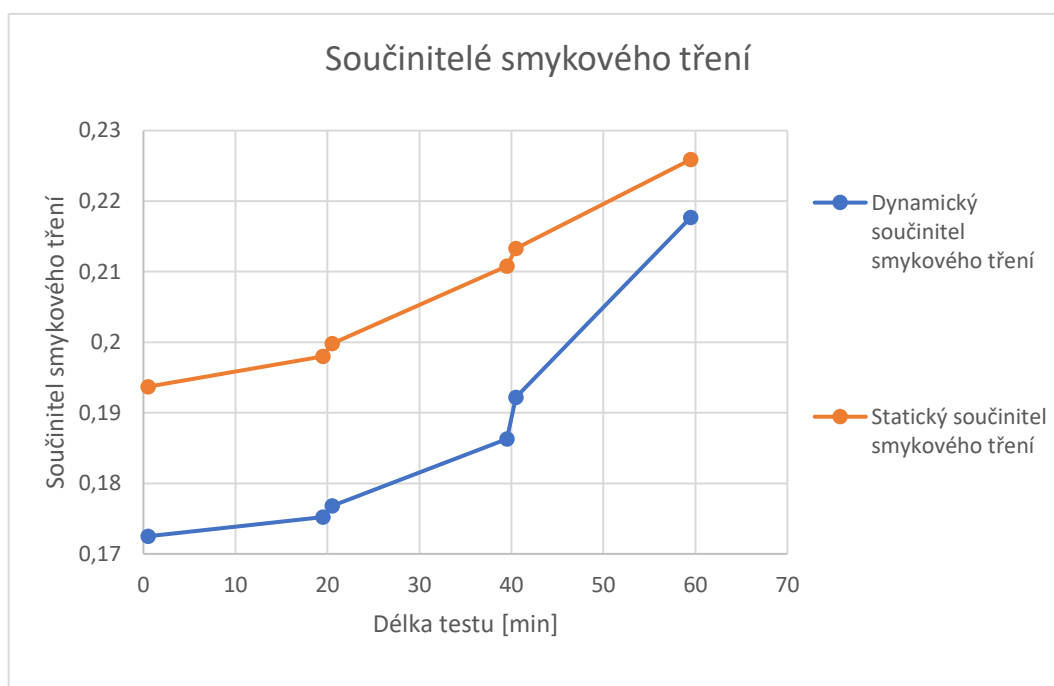
Obr.48: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.5



Obr.49: Vzorek č.5 s testovací deskou

Tab.18: Součinitelé smykového tření vzorku č.5

Časový interval [min]	20		40		60	
	Úsek [s]	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180	20 - 40	1160 - 1180
μ_d	0,1725	0,1752	0,1768	0,1863	0,1922	0,2177
μ_s	0,1937	0,1980	0,1998	0,2108	0,2133	0,2259



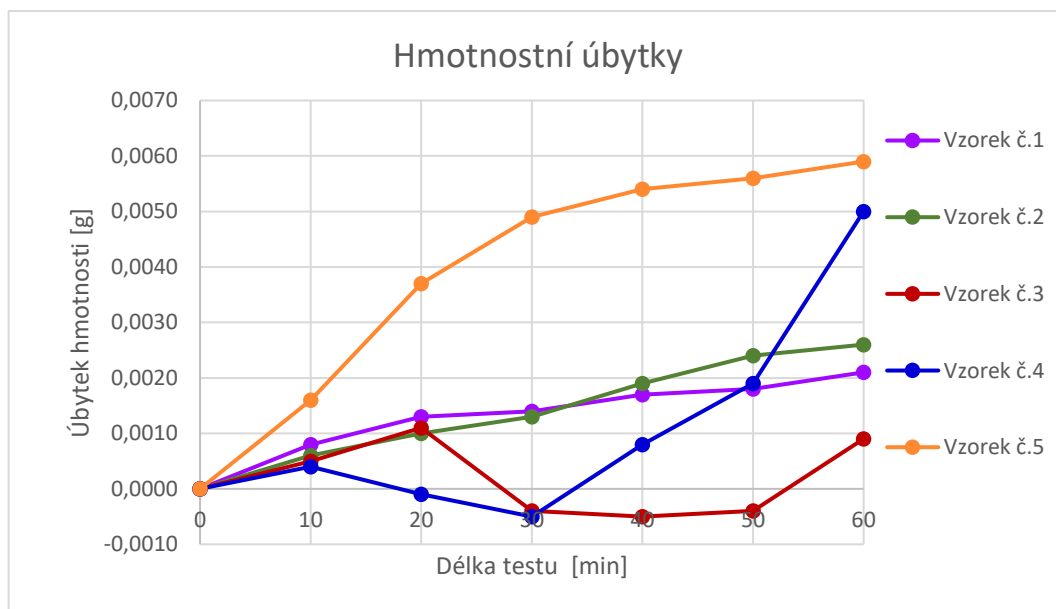
Obr.50: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.5

7 Shrnutí naměřených hodnot

V této části budou porovnány výsledky tribologických testů pro jednotlivé vzorky.

7.1 Srovnání hmotnostních úbytků

Na níže uvedeném grafu jsou vyobrazeny průběhy hmotnostních úbytků testovaných vzorků. U dvou z pěti vzorků (vzorky č.4 a č.3) došlo v průběhu tribologického testu k záporným hodnotám hmotnostního úbytku. Hmotnost vzorků tedy v určitý okamžik byla vyšší než před začátkem testu. To bylo způsobeno kontaktem vrcholků mikronerovností testovací desky a vzorku. V těchto místech docházelo z počátku k elastické deformaci, po určité době začala vznikat v povrchových vrstvách materiálů i plastická deformace. Atomy obou materiálů tak byly v blízkém kontaktu, tím docházelo ke vzniku mikrospojů. V důsledku pohybu vzorku po testovací desce byly mikrospoje přerušovány. K přerušování dochází obvykle v místech pod zpevněnými povrchovými vrstvami jednoho z materiálů. V tomto případě k tomu docházelo v testovací desce. Částice testovací desky tak byly přeneseny na testované vzorky a tím došlo ke zvýšení jejich hmotností.

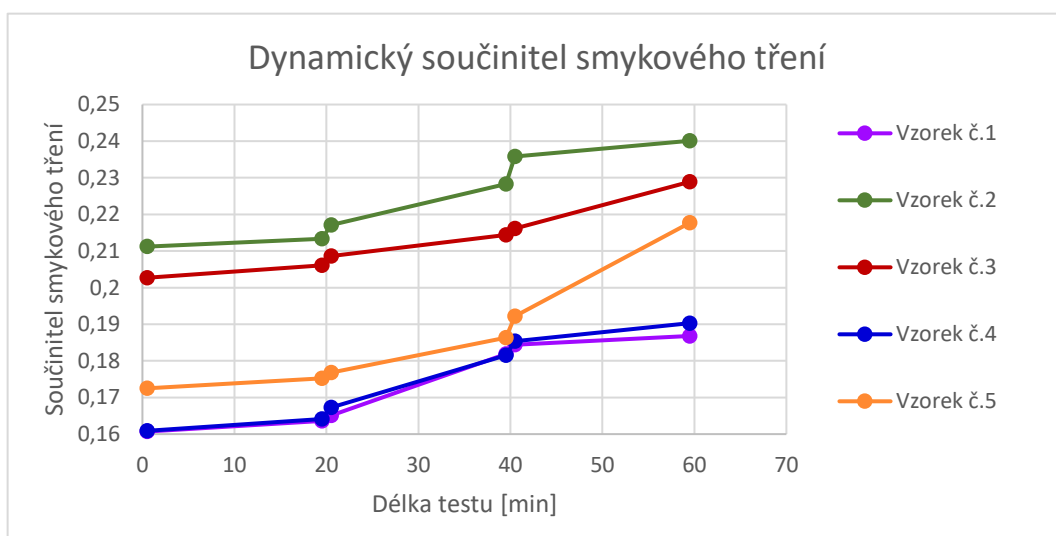


Obr.51: Srovnání hmotnostních úbytků testovaných vzorků

Největší hmotnostní úbytek vykazoval v průběhu testu vzorek č.5. Poměrně lineární závislost vykazují hmotnostní úbytky vzorků č.2 a č.1. U těchto vzorků tak lze poměrně přesně předvídat jejich délku životnosti při možných aplikacích.

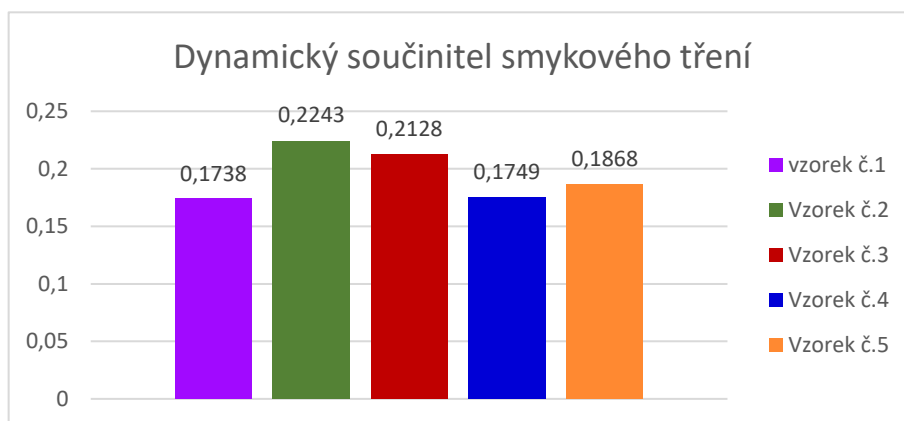
7.2 Srovnání dynamického součinitele smykového tření

Na koeficient tření má vliv např. materiál třecí dvojice či drsnost povrchů, jedná se v podstatě o číselnou hodnotu, která udává poměr mezi normálovou silou působící na těleso a silou třecí, která působí proti pohybu tělesa. Dynamický součinitel smykového tření se uvažuje během pohybu tělesa. Z naměřených hodnot byl sestaven níže uvedený graf, kde jsou vyobrazeny průběhy dynamického součinitele smykového tření pro testované vzorky.



Obr.52: Porovnání dynamického součinitele smykového tření testovaných vzorků

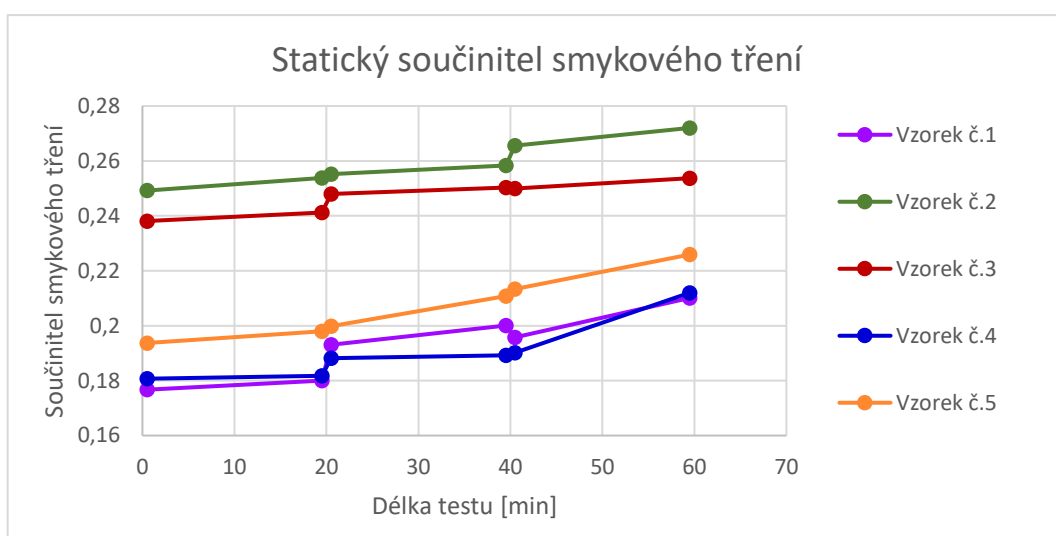
Z grafického porovnání je patrné, že nejvyšší dynamický součinitel smykového tření dosahuje vzorek č.2, jedná se o vzorek s jednoznačně nejvyšším obsahem mědi (71 %). Druhou nejvyšší hodnotu dosahuje vzorek č.3, poté následuje vzorek č.5. Nejnižší hodnoty dosahují vzorky č.4 a č.1.



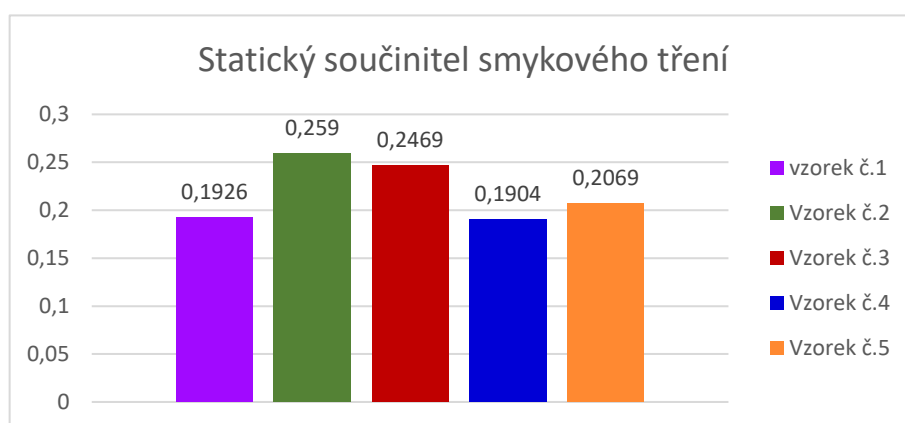
Obr.53: Průměrné hodnoty dynamického součinitele smykového tření

7.3 Srovnání statického součinitele smykového tření

Na tento typ koeficientu má vliv také řada parametrů, podobně jako u zmíněného dynamického součinitele smykového tření. Tento součinitel se uvažuje při počátku pohybu z klidové polohy. V naprosté většině případů nabývá vyšších hodnot než dynamický součinitel, to se potvrdilo i na provedeném tribologickém testu. Statický koeficient smykového tření byl vyšší než dynamický u všech testovaných vzorků. Nicméně pořadí vzorků dle jejich hodnoty se nějak výrazně nezměnilo a nejvyšších hodnoty nabýval vzorek č.2, druhou nejvyšší hodnotu vykazoval vzorek č.3 s větším odstupem následovalo č.5. Velmi podobný průběh měly vzorky č.4 a č.1.



Obr.54: Porovnání statického součinitele smykového tření testovaných vzorků



Obr.55: Průměrné hodnoty statického součinitele smykového tření

8 Závěr

Teoretická část této bakalářské práce se dělí do několika celků. V prvním části jsou podrobně popsány základní druhy opotřebení. Jejich specifika, příčina a faktory, které je ovlivňují. V další části jsou shrnuty nejpoužívanější metody, kterými je možné opotřebovaný povrch renovovat. V posledním úseku teoretické části jsou uvedeny principy nejčastěji používaných přístrojů hodnotících tribologické vlastnosti povrchů.

Účelem experimentální části bylo testování tribologických závislostí třecích dvojic. Třecí dvojice byla tvořena vždy testovací deskou z oceli S235 a jedním z pěti testovaných vzorků. Tyto vzorky se vzájemně liší chemickým složením, které bylo otestováno pomocí spektrometru BAS Delta. Výsledné hodnoty tohoto testu jsou také uvedeny v této práci. Tribologický test probíhal na tribometru TOP3, vzorek testovaný tímto zařízením vykonává lineární vratný pohyb, z tohoto důvodu bylo možné vyhodnotit dynamické i statické součinitele smykového tření pro jednotlivé třecí dvojice. Výsledné hodnoty byly podrobně zaznamenány v tabulkách výsledků a průběhové charakteristiky jsou vyobrazeny v grafech. Intenzita opotřebení jednotlivých vzorků je posuzována na základě hmotnostních úbytků v průběhu testování. Tím bylo možné vzorky vzájemně porovnávat i na základě tohoto aspektu.

Největší dynamický i statický součinitel smykového tření nabýval vzorek č.2. Naopak nejnižších hodnot nabývaly vzorky č.1 a č.4. Nejintenzivnější opotřebení nastávalo u vzorku č.5, jeho hmotnost v průběhu testu klesala nejrychleji. U dvou vzorků došlo i k nárůstu hmotnosti, příčinou bylo navařování částic materiálu z testovací desky. Tento proces vzniká ve styku lokálních mikronerovností obou povrchů. U vzorků č.2 a č.1 měl hmotnostní úbytek poměrně lineární charakter, z tohoto důvodu by se v určitých aplikacích dala poměrně přesně určit délka jejich životnosti.

Většina testovaných vzorků vykazovala poměrně vysoký obsah mědi, tento prvek je často používán v řadě aplikací pro snížení intenzity opotřebení. Výsledky testu však nejsou závislé pouze na jednom prvku, důležitá je jejich kombinace. Přesto lze i na tomto testu pozorovat, že prvky s vyšším obsahem mědi vykazovaly často menší hmotnostní úbytky. Výsledné hodnoty koeficientů smykového tření jsou poměrně nízké, v porovnání s jednotlivými koeficienty prvků, které byly v testovaných vzorcích nejvíce obsaženy. Příčinou je kombinace obsahujících prvků a jejich množství v jednotlivých vzorcích.

9 Citovaná literatura

- [1] POŠTA, Josef, Petr VESELÝ a Milan DVOŘÁK. *Degradace strojních součástí*. První. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0967-9.
- [2] PAGÁČ, Aleš. *Návary proti opotřebení* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32446>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [3] SUCHÁNEK, Jan. Abrazivní opotřebení kovových materiálů. *Tribotechnika*. TechPark, 2010, **3**(1), 50-53. ISSN 1338-0524.
- [4] HOFFMANN, Martin. *Navarování otěruvzdorných materiálů* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/73089>. Bakalářská. ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Suchánek.
- [5] *Chinese Journal of Aeronautics: Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review*. 2017. ISSN 1000-9361.
- [6] NOHEL, Rostislav. *Klasifikace a hodnocení opotřebení kolejnic* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/39256>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Radovan Galas.
- [7] SUCHÁNEK, Jan. Adhezivní opotřebení. *Tribotechnika*. TechPark, 2010, **3**(2), 66-71. ISSN 1338-0524.
- [8] Critical length scale controls adhesive wear mechanisms. *NATURE COMMUNICATIONS* [online]. 2016, (7), 8 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms11816

- [9] IVANIČ, Michal. *Materiály a metody testování vlastností žárově stříkaných povlaků* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/67406>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Čelko.
- [10] Energy-Based Modelling of Adhesive Wear in the Mixed Lubrication Regime. *Lubricants* [online]. 2020, 8(2), 15 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants8020016
- [11] SUCHÁNEK, Jan. Kavitační opotřebení. *Tribotechnika*. TechPark, 2011, 4(1), 36-38. ISSN 1338-0524.
- [12] *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2020, [cit. 2020-11-14]. ISSN 1350-4177.
- [13] PROPELLER CAVITATION EXPLAINED. In: *The Shipyard* [online]. 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www.theshipyardblog.com/propeller-cavitation-explained/>
- [14] SUCHÁNEK, Jan. Erozivní opotřebení a volba kovových materiálů v praxi. *Tribotechnika*. TechPark, 2010, 3(3), 56-58. ISSN 1338-0524.
- [15] *Multifunctionality of Polymer Composites* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2020-11-21]. ISBN 978-0-323-26434-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13006-1>
- [16] SUCHÁNEK, Jan. Vibrační opotřebení. *Tribotechnika*. TechPark, 2011, 4(2), 54-56. ISSN 1338-0524.
- [17] DVORSKÝ, Vladimír. *Degradace strojních součástí opotřebením* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti_zp=22466. Bakalářská. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Josef Filípek.
- [18] Sterilization and Degradation. *Foundations of Biomaterials Engineering* [online]. Elsevier, 2019, s. 289-328 [cit. 2020-11-22]. ISBN 978-0-08-101034-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-05967-6>

- [19] Surface Fatigues. In: *PVD Advanced Technologies* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <http://www.pvdadvancedtech.com/process/>
- [20] NOVÁKOVÁ, Michaela. *Vliv deformace na korozní vlastnosti materiálu* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/25230>. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Antonín Kříž.
- [21] BENEŠ, Petr. Koroze a konzervace. *Techmagazín*. 2014, **5**(10), 34-35. ISSN 1804-5413.
- [22] HAVLÍK, Luboš. *Koroze slitin železa a způsoby jejich vyhodnocování* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/18132>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Bohumil Pacal.
- [23] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1991. ISBN 9788001004760.
- [24] KALEDOVÁ, Andrea. *Metody testování vlastností organických povlaků: Díl 1., Korozně-inhibiční účinnost organických povlaků*. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2001. ISBN 80-7194-398-3.
- [25] LÍBAL, Martin. *Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/8629>. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Antonín Kříž.
- [26] POŠTA, Josef. Renovace strojních součástí. *Mechanizace zemědělství*. 2001, **51**(2), 48-50. ISSN 1212-9984.
- [27] DOLEŽAL, Zdeněk. *Renovace nákladných náhradních dílů za využití speciálních strojírenských technologií* [online]. České Budějovice, 2015 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/z4h37p/>. Diplomová. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. Vedoucí práce Josef Frolík.

- [28] POŠTA, Josef. Renovace opracování součásti na opravné rozměry. *Mechanizace zemědělství*. 2001, **51**(3), 41-42. ISSN 1212-9984.
- [29] BAJDA, Miloslav. Navařování kovů. *Svět svaru*. 2005, **9**(2), 1-12. ISSN 1214-4983.
- [30] *Příručka svařování* [online]. 5. Vamberk: ESAB VAMBERK, s.r.o, 2008 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/opravy_renovace.pdf
- [31] KREJČÍ, Vojtěch. *Nekonvenční technologie navařování kovů* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/20914>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ladislav Čelko.
- [32] Svařování metodou 311 - plamenem. In: *Svarbazar* [online]. 2007 [cit. 2020-23-30]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2007010802>
- [33] How to choose the right wire and flux for SAW. In: *The WELDER* [online]. 2016 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/how-to-choose-the-right-wire-and-flux-for-saw>
- [34] KOLAŘÍK, Ladislav, Pavel ROHAN, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum*. 2015, **18**(12), 86. ISSN 1212-2572.
- [35] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMÁR a Tomáš PANÁČEK. Diagnostika plazmového navařovacího procesu. *Konstrukce* [online]. 2015 [cit. 2021-01-24]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/diagnostika-plazmoveho-navarovaciho-procesu/>
- [36] Laserové navařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2001, **4**(4) [cit. 2020-12-31]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani>

- [37] ELTZE, Andre. Diodový laser a navařování pro opravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, **16**(12) [cit. 2020-12-31]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/diodovy-laser-a-navarovani-pro-opravu-povrchu>
- [38] AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00347-4.
- [39] ŠILDBERGER, Radek. *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/13869>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [40] ZAHÁLKA, František a Radek ENŽL. Žárově stříkané povlaky - moderní technologie tvorby povrchových ochran. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2005, **8**(12) [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zarove-strikanepovlaky-modernitechnologie-tvorby-povrchovych-ochra>
- [41] The Morphology Analysis of Plasma-Sprayed Cast Iron Splats at Different Substrate Temperatures via Fractal Dimension and Circularity Methods. *High Temperature Materials and Processes* [online]. 2019, **35**(1), 696 [cit. 2021-02-01]. ISSN 2191-0324. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/htmp-2019-0021>
- [42] KANDEVA, M., Aleksandar VENCL a Dimitar KARASTOYANOV. *Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies: Case Studies*. 1. Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2016. ISBN 978-954-322-858-4.
- [43] Flame spraying. In: *Manufacturing Guide* [online]. Stockholm: Manufacturing Guide Sweden AB [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/flame-spraying>

- [44] Powder metal combustion spraying. In: *Manufacturing Guide* [online]. Stockholm: Manufacturing Guide Sweden AB [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/powder-metal-combustion-spraying>
- [45] ČELKO, Ladislav, David JECH, Pavel KOMAROV, Michaela REMEŠOVÁ a Ivana ROČŇÁKOVÁ. Technologie žárových nástřiků: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě. *Povrcháři* [online]. 2017, **11**(3), 3-6 [cit. 2021-02-02]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: <http://povrchari.cz/index.php?show=casopis&lang=cze>
- [46] *Thermal spraying (Hardfacing)* [online]. The Open University, 2018 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/thermal-spraying-hardfacing>
- [47] Thermal spray forming of titanium and its alloys. *Titanium Powder Metallurgy* [online]. Butterworth-Heinemann, 2015, s. 425-446 [cit. 2021-02-06]. ISBN 978-0-12-800054-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012800054000023X>
- [48] Powders for Cold Spray Deposition. *FUKUDA* [online]. Kyoto: FUKUDA [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.fukuda-kyoto.co.jp/en/technology/research/cold-spray.html>
- [49] Wire arc spray coating. In: *Manufacturing Guide* [online]. Stockholm: Manufacturing Guide Sweden AB [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-arc-spray-coating>
- [50] POKORNÝ, Petr a Vlastimil BROŽEK. Úvod do technologie povrchové úpravy plazmovým nástřikem. In: *Tribotechnika* [online]. TechPark [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/uvod-do-technologie-povrchove-upravy-plazmovym-nastrikem-1-cast.html>
- [51] Plasma spraying. In: *Manufacturing Guide* [online]. Stockholm: Manufacturing Guide Sweden AB [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/plasma-spraying>

- [52] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost I.: Tribodiagnostika*. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-883-6.
- [53] HÁJEK, Jiří a Antonín KŘÍŽ. TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA „PIN-on-DISC“. *Metal 2005*. Ostrava: Tanger, 2005, , 1-7.
- [54] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza „PIN-on-DISC“. In: *Metal 2004*. Ostrava: Tanger, 2004, s. 1-8. ISBN 80-85988-95-X.
- [55] LI, Xinmin, Mario SOSA a Ulf OLOFSSON. A pin-on-disc study of the tribology characteristics of sintered versus standard steel gear materials. *Wear*. 2015, **340-341**, 31-40. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.032>
- [56] MIRAMONTES, J.A., C. GAONA-TIBURCIO, Abraham TELLEZ, Carlos POBLANO-SALAS a Facundo ALMERAYA CALDERON. Wear Resistance of Thermal Spray WC-Co-VC Nanostructured Coatings. *Advances in Tribology*. 1. IntechOpen, 2016. ISBN 978-953-51-2742-0. Dostupné z: doi:10.5772/64575
- [57] NEVES, Marcus, Marco ARRUDA, J.C.s FREITAS, Edson BATISTA, Thiago PRADO a Marco NAKA. *Construction of a tribometer for tests with biolubricants*. 1. Campo Grande, 2012, 1 s. ISBN 978-1-4673-2412-0. Dostupné z: doi:10.1109/INDUSCON.2012.6452601
- [58] Linear Wear Friction. In: *Nanovea* [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://nanovea.com/linear-wear-test/>
- [59] LI, Duanjie a Pierre LEROUX. Block on Ring Sliding Wear Evaluation. In: *ResearchGate* [online]. Irvine: Nanovea, 2016 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309491420_Block_on_Ring_Sliding_Wear_Evaluation
- [60] Block on Ring Tribometer Option. *Nanovea* [online]. Irvine: Nanovea, 2020 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://nanovea.com/block-on-ring-tribometer/>

- [61] What is Friction?. In: *Kyowa Interface Science* [online]. Niiza [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.face-kyowa.co.jp/english/en_science/en_what_friction.html
- [62] Tribological Testing by 4 Ball Methods. In: *Nye Lubricants* [online]. Fairhaven, 2020 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.nyelubricants.com/tribological-testing-by-4-ball-methods>
- [63] BAS Delta. In: *BAS* [online]. Blansko [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: https://www.bas.cz/innov-x-systems/rucni_analyzator_kovu_delta_professional.php
- [64] Ohaus EP214C Explorer Pro. In: *Bittermanscales* [online]. Lancaster [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.bittermanscales.com/product/balances/voyager-pro-analytical-balance>
- [65] Mitutoyo SJ-301. In: *BERG ENGINEERING* [online]. Rolling Meadows [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.bergeng.com/product/178-954-4A.html>
- [66] SHAHE/5100-200. In: *Direct INDUSTRY* [online]. Wenzhou [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://trends.directindustry.com/wenzhou-sanhe-measuring-instrument-co-ltd/project-148501-167318.html>
- [67] ROŠKANIN, Petr. *Vliv kluzných laků na technologii termoforming kompozitů s termoplastovou maticí C/PPS*. Praha, 2015. Disertační. ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce Viktor Kreibich.

10 Seznam obrázků

Obr.1: Abrazivní opotřebení	11
Obr.2: Adhezivní opotřebení	13
Obr.3: Kavitační opotřebení	15
Obr.4: Kavitační dutiny při pohybu lodního šroubu.....	16
Obr.5: Erozivní opotřebení	17
Obr.6: Vibrační opotřebení	19
Obr.7: Únavové opotřebení.....	20
Obr.8: Druhy plamenů	27
Obr.9: Metoda SAW	28
Obr.10: Navařování laserem	30
Obr.11: Splat.....	32
Obr.12: Struktura žárového nástřiku.....	32
Obr.13: Žárový nástřik plamenem, přídavný materiál ve formě drátu	35
Obr.14: Žárový nástřik plamenem, přídavný materiál ve formě prášku.....	36
Obr.15: Nástřik detonační vlnou.....	37
Obr.16: Vysokorychlostní nástřik plamenem	38
Obr.17: Studený kinetický nástřik	39
Obr.18: Nástřik elektrickým obloukem	40
Obr.19: Plazmatický nástřik	42
Obr.20: Metoda PIN-on-DISC.....	43
Obr.21: Metoda PIN-on-PLATE	44
Obr.22: Metoda BLOCK-on-DISC.....	44
Obr.23: Metoda 4 - ball test	45
Obr.24: Tribometr TOP3	46
Obr.25: Spektrometr BAS Delta.....	47
Obr.26: Analytická váha	48
Obr.27: Drsnoměr Mitutoyo SJ-301	48
Obr.28: Digitální posuvné měřítko SHAHE/5100-200	48
Obr.29: Měření drsnosti testovací desky	49
Obr.30: Detailní pohled na tribometr TOP3	51
Obr.31: Vzorek č.1.....	52
Obr.32: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.1	52

Obr.33: Vzorek č.1 s testovací deskou	53
Obr.34: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.1	53
Obr.35: Vzorek č.2.....	54
Obr.36: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.2.....	54
Obr.37: Vzorek č.2 s testovací deskou	55
Obr.38: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.2.....	55
Obr.39: Vzorek č.3.....	56
Obr.40: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.3.....	56
Obr.41: Vzorek č.3 s testovací deskou	57
Obr.42: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.3.....	57
Obr.43: Vzorek č.4.....	58
Obr.44: Graf hmotnostního úbytků vzorku č.4.....	58
Obr.45: Vzorek č.4 s testovací deskou	59
Obr.46: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.4.....	59
Obr.47: Vzorek č.5.....	60
Obr.48: Graf hmotnostního úbytku vzorku č.5.....	60
Obr.49: Vzorek č.5 s testovací deskou	61
Obr.50: Graf součinitele smykového tření pro vzorek č.5.....	61
Obr.51: Srovnání hmotnostních úbytků testovaných vzorků.....	62
Obr.52: Porovnání dynamického součinitele smykového tření testovaných vzorků.....	63
Obr.53: Průměrné hodnoty dynamického součinitele smykového tření.....	63
Obr.54: Porovnání statického součinitele smykového tření testovaných vzorků	64
Obr.55: Průměrné hodnoty statického součinitele smykového tření	64

11 Seznam tabulek

Tab.1: Chemické složení vzorku č.1.....	47
Tab.2: Chemické složení vzorku č.2.....	47
Tab.3: Chemické složení vzorku č.3.....	47
Tab.4: Chemické složení vzorku č.4.....	47
Tab.5: Chemické složení vzorku č. 5.....	47
Tab.6: Drsnost vzorků před testem.....	49
Tab.7: Drsnost testovacích desek před testem.....	49
Tab.8: Drsnost vzorků po testu.....	49
Tab.9: Naměřené hodnoty vzorku č.1.....	52
Tab.10: Součinitelé smykového tření vzorku č.1.....	53
Tab.11: Naměřené hodnoty vzorku č.2.....	54
Tab.12: Součinitelé smykového tření vzorku č. 2.....	55
Tab.13: Naměřené hodnoty vzorku č.3.....	56
Tab.14: Součinitelé smykového tření vzorku č.3.....	57
Tab.15: Naměřené hodnoty vzorku č.4.....	58
Tab.16: Součinitelé smykového tření vzorku č.4.....	59
Tab.17: Naměřené hodnoty vzorku č.5.....	60
Tab.18: Součinitelé smykového tření vzorku č.5.....	61

12 Seznam použitých zkratk a symbolů

MIG – (Metal Inert Gas) Poloautomatické svařování v atmosféře inertního plynu

MAG – (Metal Active Gas) Poloautomatické svařování v atmosféře aktivního plynu

TIG/WIG – (Tungsten Inert Gas) Svařování wolframovou elektrodou

SAW – (Submerged Arc welding) Svařování pod tavidlem

PAW – (Plasma Arc Welding) Navařování plazmatem, přídavný materiál ve formě drátu

PTA – (Plasma Transfer Arc) Navařování plazmatem, přídavný materiál ve formě prášku

HVOF – (High Velocity Oxygen Fuel) Vysokorychlostní nástřik plamenem

μ_d – Dynamický součinitel smykového tření

μ_s – Statický součinitel smykového tření