



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NANOMAZIVA V PRAKTICKÝCH APLIKACÍCH

NANOLUBRICANTS FOR PRACTICAL APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Sochor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Ondřej Sochor**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nanomaziva v praktických aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Díky rychlému rozvoji nových technologií výroby, nacházejí nanočástice uplatnění v různých průmyslových oblastech. V posledních letech se výzkum zaměřil také na nanočástice v tribologických aplikacích. Nanočástice lze vhodně přidat do maziv jako aditiva a dosáhnout tak jejich nových tribologických vlastností. Správná volba nanomaziva tak může snížit tření a opotřebení funkčních ploch.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je rešerše v oblasti nanomaziv včetně doporučení pro jejich použití v praktických aplikacích.

Dílní cíle bakalářské práce:

- popsat tvary, velikosti a vlastnosti nanočástic vhodných pro tribologické účely,
- popsat aktuální trendy ve výzkumu nanočástic jako aditiv v mazivech,
- syntetizovat získané poznatky v rámci doporučení použití nanomaziv v praktických aplikacích,

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

KHALID, S. W., M.S. CHAROO. NanoLubrication Systems: An Overview. Materials Today: Proceedings. 2020, 5(9), 20621-20630. ISSN 22147853.

SHAFI, W. K, M. S. CHAROO. An overall review on the tribological, thermal and rheological properties of nanolubricants. Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces. 2020, 1-35. ISSN 1751-5831.

GULZAR, M., H. H. MASJUKI, M. A. KALAM, M. VARMAN, N. W. M. ZULKIFLI, R. A. MUFTI a R. ZAHID. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. Journal of Nanoparticle Research. 2016, 18(8). ISSN 1388-0764.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá popisem nanomaziv a vylepšení jejich vlastností pomocí vhodných aditiv, jako jsou nanočástice, které mohou zlepšit jejich tribologické vlastnosti a snižovat opotřebení, tření v místě kontaktu dvou povrchů. Shrnují se zde vlastnosti, výroba a mechanismy, které se uplatňují u nanočástic a nanomaziv. Výstupem této práce je syntéza získaných poznatků v oblasti nanomaziv pro návrh praktických aplikací a popis aktuálních trendů ve výzkumu nanočástic, jako aditiv.

KLÍČOVÁ SLOVA

nanočástice, nanomaziva, aplikace, olej, tribologie, mazání

ABSTRACT

This bachelor thesis is concerned with describing nanolubricants and enhancing their characteristics using suitable additives, such as nanoparticles. These can improve their tribological properties and reduce mechanical wear and friction between two surfaces.

This thesis summarizes manufacturing, some features and mechanisms that apply to nanoparticles and nanolubricants. The main outcome of the work is a synthesis of acquired knowledge in the field of nanolubricants for the purpose of practical application and description of current trends in its research as being used as additives.

KEYWORDS

nanoparticles, nanolubricant, application, oil, tribology, lubrication

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOCHOR, Ondřej. *Nanomaziva v praktických aplikacích*. Brno, 2021, 48 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D, za jeho komunikaci, cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Nanočástice	14
2.1.1 Historické zařazení	14
2.1.2 Oblasti využití nanočástic	15
2.1.3 Specifikace nanočástic	16
2.1.4 Ovlivněné vlastnosti nanočástic oproti makroměřítku	17
2.1.5 Výroba nanočástic	19
2.1.6 Materiál nanočástic	23
2.1.7 Tvary nanočástic vhodné pro tribologické účely	24
2.1.8 Stabilizace nanočástic	27
2.2 Nanomaziva	27
2.2.1 Specifikace nanomaziv	28
2.2.2 Výroba nanomaziv	28
2.2.3 Vlastnosti maziv ovlivněné přidáním nanočástic	29
2.2.4 Mechanismy mazání	32
2.2.5 Nežádoucí vnitřní procesy a jejich eliminace	33
2.2.6 Vlastnosti nanočástic ovlivňující vlastnosti maziv	35
3 DISKUZE	37
3.1 Nanomaziva v praktických aplikacích	38
4 ZÁVĚR	39
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	47
6.1 Seznam zkratk a symbolů	47
6.2 Seznam veličin	47
7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	48

ÚVOD

Nejzákladnější proces, který omezuje účinnost a životnost strojů, je proces tření. Tření, vznikající v místě styku dvou těles, které se vůči sobě pohybují, zabraňuje tomuto pohybu a proto je potřeba vynaložit vyšší sílu, s tím i vyšší práci, na překonání tohoto pasivního účinku. Tím se snižuje účinnost stroje a dochází k vyšší spotřebě energie, jak elektrické, tak i paliva. Kupříkladu u osobního automobilu je 16 % – 18 % paliva vynaloženo na překonání tření. Vztáhneme-li tuto hodnotu na celosvětové měřítko ztratí se okolo 200 miliard litrů paliva za rok kvůli tření [1].

S procesem tření vzniká i opotřebení, což vede ke zkrácené životnosti stroje, nebo jeho součástí a nutnosti jejich náhrady, nebo průběžné kontroly. Ve výrobě to vede k odstavení stroje pro potřeby opravy, nebo revize, čímž se zkracuje doba, po kterou stroj pracuje.

S ohledem na ztenčující se zásoby nerostných surovin (ropa, zemní plyn, uhlí), zvyšující se zátěže na životní prostředí, zvyšující se poptávce po účinnějších a spolehlivějších zařízeních je jeden z cílů konstruktéra co nejvíce minimalizovat ztráty způsobené třením.

Konstruktér má několik možností, jak snížit tření.

Jednou z nich je minimalizace stykových ploch navzájem pohybujících se objektů. Tohoto můžeme dosáhnout použitím valivých ložisek, které zásadně snižují velikost ploch a tím třecích sil, zvyšují účinnost a snižují opotřebení, nebo vhodnou konstrukcí, kdy se snažíme navrhnout konstrukci s co možná nejmenší stykovou plochu u vzájemně se pohybujících částí s ohledem na funkčnost.

Dalším řešením může být úprava povrchu. Zde můžeme zvolit DLC (Diamond Like Carbon) povlakování, které zlepšuje tvrdost, snižuje koeficient tření a zvyšuje ořezuvzdornost. Příkladem jiného než technického použití, je užití tohoto povlaku v medicíně, kde díky své chemické inertnosti a biokompatibilitě se používá při povlakování náhrad kloubů.

Jedním z nejlevnějších a nejrozšířenějších způsobů snižování tření je použití olejů a maziv, ty však mají využití do určitých teplot, a to omezuje i rychlost s jakou se součásti mohou pohybovat. Ke zlepšení vlastností se do maziv přidávají různé přísady. Jednou z vhodných přísad se jeví přidáním různých typů nanočástic. Tento pozitivní účinek byl zjištěn na základě pozorování a v dnešní době je stále ve stavu zkoumání.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Základním způsobem pro snižování tření je použití maziv a olejů. Pro změnu vlastností olejů a maziv se nejčastěji používá nemalé množství aditiv a plniv, které omezují použití maziv do určité teploty, neboť by mohlo dojít k chemické reakci způsobené vyšší teplotou, čímž se nejen mění vlastnosti maziva, ale vzniklé chemické produkty by mohly reagovat s povrchy, nebo s mazivem, čímž dojde k znehodnocení. Avšak s rozvojem nových technologií je na současná maziva kladen stále vyšší nárok na snižování tření, opotřebení a chemické stálosti, kdy stávající maziva již nemusí vyhovovat a proto se hledají nové cesty, jak tyto nedostatky maziv kompenzovat. Začaly se hledat aditiva, které by zajišťovaly dostatečné snížení tření a opotřebení, dokázaly by být chemicky stabilní a to i za zvýšených teplot a aby vzniklé mazivo bylo stále konkurenceschopné. Díky rozvoji v oblasti nanočástic se zkoumalo jejich užití jako aditiv a dosavadní výsledky ukázaly, že přidáním malého množství nanočástic se výrazně zlepšují tribologické a fyzikální vlastnosti maziv a vzniklé nanomazivo svými vlastnostmi výrazně přesahuje konvenčně používaná maziva.

Cílem této práce proto bude zpracovat přehled současného stavu poznání v oblasti nanočástic a nanomaziv. Popis tvarů, velikostí, materiálu a vlastností, nanočástic vhodných pro tribologické účely, popis aktuálních trendů ve výzkumu nanočástic jako aditiv v mazivech, popis nanomaziv s ohledem na výrobu, vlastnosti a procesy mazání, na kterých se podílí nanočástice a na závěr syntetizovat získané poznatky v rámci doporučení nanomaziv v praktických aplikacích.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Nanočástice

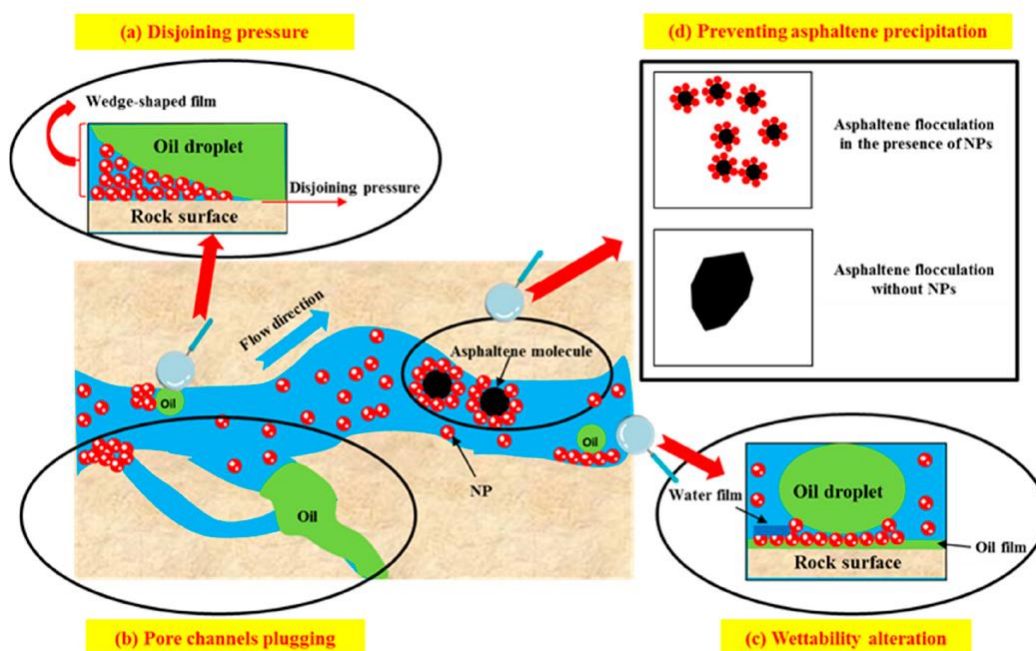
2.1.1 Historické zařazení

Nanotechnologie je poměrně mladý vědní obor, který existuje okolo 30let, avšak za svou krátkou existenci ovlivnil mnoho vědních disciplín [2]. Základním objektem zkoumání jsou nanočástice.

První myšlenku o nanotechnologiích zformuloval Richard Feynman na Caltechu roku 1959 na přednášce s názvem „There’s Plenty of Room at the Bottom.“ [3] K průlomům ve zkoumání nanočástic a ve výzkumu v oblasti nanotechnologií však došlo až roku 1981 díky vynálezu STM (z angl. Scanning Tunneling Microscope), jehož vynálezcem se stal Dr. Heinrich Rohrer a Gerdem Binning [4]. Umožnili tím zobrazení a manipulaci atomů a molekul, čímž se získal cenný nástroj pro zkoumání v nanoměřítku. Za počátek výzkumu nanočástic se považuje počátek 80. let, kdy se pozorováním dokázalo, že nanočástice mají unikátní fyzikální vlastnosti, díky své malé velikosti, které jsou jiné od vlastností stejného materiálu v makroměřítu [2].

K rannému využití nanočástic v technické praxi dochází v 90. letech 20. století, kdy při využití nanočástic bylo zlepšeno vedení tepla v chladicích kapalinách. Běžnými chladicími kapalinami jsou voda, olej, ethylenglykol (Fridex), které jsou samy o sobě špatnými vodiči tepla. Přidáním malého množství nanočástic, se zlepšila tepelná vodivost oproti původní kapalině a konvenčním prostředkům [5].

Dále se díky svým unikátním vlastnostem a možným povrchovým úpravám nanočástice uplatnily v různých odvětvích průmyslu a vědních oborech, proto je jejich výzkum v současné době velice populární. Jedním z moderních užití je v petrolejovém průmyslu při zlepšení výtěžnosti ropy v sekundárním způsobu při vstřikování kapaliny. Díky své malé velikosti mohou nanočástice v suspenzi jednodušeji pronikat do porózního prostředí než tradičně používané látky (voda, CO₂, zemní plyn), čímž se například zvyšuje výnosnost těžby. Mechanismus, který se uplatňuje, je shlukování nanočástic do tvaru klínu, který separuje kapičky ropy od povrchu kamene (**Obr. 1**), a ropa je unášena proudem. Studie ukazují, že výtěžnost se může zvýšit až o 20 % v závislosti na zvolených nanočásticích [6].



Obr. 1 Schématické zobrazení mechanismu klínu [6]

2.1.2 Oblasti využití nanočástic

V této části bude uvedeno na podoblast tribologie, kde se nanočástice využívají.

Biotribologie

Termínem biotribologie se označuje obor zkoumající tribologii v živých organismech. Spadá sem výzkum vlastností proudění krve pro návrh umělých orgánů, opotřebení zubních náhrad, tribologie oka a kontaktních čoček. Dále výzkum zabývající se snížením tření červených krvinek ve vlasečnicích a cévách. Poslední oblastí biotribologie je zkoumání tření a opotřebení v kloubech a kloubních náhradách. Jednou z výzev u kloubních náhradách je prodloužení životnosti docílením snížení opotřebení a korozních produktů. Jako typ kloubní náhrady se používá nejčastěji PoM (Polymer-on-Metal) kloub. Přidáním jednoho hmotnostního procenta nanočástic se zlepší tribologické vlastnosti o 80 % díky vytvoření tenkého filmu. Tento film také chrání kovovou část kloubu nejen před opotřebením ale i korozi [7].

2.1.3 Specifikace nanočástic

V následujících kapitolách bude vymezen pojem nanočástice, co vede k jejich specifickým vlastnostem a jaké vlastnosti se využívají v technické praxi. Dále pak výroba a jejich řazení do skupin a jako poslední úprava nanočástic, která vede k jejich stálosti.

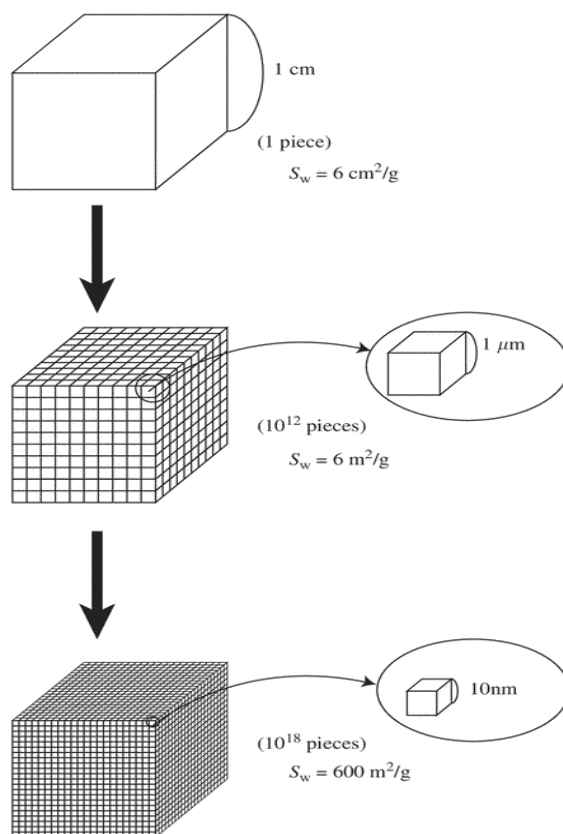
Jako nanočástice jsou většinou označovány částice s velikostí od 1 do 100 nm [8]. Pro představu vlnová délka viditelného světla je okolo 400 nm, což zapříčinilo nemožnost výzkumu v nanomeřítku až do vynálezu STM. Malá velikost, z počátku bránící výzkumu, je však pro jejich unikátní vlastnosti zásadní. Existují dvě vysvětlení, které popisují proč dochází ke změně vlastností.

Větší míra aktivity na povrchu

Všechny pevné látky se skládají z atomů nebo molekul. S postupným zmenšováním rozměrů dochází k změně vlastností, což je přičítáno změně vazebného stavu atomů a molekul z nichž se částice skládá. Pro představu máme-li kostku 1 cm a rozdělíme ji na kostičky o velikosti 1 μm zvýší se počet kostiček na 10^{12} . Při dalším dělení na kostičky o velikosti 10 nm je počet 10^{18} , což znázorněno na **Obr. 2** [8]. Se zmenšením rozměrů velikosti nanočástice roste podíl velikosti povrchu ku objemu. Pro příklad u sférická nanočástice se objem zmenšuje se třetí mocninou poloměru a povrch nanočástice s druhou mocninou poloměru. Pokud tedy budeme mít nanočástici o poloměru 10 nm, bude její povrch řádově 10^{-15} a její objem 10^{-24} m. Výsledkem je zvýšení podílů atomů a molekul na povrchu. Tyto částice pak mají schopnost se více vázat s okolním prostředím, než ty které jsou vázány uvnitř a tím se následně i mění vlastnosti [8].

Zvětšení povrchu

Při dělení na menší částice, kdy celkový objem zůstává vždy stejný, se začne zvětšovat celkový charakteristický povrch. Tím se zvětší celkový povrch, na kterém mohou probíhat reakce. Na **Obr. 2** můžeme vidět, že se aktivní povrch při dělení zvětší desettisíckrát až stomilionkrát v závislosti na počtu dělení [8].



Obr. 2 Změna povrchu při dělení kostky o hustotě 1 g/cm^3 [8]

2.1.4 Ovlivněné vlastnosti nanočástic oproti makroměřítku

Jak již bylo zmíněno, tělesa, které mají rozměry v řádech nanometrů mají jiné vlastnosti oproti větším velikostem, přičemž i vlastnosti, které se obecně považují za materiálové charakteristiky, jako je bod tání se se zmenšením mohou měnit. Tyto změny v materiálových vlastnostech se označují anglickým termínem „size effect“, který je možný používat i v širším měřítku [8]. Dále si uvedeme některé změny vlastností, které jsou významné pro technickou praxi.

Zlepšení tepelné vodivosti

Zlepšení tepelné vodivosti je dáno tím, že dělením tělesa na menší části se začne zvětšovat jeho celkový povrch, při stálém objemu (viz **Obr. 2**), tím se zvětší i plocha, kde může probíhat tepelná výměna. Z toho vyplývá, že teplo se dokáže efektivněji přenášet do objemu materiálu (zlepší se tepelná vodivost) a tím je zrychlena tepelná výměna mezi nanočásticemi a okolím. To má za následek zkrácení doby potřebné pro předání tepla a zlepšení jeho přenosu.

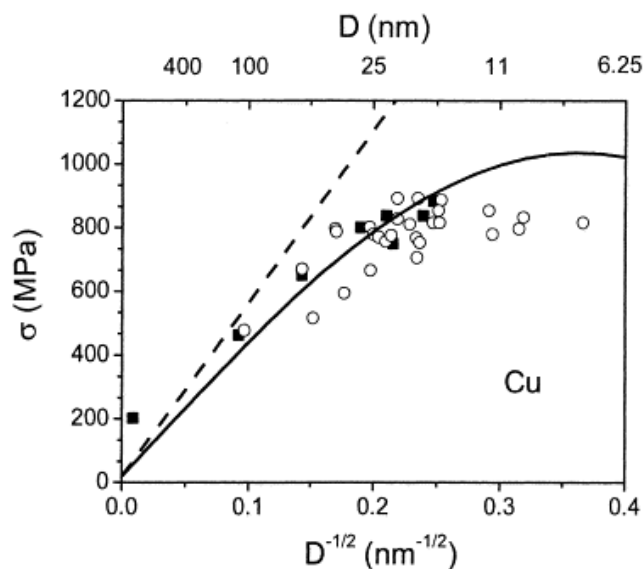
V technické praxi hraje přenos tepla velkou roli od chlazení motoru, chlazení jádra reaktoru, v tepelných výměnících až po obrábění, kde je zásadní odvod tepla z místa řezu čím se zmenšuje tepelně ovlivněná oblast a zvyšuje životnost nástroje. Jako přenosné médium se používají různé chladicí kapaliny, které však ne vždy mají dobrou tepelnou vodivost. Pro zlepšení tepelné vodivosti se přidává malé množství nanočástic, tím vzniklá tekutina se nazývá nanokapalina. S úspěchem se využívá přidání nanodiamantů, které mají téměř stokrát lepší tepelnou vodivost než má měď, kdy přidáním 1 hm% nanodiamantů do kapaliny se zlepšila její tepelná vodivost o 10% [9].

Zvýšení meze kluzu

Zatím neexistuje vhodný postup, jak určit mez kluzu jednotlivých nanočástic, avšak změna meze kluzu v závislosti na velikosti nanočástic může být pozorována na materiálu, který má podobnou velikost zrna, jako je velikost nanočástic. Změna meze kluzu v závislosti na velikosti zrna je dobře popsána pomocí Hall-Petchova vztahu [10]:

$$R_{el} = \sigma_i + k \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

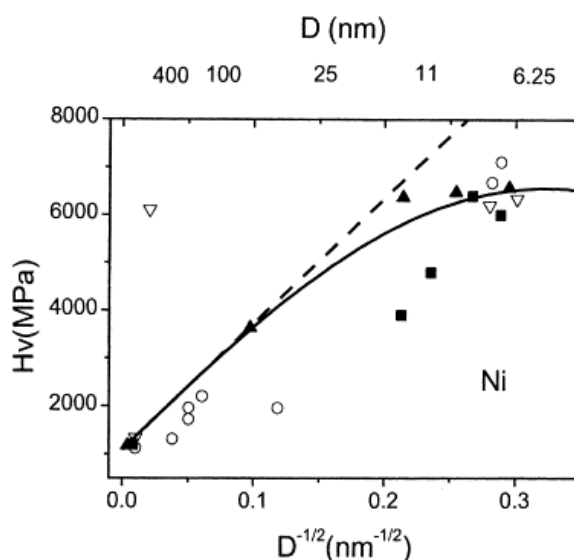
Tento vztah se dá použít i pro materiály, jejichž velikost zrn se pohybuje řádově v nanometrech, avšak s omezením, kdy Hall-Petchův vztah přestává platit pro materiály jejichž rozměry zrn jsou menší než 15-30 nm v závislosti na materiálu. Pro příklad byl vybrán experiment na vzorku z mědi. Bylo dokázáno, že ve výše zmíněné oblasti dochází k maximu a následně se začne mez kluzu u materiálů znovu snižovat, což je vykresleno na **Graf 1.**, kde plná křivka představuje proložení experimentálních dat, značených čtverečky a kroužky, pomocí metody nejmenších čtverců a čárkovaná přímka je zobrazení Hall-Petchova vztahu [10].



Graf 1 Závislost meze kluzu na velikosti zrna pro měď [10]

Zvýšení tvrdosti

Stejně jako u stanovení meze kluzu nanočástic, tak i tvrdost nelze pro jednotlivé nanočástice určit, tudíž se měření provádí na vzorku materiálu, který je tvořen zrny o velikosti v nanometrech. Používanou metodou pro měření tvrdosti je Vickersova zkouška tvrdosti. Stejně jako mez kluzu lze i tvrdost materiálu popsat obdobou Hall-Petchova vztahu, který udává závislost mezi tvrdostí a velikostí zrna. Experimenty ukázaly, že se tvrdost zvyšuje pouze po určitou velikost zrn a následně začne tvrdost klesat, kdy maximum tvrdosti je pro každý materiál jiný. Průběh tvrdosti pro materiál z niklu je zobrazen na **Graf 2**, kde plná křivka představuje proložení experimentálních dat pomocí metody nejmenších čtverců a čárkovaná přímka je zobrazení Hall-Petchova vztahu. Na obrázku je tvrdost v jednotkách MPa. Pro převedení na jednotky Hv platí $1 \text{ Hv} = 9,8 \text{ MPa}$. Pro zjednodušení převodu na Hv stačí vydělit tvrdost z grafu desíti [10].



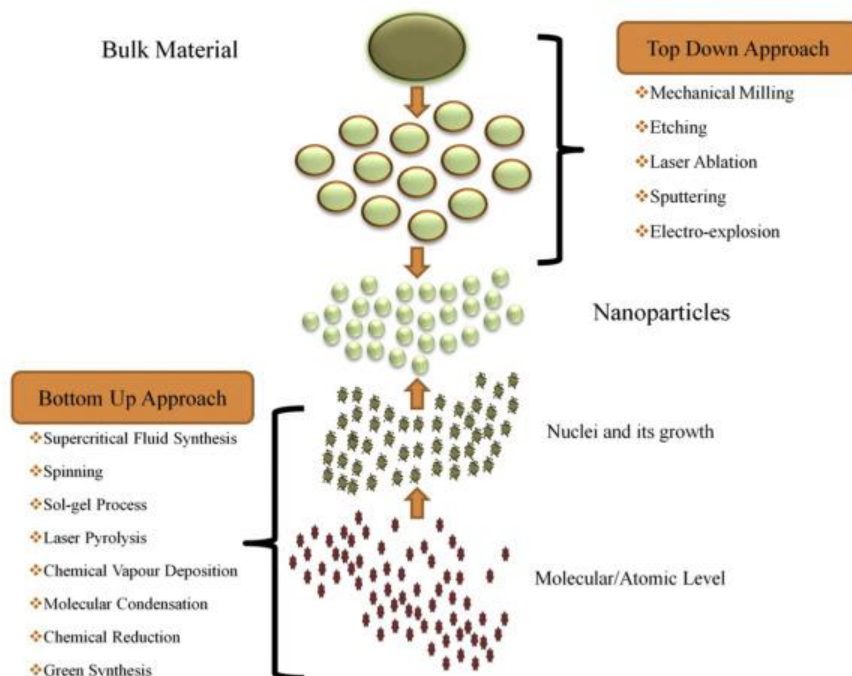
Graf 2 Závislost tvrdosti na velikosti zrna pro nikl [10]

2.1.5 Výroba nanočástic

Výsledným produktem při výrobě nanočástic jsou tzv. nanoprášky, kdy výsledné vlastnosti nanoprášku resp. nanočástic závisí nejen na materiálu, ale taky na tvaru a velikosti. Různou kombinací se může dosáhnout velká škála vlastností. Při výrobě se musí vzít v potaz několik faktorů, jako energetická náročnost, náklady, toxicita a dopad na životní prostředí, kde náklady a dopad na životní prostředí hrají největší roli [11].

Pro výrobu nanočástic se používají dva přístupy tzv. „metoda svrchu dolů“ (z angl. Top-down) a „metoda zdola nahoru“ (z angl. Bottom-up). Metoda svrchu dolů a metoda zdola nahoru se dále označuje jako suchá (fyzikální) a mokrá (chemická) metoda. Metoda svrchu dolů spočívá v mechanickém, chemickém působení na sypký materiál, kdy dochází ke štěpení materiálu na menší části do doby, než vzniknou nanočástice.

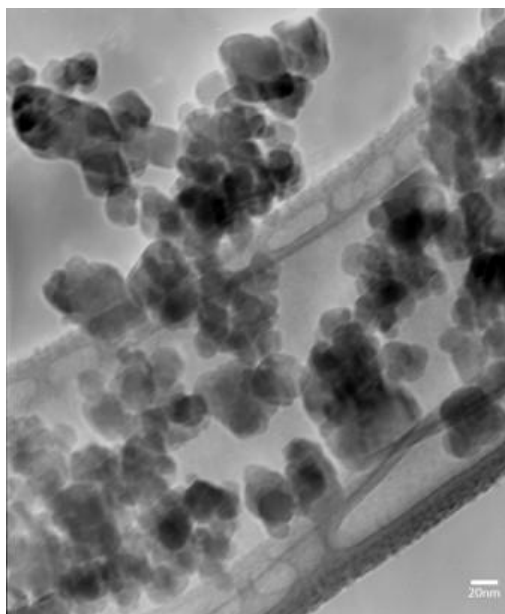
Při metodě zdola nahoru se nanočástice postupně budují, kdy dochází ke spojování jednotlivých atomů, molekul, jejich následného růstu do požadované velikosti a tvaru nanočástic. Tato metoda se používá pro výrobu menších a uniformnějších nanočástic [11], proto je užívanější než metoda svrchu dolů. Obě metody jsou schematicky znázorněny na **Obr. 3**.



Obr. 3 Znáznornění metody svrchu dolů a zdola nahoru [12]

Kuličkové mletí

Užívanou metodou shora dolů pro vytvoření nanočástic je kuličkové mletí. Pro příklad je vybrána výroba nanočástic z magnetitu. Jako vstupní materiál byly použity železné částice o rozměrech dvacet až čtyřicet mikrometrů o hmotnosti 2,289 g. Společně s prachem byla dána do mlecího bubnu 5 ml destilované vody a kuličky z korozi-vzdorné oceli o průměru 10 mm. Následně byla směs mleta po dobu 1, 6, 12, 24 a 48 h rychlostí bubnu 300 ot./min. Po uplynutí jednotlivých časů byl ze směsi odebrán vzorek pro zkoumání. V závislosti na délce mletí se velikost nanočástic pohybovala od 23,5 nm po 6 hodinách až po hodnotu 33,2 nm po 48 hodinách mletí. Zde s rostoucím časem roste i velikost nanočástic, což je podle autora způsobeno studeným svařováním při mletí, neboť obecně se předpokládá, že prodloužením doby mletí se zmenšuje velikost nanočástic. S dobou mletí také roste podíl magnetitu, který vzniká chemickou reakcí železa s vodou za vzniku magnetitu a vodíku. Výsledný produkt můžeme vidět na **Obr. 4**, kde je patrné shlukování nanočástic do aglomerátů, což je jedna z nevýhod využití kuličkového mletí [13].



Obr. 4 nanočástice magnetitu [13]

Laserová ablace

Metoda laserové ablace, je další z metod shora dolů, která se používá pro výrobu nanočástic. Tato metoda spočívá v odtavování materiálu pomocí zaostřeného paprsku laseru. Materiál je ponořen v kapalině, která odvádí teplo. Jako příklad bude uvedena výroba nanočástic oxidu zinečnatého. Pro výrobu byla použita fólie zinku o tloušťce 1 mm a čistotě 99,99 %, která byla upevněna na magnetické podložce, která se může otáčet, aby nedošlo k odtavování materiálu na jednom místě. Fólie byla ponořena do roztoku deionizované vody a 3 % roztoku peroxidu vodíku. Pro výrobu nanočástic byl použit Q-switched Nd-YAG laser (Spectra physics Model GCR 100), o vlnové délce 355 nm a byl použit generátor třetí harmonické frekvence. Energie pulsního laseru se pohybovala mezi 40 až 130 mJ za puls. Následně byl laser zaměřen pomocí čočky s ohniskovou vzdáleností 250 mm, díky čemuž byl výsledný poloměr zaměřené oblasti okolo 0,08 mm. Po čtyřiceti minutách ozařování, je výsledkem suspenze nanočástic ZnO_2 ve vodě, které mohou být separovány pomocí centrifugy a následně žihány pro získání nanočástic oxidu zinečnatého. V závislosti na teplotě žihání lze dosáhnout nanočástic o velikosti 5–19 nm. Avšak nanočástice oxidu zinečnatého lze získat pokud původní roztok bude jen deionizovaná voda [14].

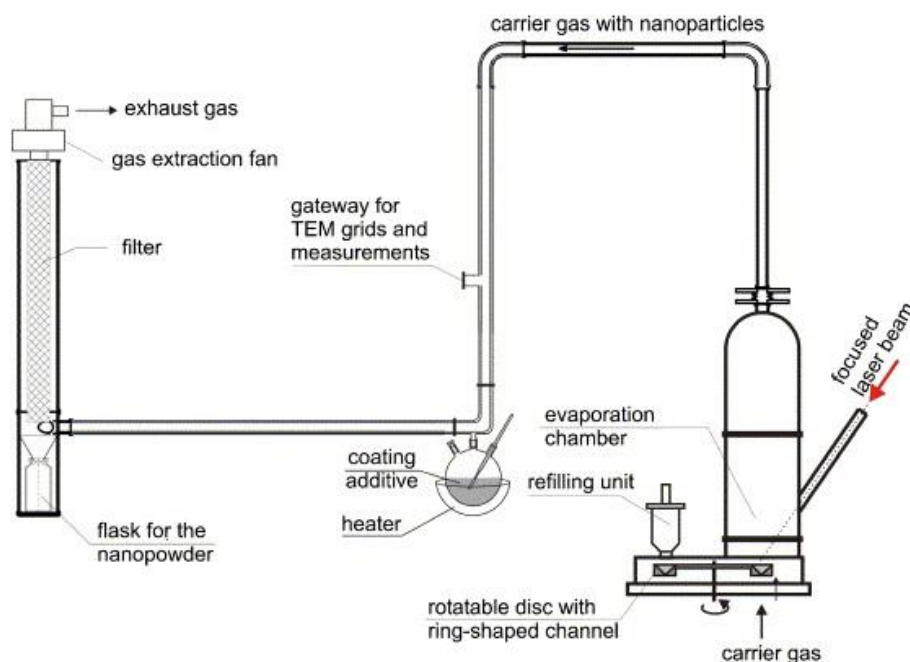
Výroba nanodiamantů detonační metodou

Nanodiamanty lze vyrábět několika způsoby, avšak nepoužívanější i v průmyslovém měřítku je pomocí detonace, kdy se jedná o metodu zdola nahoru. Výroba se uskutečňuje v detonační komoře, kdy jako exploziv se používá směs TNT a hexogenu (označovaný též jako Cyklonit nebo RDX) v poměru od 40/60 do 70/30 TNT/hexagon.

Detonační komora je následně vyplněna inertním médiem, což může být dusík, oxid uhličitý, voda, nebo led, kdy médium slouží k odvodu tepla. Po detonaci dochází k nárustu tlaku a teploty v komoře na hodnoty v rozmezí 10-16,5 GPa a 2600-3100 °C a vzniká tlaková vlna, která se rozpíná a odráží od stěn komory. Následně dochází ke kondenzaci uhlíku a jeho shlukování. Jednotlivé shluky mezi sebou začnou reagovat a formují se nanokapičky. V jednotlivých kapičkách začne probíhat krystalizace nanodiamantů namísto stabilnějšího grafitu, což je zapříčiněno chlazením. Pro získání nanodiamantů se vzniklý produkt (diamantová směs) následně čistí pomocí zředěné kyseliny dusičné při teplotě 240 °C a tlaku 80 atmosfér v autoklávech [15].

PWE metoda

Pro výrobu kovových a magnetických nanočástic se s úspěchem používá odpařovací metoda pomocí CO₂ laseru, kdy se jedná o metodu zdola nahoru. Jako základní materiál je použit hrubý prášek o velikostech částic řádově v nanometrech až milimetrech. Částice jsou následně zplyňovány pomocí laserového paprsku. Vzniklé horké plyny jsou neustále odfoukávány proudem procesního plynu. Díky malé oblasti působení laseru vzniká teplotní gradient mezi horkými plyny a okolní atmosférou, v důsledku toho probíhá proces nukleace a růst částic velmi rychle. Krátká doba růstu pak vede ke vzniku malých částic. Následně jsou nanočástice unášeny procesním plynem a pomocí filtrace zachytávány do skladovací nádoby [16]. Na Obr. 5. je zobrazena aparatura pro odpařovací metodu.



Obr. 5 Aparatura pro odpařovací metodu [16]

2.1.6 Materiál nanočástic

Nanočástice můžeme dělit podle několika kritérií, jako je velikost, tvar, základní materiál a chemické složení. Dle chemického složení a základního materiálu dělíme nanočástice na:

Nanočástice založené na uhlíku

Mezi dvě nejpoužívanější struktury patří fullereny a uhlíkové nanotrubice. Fullereny jsou tvořeny kulovitou dutou klecí v níž můžou být vázány přídavné prvky, které zásadně mění výsledné vlastnosti. Mezi jejich nejzásadnější vlastnosti patří vysoká míra elektrické vodivosti, vysoká pevnost a elektronová afinita [17].

Uhlíkové nanotrubice jsou charakterizovány jako vrstvy grafitu, které se dokážou po sobě valit a jsou uspořádány do trubic ve více vrstvách. Podle počtu vrstev se mohou rozdělovat na jednovrstevné, dvou a vícevrstevné [18]. Nanotrubice mají vysoký modul pružnosti (až 1 TPa), tepelnou vodivost skoro dvakrát větší než diamant a elektrickou vodivost mnohonásobně větší než měď [18, 19], díky čemuž se mohou využít v nanokompozitech, nanomazivech, nanoelektrických zařízeních, senzorech i jako filtry [18, 19].

Dále do skupiny nanočástic, jejichž základem je uhlík patří detonované nanodiamanty, které krom vysoké tvrdosti a dobré tepelné vodivosti, mají výbornou biokompatibilitu, chemickou stálost a schopnost vázat na svůj povrch molekuly, proteiny, nebo léčiva a tím si získali pozornost v oblasti léčbě nádorů [20].

Kovové nanočástice

Dále se pro výrobu nanočástic používají různé kovy například železo, zlato, stříbro, měď, nikl nebo titan a jejich oxidy.

Zlaté nanočástice se uplatnily díky dobré chemické stabilitě, optickým vlastnostem, snadné výrobě a úpravám převážně v oblasti biomedicíny [21].

Stříbrné nanočástice se uplatnily k tištění elektrických obvodů, ve výrobě flexibilní mikroelektroniky, která může být nanášena na různé povrchy [22]. Své uplatnění si našly i v medicíně, kde se využívají pro své antimikrobiální vlastnosti [23].

Měď má mnohé praktické využití jak v makroměřítku tak i v nanoměřítku. Díky svým vlastnostem se využívá pro vytvoření suspenze s chladicí kapalinou pro zlepšení tepelné vodivosti [21, 24], následně se může využít v bateriích pro zvýšení množství elektrické energie [21, 25], dále se může využívat v polovodičích, v nanomazivech, ve snímačích, v elektronice a pro výrobu antimikrobiálních povrchů [21].

Železo a převážně jeho oxidy se využívají na výrobu magnetických nanočástic, díky nízkým nákladům na výrobu a chemické stálosti. Své uplatnění našly v medicíně pro separaci molekul (např. RNA molekulu) z roztoků, kde díky povrchové úpravě hledanou sloučeninu navážou a následně se nanočástice pomocí magnetického pole odseparují a separát se dále zkoumá. Díky možnosti povrchové úpravy se mohou na nanočástici vázat cytostatika, kde následně jsou nanočástice naváděny do tumoru pro dlouhodobé podávání léků, aniž by se poškodila okolní tkáň. Následně své využití uplatnily v nanomazivech a nanokapalinách [26].

Keramické nanočástice

Jako materiály pro výrobu keramických nanočástic se používá oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid zirkoničitý (ZrO_2).

Nanočástice z oxidu křemičitého mají široké použití. Využití našly v oblasti fotovoltaiky, kde se nanášejí v tenkých vrstvách na fotovoltaičné články pro zlepšení absorpce světelného spektra, což je zapříčiněno snížením reflektivity povrchu [27]. Dále se mohou využít v lithium-iontových bateriích, kde uhlíkem poflakované nanočástice slouží jako anodový materiál a výsledná baterie může uložit větší množství elektrické energie [28].

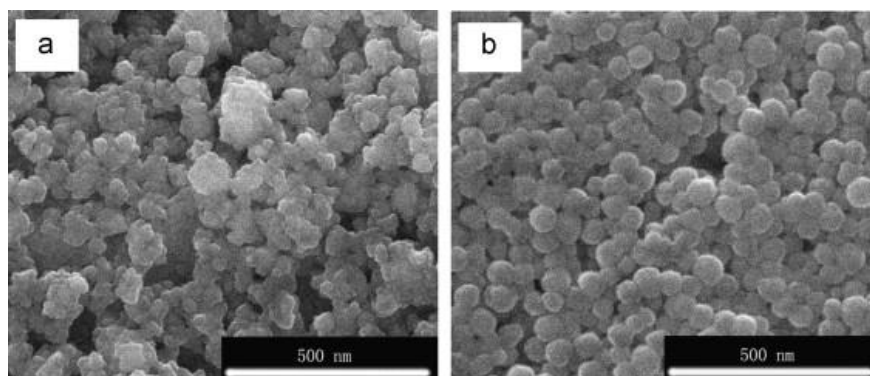
Nanočástice vyrobeny z oxidu hlinitého se využívají jako příměsi. Například po přidání do keramiky, která se používá při výrobě kondenzátoru, se zvýší její relativní permeabilita a tím se zvýší celková kapacita kondenzátoru [29]. Dále se využívá jako příměs do solí, které jsou využity ve věžích v solárně tepelných elektrárnách, pro uchovávání a předávání tepelné energie ze Slunce, kde vzniklá vodní pára roztáčí turbíny a ta generují elektřinu. Nanočástice jako příměs zlepšují tepelnou vodivost a kapacitu této soli [30].

2.1.7 Tvary nanočástic vhodné pro tribologické účely

Při výrobě nanoprášku lze dosáhnout různých tvarů nanočástic, avšak ne všechny tvary jsou vhodné pro tribologické účely. Nevhodnou volbou nanočástic jako aditiv může dojít ke zvýšení tření a opotřebení, což je opačný efekt, než kterého se chce dosáhnout.

Kulový tvar

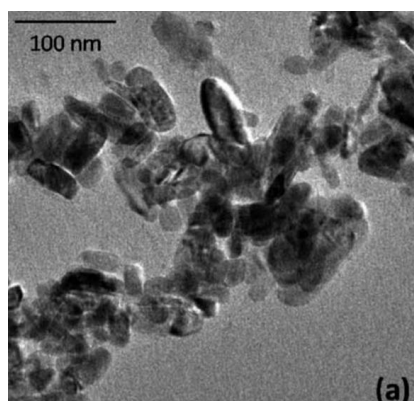
Dosáhnout kulového tvaru nanočástic je poměrně obtížné, tudíž se pro tribologické účely používají nanočástice, které se považují za téměř kulové. Kulových nanočástic se většinou dosahuje metodou zdola nahoru [15, 31, 32], kdy dochází ke nukleaci zárodku nanočástic a k následnému růstu. Pokud je však tvar nanočástic nevyhovující, může být dále upraven pomocí chemických reakcí [31], což je zobrazeno na **Obr. 6**.



Obr. 6 Nanočástice Al_2O_3 vlevo bez modifikace, vpravo s modifikací [31]

Nanotyče

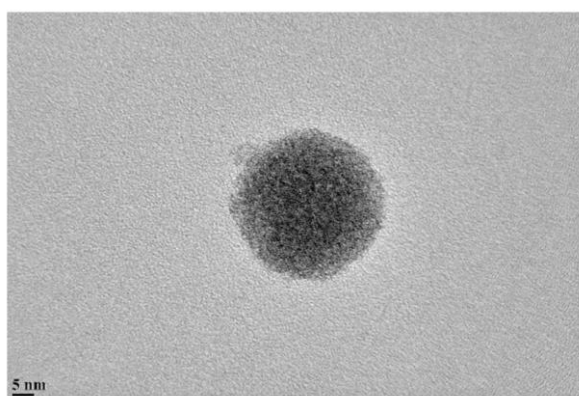
Dalším tvarem nanočástic, které se používají pro tribologické účely, jsou nanotyče. Na obrázku jsou zobrazeny nanotyče, které mají průměr 20–30 nm a délce mezi 30–70 nm. Stejně jako pro kulové nanočástice se nanotyčím přisuzuje stejná funkce, jako mají valivá ložiska [33]. Snímek ze nanočástic z SEM je zobrazen na **Obr. 7**



Obr. 7 CuO nanotyče [33]

Fullereny

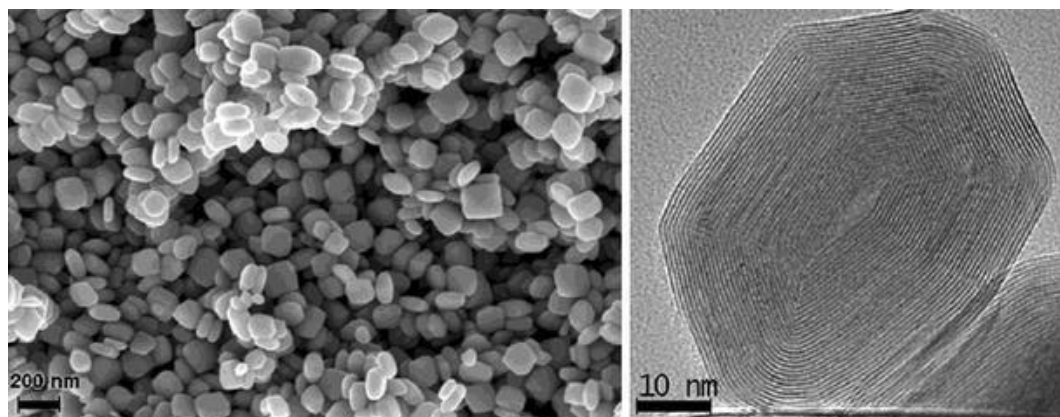
Fullereny jsou jednovrstvé struktury, které se skládají z atomů uhlíku. Prostorově jsou atomy uhlíku uspořádány do koule, nebo elipsoidu viz **Obr. 8** [17].



Obr. 8 Fulleren [61]

Cibulové nanočástice

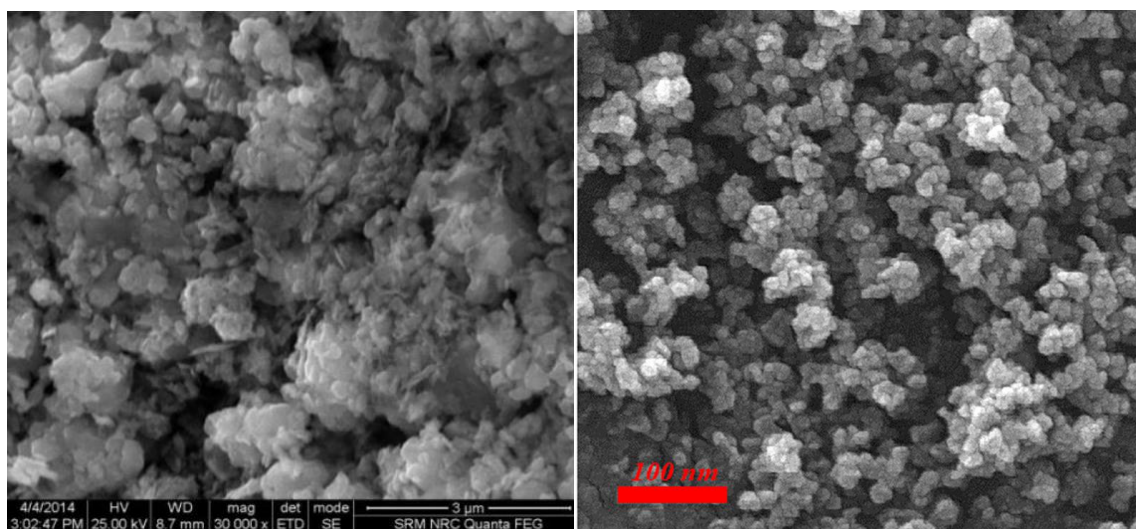
Cibulové nanočástice, nebo také fullerenům podobné nanočástice, mají uspořádány jednotlivé atomy do vrstev. Díky tomu, že vazby mezi vrstvami nejsou dostatečně silné, může dojít při zatížení k odlupování jednotlivých vrstev viz **Obr. 9** [34]



Obr. 9 Cibulové nanočástice [34]

Nespecifikované tvary

Dosáhnout výše popsaných tvarů může být někdy náročné, což se projeví na výsledné ceně nanoprášku. Pro tribologické účely proto mohou být vhodné i nanočástice, u kterých nejde popsat jejich tvar viz **Obr. 10**.



Obr. 10 vlevo CuO nanočástice [44], Al₂O₃ nanočástice [32]

2.1.8 Stabilizace nanočástic

V kapitole Specifikace nanočástic bylo ukázáno, že oproti makroměřítku mají nanočástice mnohonásobně větší povrch než objem, což vede k větší aktivitě na jejich povrchu. Ve většině aplikací jsou však nanočástice vystaveny prostředí, které vede k jejich degradaci, ať už k chemické degradaci např. v biomedicínské aplikaci, v koloidních roztocích, nebo v nanomazivech, dochází i k jejich fyzikální degradaci, kdy se jednotlivé nanočástice vlivem difuze spojují a tím dochází ke koagulaci nanočástic v roztoku [35]. Aby k této degradaci nedocházelo využívají se dva přístupy stabilizace nanočástic. Sterická stabilizace a elektrostatická stabilizace nanočástic [35, 36]. Obě metody mohou být použity samostatně ale i společně.

Sterická stabilizace nanočástic

Sterická stabilizace spočívá v navázání polymerové molekuly, bio-polymeru, povrchově aktivní látky (surfaktantu) na povrch nanočástice. Výsledná vrstva by však měla být co nejmenší, aby se zamezilo změně vlastností nanočástic. Výsledná vrstva pak odpuzuje okolní agresivní prostředí a tím je nanočástice chráněna. Tento postup stabilizace se využívá například pro nanočástice využívané v biomedicíně, u feroKapalin, nebo v nanomazivech [35].

Elektrostatická stabilizace nanočástic

Elektrostatická stabilizace spočívá ve vytvoření záporného náboje na povrchu nanočástice, který je udržován vlivem elektrolytu. Povrchy nanočástic jsou následně stejně nabity a tím se překonávají přitažlivé Van der Waalsovy síly silami elektrostatickými. Pro příklad nanočástice oxidu železa jsou stabilizovány pomocí rozpuštění citrátu sodného v emulzi nanočástic a vody. Následně jsou citrátové anionty vázány na povrchu nanočástice a tím vytvářejí záporný náboj [36], což vede k zamezení shlukování a degradaci.

2.2 Nanomaziva

Jednou z nejzákladnějších metod pro snížení energetických ztrát, způsobených třením a zahříváním, v soustavě je využití maziv a olejů. Jejich aplikace je však limitující, kdy proti sobě jde několik trendů, jako je viskozita, energetické ztráty a schopnost ochrany povrchu před opotřebením. Čím je mazivo viskóznější, tím lépe chrání povrch, ale tím větší jsou ztráty způsobeny vnitřním třením a naopak. Řešením jak vybalancovat zmíněné vlivy, může být syntéza nových maziv a olejů, nebo zlepšení vlastností stávajících. Jako nejlepší možnost se ukázalo zlepšení vlastností stávajících maziv pomocí přidání malého množství nanočástic, kdy výsledné vlastnosti se mohou ladit kombinací oleje/maziva, typu nanočástic, jejich velikostí, zvolený materiál a tvar.

2.2.1 Specifikace nanomaziv

Výroba nanomaziv spočívá přidáním aditiv do olejů resp. maziv, jejichž přidáním se zlepšují vlastnosti maziva. Nanomazivo můžeme rozdělit do tří složek. První složka je olej resp. mazivo, dále jsou to samotné nanočástice, které zabraňují výraznému opotřebení a zlepšují kluzné vlastnosti a jako poslední je povrchově aktivní látka, která zabraňuje přímého styku nanočástic s olejem resp. mazivem a zabraňuje sedimentaci a koagulaci nanočástic v mazivu [37].

2.2.2 Výroba nanomaziv

Pro výrobu nanomaziv se úspěšně používají dvě metody a jsou to jednokroková metoda (z angl. One-Step Method) a dvoukroková metoda (z angl. Two-Step Method).

Jednokroková metoda

Tato metoda sloužící pro výrobu nanomaziv slučuje dohromady samotnou výrobu nanočástic a následnou výrobu nanomaziva. Pro výrobu nanomaziv pomocí jednokrokové metody existuje několik postupů, jako je PVD, PWE, nebo chemická metoda. Kupříkladu PWE metoda spočívá v evaporaci tenkého drátu v rotační komoře. Evaporace je způsobena průchodem pulzního proudu o vysokém napětí, což způsobí rychlé vypaření drátu. Horká plazma je následně ochlazená pomocí směsi argonu a kyslíku, tím zkondenzuje na malé nanočástice, které jsou následně smíchávány s mazivem ve stěně komory [38]. Díky tomu se při výrobě nanočástic nemusí řešit sušení, skladování, transport, a disperze nanočástic v mazivu, tím se minimalizuje agregace nanočástic a zvýší se stabilita nanomaziva [39].

Dvoukroková metoda

Touto metodou nanomaziva vznikají pomocí disperze nanočástic v mazivu. V prvním kroku jsou nanočástice vyrobeny jako prach, který je následně sušen, skladován a přepravován. Následuje druhý krok, kterým je samotná disperze nanočástic v mazivu. Nevýhody této metody je agregace, ke které dochází v obou krocích, a sedimentace nanočástic. Následek procesu je tvorba agregátů, které napomáhají k abrazi, zanášení filtrů a zvyšují viskozitu maziva. Druhým problémem je stabilita nanočástic v mazivu, kdy kvůli sedimentaci se negují pozitivní vlastnosti, kterých se získalo výrobou nanomaziva. Oběma jevům se dá zabránit pomocí přidání povrchově aktivní látky, nebo pomocí míchaní nanočástic metodou ultrazvuku [39]. Metoda využívající ultrazvuk spočívá v ponoření tyče do maziva s nanočásticemi. Tyč následně začne vibrovat vysokou frekvencí řádově v desítkách kilohertzů. Vzniklé ultrazvukové vibrace přenášené kapalinou začnou nanočástice rovnoměrně rozmíchávat po celém objemu maziva [40].

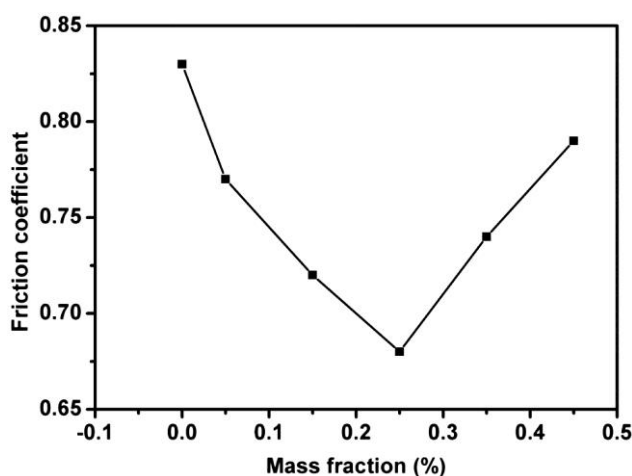
Největší výhodou dvoukrokové metody je však ekonomičnost, kdy nanočástice, které jsou již vyráběny v průmyslovém měřítku [39], stačí přidat do maziva a následně zajistit rovnoměrnou disperzi.

2.2.3 Vlastnosti maziv ovlivněné přidáním nanočástic

Koeficient tření

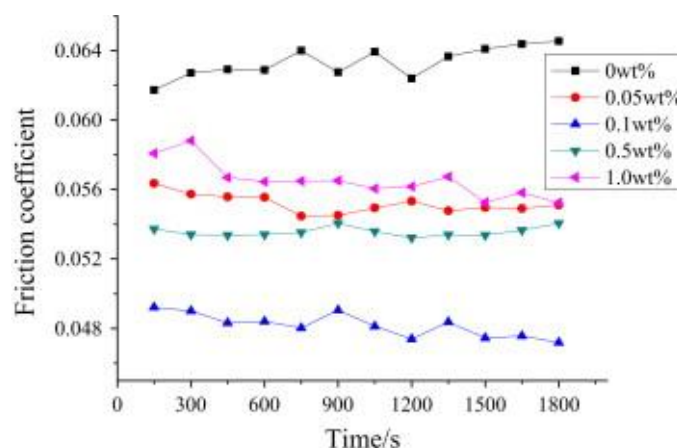
Jednou ze základních vlastností maziv je snížení koeficientu tření ve styku dvou dotýkajících se ploch. Snížením koeficientu tření se snižuje tření v místě dotyku, což vede ke snížení opotřebení, snížení energetických ztrát a prodloužení životnosti. V současné době proto probíhá experimentální výzkum vlivu nanočástic na snížení koeficientu tření pro různé kombinace maziv a nanočástic. Ne všechny kombinace však vykazují zlepšení ve snížení koeficientu tření, nebo ke snížení dojde při vysokých koncentracích nanočástic, což nevyhovuje ekonomickým požadavkům, níže proto budou uvedeny výzkumy, u kterých se prokázalo snížení koeficientu tření maziva po přidání nanočástic.

Qiang He, Li Anling, Zhang Yangming, Songfeng Liu a Guo Yachen zkoumali ve své práci závislost mezi hmotnostním podílem měděných nanočástic o průměrné velikosti 10 nm, přidávaných do 1171 lithiového maziva, a koeficientem tření. Rovnoměrná disperze byla dosažena pomocí ultrazvukového míchání. Pro zjištění závislosti hmotnostního podílu a koeficientu tření byl použit standartní čtyřkuličkový test se zátěží 392 N, rychlosti otáček 1200 ot./min, teplotě 75 °C po dobu 60 min., kdy jednotlivé testy probíhaly pro mazivo s podílem nanočástic 0,15; 0,25; 0,35; a 0,45 % [41] výsledky pak byly zaneseny do **Graf 3**. Ukázalo se, že nejmenší koeficient tření se vyskytuje u maziva s hmotnostním podílem 0,25 % [41] při němž dojde ke snížení koeficientu tření o 18,2 %.



Graf 3 Závislost koeficientu tření na množství měděných nanočástic [41]

Luo Ting, Xiaowei Wei, Xiong Huang, Ling Huang a Fan Yang zkoumali vliv Al_2O_3 nanočástic o průměrné velikosti 78 nm v mazacím oleji, jehož hustota při 15 °C je 885 kg/m³ a o viskozitním indexu 95 [31]. Výsledky získali pomocí čtyřkuličkového testu provozovaného při teplotě 75 °C, 1450 ot./min a zátěži 147 N po dobu 30 minut. Jednotlivé testy probíhaly pro maziva s 0,05; 0,1; 0,5; 1 % podílem nanočástic. Ukázalo se, že největší snížení koeficientu tření se vyskytuje u maziva s 0,1 %hm nanočástic, kdy došlo ke snížení tření o 17,61 % v porovnání se základním olejem. Hodnoty z experimentu byly vyneseny do **Graf 4** [31], kde je zobrazen průběh koeficientu tření na množství nanočástic v čase.



Graf 4 Závislost koeficientu tření na množství Al_2O_3 nanočástic [31]

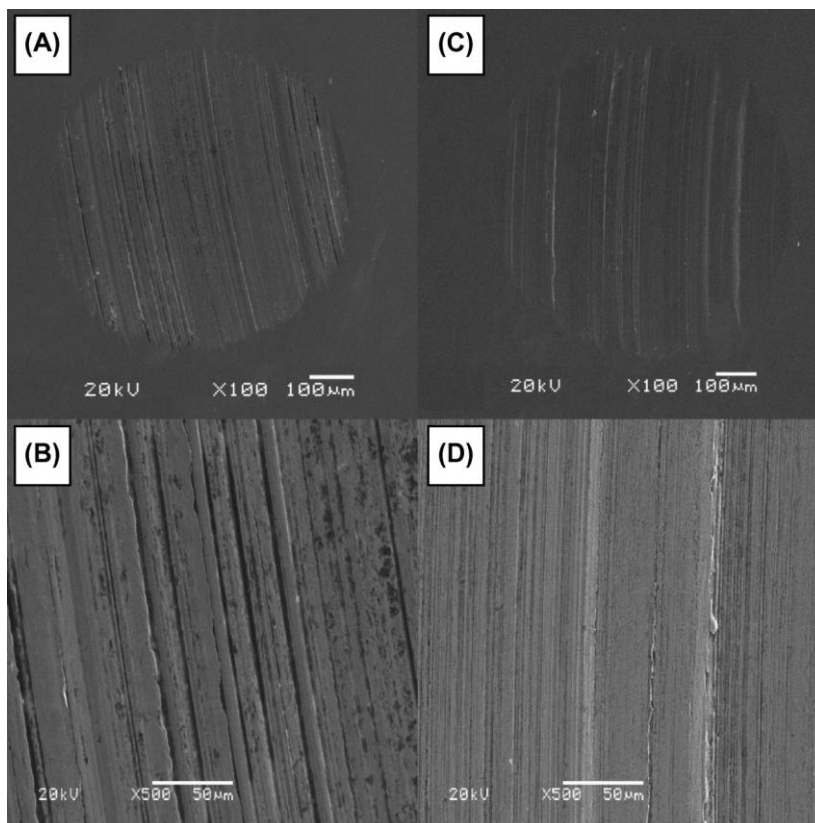
Existují další studie, které se zabývají otázkou, jak se změní koeficient tření maziva po přidání nanočástic. Za zmínku dále stojí studie Li Wei a spol. [42], která se zabývá jak se změní vlastnosti maziva po přidání $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ kompozitních nanočástic, nebo studie C. Pownraj a Valan Arasu A. [43], která se zabývá jak se změní vlastnosti maziv po přidání grafitických nanočástic.

Ve všech zmíněných studiích lze pozorovat trend, kdy koeficient tření klesá společně s přidáním množstvím nanočástic, avšak pouze do určité hodnoty, samozřejmě, že pro každou kombinaci nanočástic a maziva je tato hodnota jiná. Pokud je tato hodnota překročena začne koeficient tření znovu růst.

Zvýšení ochranných vlastností maziva před opotřebením

Další vlastností, kterou lze z tribologických testů maziv, jako je čtyřkuličkový test, vyhodnotit je jak dokáže testované mazivo chránit před opotřebením. Ochrana před opotřebením je zprostředkována vytvořením dostatečného filmu z maziva, který chrání před stykem dvou vzájemně se pohybujících povrchů a tím chrání před opotřebením. Přidáním nanočástic ve výsledku způsobí, že rýhy způsobené otěrem jsou menší než při použití pouhého maziva, díky tomu se prodlužuje životnost povrchu. Snížením opotřebení se zabývalo vícero studií, například již výše zmíněné studie Qiang He [41], Luo Ting [31], Li Wei [42], C. Pownraj [43].

Jako názorný příklad je uvedena studie Qiang He, Li Anling, Zhang Yangming, Songfeng Liu a Guo Yachen [41]. Pro získání dat byl proveden čtyřkuličkový test 1171 lithiového maziva s přidáním 0,25 % Cu nanočástic, neboť pro tuto koncentraci je koeficient tření nejmenší. Test probíhal se zátěží 392 N, rychlosti otáček 1200 ot./min, při teplotě 75 °C po dobu jedné hodiny. Na **Obr. 11** pořízeného z rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) je patrné snížení opotřebení na kontaktní oblasti a zmenšení hloubky rýh při použití nanomaziva [41].



Obr. 11 Snímky z čtyřkuličkového testu A) opotřebení po použití základního maziva, B) zvětšená oblast A, C) opotřebení po použití maziva s 0,25 % měděných nanočástic, D) zvětšená oblast C [41]

Viskozita a viskozitní index

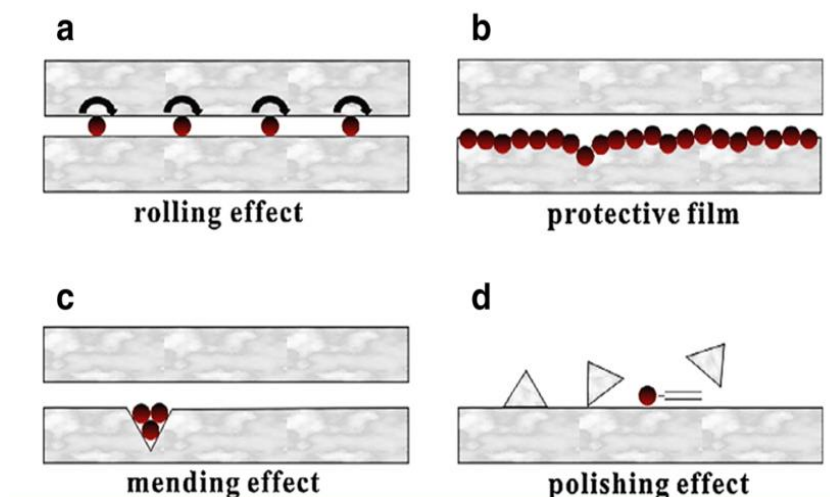
Další ze základních vlastností maziv je viskozita a viskozitní index, kde čím větší je hodnota viskozitního indexu, tím méně se mění viskozita maziva při změně teploty. Správná viskozita maziva pak zaručuje tvorbu přiměřené tloušťky ochranného filmu, který zabraňuje opotřebení. Studie [44, 45] ukázaly, že zvýšením objemu nanočástic roste i viskozitní index a tím méně se mění viskozita maziva s teplotou. Zvýšení viskozitního indexu se může využít při studeném startu motoru, kde i při nižších teplotách se zachová poměrně dobrá viskozita, což zabraňuje opotřebení a poškození, ke kterému může dojít při studeném startu [44].

Tepelná vodivost

Kromě mazání je další funkce maziva odvod tepla z místa styku dvou ploch, což prodlužuje životnost povrchů a umožňuje vyšší rychlosti. Vlastnost, která ovlivňuje schopnost maziva šířit teplo ve svém objemu je tepelná vodivost. Zvyšováním podílu nanočástic v mazivu se zvyšuje jeho tepelná vodivost, čímž se zlepšuje šíření tepla v mazivu a jeho odvod z místa tření. Dále pak přidáním nanočástic se tepelná vodivost zvyšuje se vzrůstající teplotou oproti původnímu mazivu, kde tepelná vodivost mírně klesá [32].

2.2.4 Mechanismy mazání

Přidáním nanočástic se nejen mění vlastnosti maziv, ale také se mění i mechanismy, které se při mazání uplatňují a jsou to valivý mechanismus (rolling mechanism), samoopravný mechanismus (self-repairing mechanism), leštící efekt (polishing mechanism) a tvorba tribologického filmu (tribo-film formation), kdy při mazání může docházet i k několika mechanismus zároveň [46]. Jednotlivé metody jsou znázorněny na **Obr. 12**.



Obr. 12 Znázornění mechanismů mazání a.) valivý mechanismus, b.) tvorba tribologického filmu, c.) samoopravný mechanismus, d.) leštící efekt [47]

Valivý mechanismus

Tento mechanismus se uplatňuje při použití sférických nanočástic a nanotyčí, kdy funkce jednotlivých nanočástic může být připodobněna kuličkovým ložiskům, tím se převádí klouzání dvou povrchů na valení povrchů po nanočásticích [46, 48]. Díky nanočásticím se také zvyšuje maximální možné zatížení přenášené mazivem [31, 48]. Valivý mechanismus je limitován požadavkem sférického tvaru nanočástic a kruhového průřezu nanotyčí, který závisí na tloušťce mazacího filmu, pokud je velikost nanočástic menší, než je tloušťka filmu uplatňuje se valivý mechanismus. Je-li tloušťka menší, než je velikost nanočástic dochází k jejich deformaci a tvorbě tribologického filmu [49].

Leštící efekt

Leštící mechanismus se uplatňuje u velmi tvrdých nanočástic například u nanodiamantů. Při pohybu nanočástic, které mají velkou tvrdost dochází k leštění způsobených procesem abraze. Díky tomu se snižuje drsnost povrchu a zvýšení jeho tvrdosti [46, 48, 50]. Zlepšením kvality povrchu se snižují třecí síly, zlepšují tribologické vlastnosti a snižuje se teplo, které by třením vzniklo.

Samoopravný mechanismus

Samoopravný mechanismus spočívá v hromadění nanočástic v rýhách a nerovnostech, čímž se snižuje jejich podíl v nanomazivu. Podmínkou je, aby nanočástice byly dostatečně malé a mohly vyplnit rýhy [46]. Vlivem nerovností povrchu dochází k hromadění nanočástic v rýhách a působením zatížení dochází k jejich stlačení. Vyvolaný tlak způsobí lokální zvýšení teploty a tím se jednotlivé nanočástice spojí. Výsledek je hladký povrch a oprava již vzniklých opotřebení. Tento mechanismus se uplatňuje například u nanočástic z mědi [51].

Tvorba tribologického filmu

Tvorba ochranného filmu se ukázala jako podstatná metoda, která snižuje tření. Díky tvorbě ochranné vrstvy se povrchy součástí nedostávají do styku, ale otěr a opotřebení se zprostředkovává pouze mezi ochrannými filmy. Tvorba filmu probíhá v několika krocích. Prvním krokem je vyplnění rýh a vrubů vzniklých při výrobě nanočásticemi. Druhým krokem je vznik filmu při přenášení zatížení, kdy vlivem zvýšeného tlaku a teploty se začne tvořit ochranný film. Výsledkem je povrch, který má většinou zvýšenou tvrdost a sníženou drsnost. Zvýšená tvrdost vede k lepší ochraně součástí, snížená drsnost pak přímo souvisí se snížením koeficientu tření a třecích sil [52]. Výhodou takového filmu je i jeho obnovitel, kdy při opotřebení dochází znovu k zaplnění rýh nanočásticemi a tvorbě filmu [48].

2.2.5 Nežádoucí vnitřní procesy a jejich eliminace

Pro správné fungování maziva je nejdůležitější, aby nanočástice v mazivu byly rovnoměrně rozptýleny, neboť vlastnosti maziva (mazací vlastnosti, zvýšená ochrana, lepší tepelná vodivost aj.) závisí na rovnoměrné disperzi nanočástic. Díky svému malému rozměru jsou nanočástice rozptylovány v mazivu pomocí Brownova pohybu avšak vlivem přitažlivých Van der Waalsových sil dochází k jejich agregaci a následně vzniklé agregáty vlivem gravitace sedimentují. Kvůli nerovnoměrné disperzi nanočástic se znehodnocuje nanomazivo a přichází o vylepšené vlastnosti, které byly dosaženy přidáním nanočástic. Tvorba agregátů tedy nejen snižuje podíl rozptýlených nanočástic, ale kvůli pohybu agregátů může docházet k abrazi [53, 54]. Pro zajištění stability nanočástic v mazivu se používají povrchově aktivní látky, nebo povrchová úprava nanočástic.

Použití povrchově aktivních látek (surfaktantů)

Navázání surfaktantů na povrch nanočástice je jednou z metod pro zaručení jejich stálosti, dále se surfaktant využívá při výrobě nanomaziva, kde zajišťuje disperzní stabilitu nanočástic v mazivu a zabraňuje jejich agregaci a sedimentaci. Jejich přimícháním dochází k navázání molekul surfaktantů na povrch nanočástic [55]. Následně navázané molekuly začnou působit proti Van der Waalsovým silám, čímž zabraňují shlukování nanočástic a dochází tím k jejich stabilizaci v nanomazivu [56]. Použití povrchově aktivních látek je poměrně levná metoda, jak zabezpečit disperzní stabilitu nanočástic, avšak jejich použitím může dojít k nežádoucím efektům. Vlivem zvýšených teplot mohou surfaktanty vytvářet pěny a tím kontaminují mazivo, nebo může dojít ke vytvoření obalu na nanočásticích čímž dojde ke snížení přestupu tepla mezi nanočásticí a mazivem. To vede ke snížení tepelné vodivosti nanomaziva [57], proto pro některé aplikace musela být vyvinutá jiná metoda, jak zajistí stabilitu nanočástic v mazivech.

Povrchová úprava nanočástic

Druhým postupem je modifikace nanočástic již při výrobě, avšak nanomazivo musí být připraveno pomocí dvoukrokové metody. Pro modifikaci se používají různé kyseliny, například kyselina olejová, která se naváže na povrch částice. Výsledkem této modifikace je snížení povrchové energie. Vlivem vysoké povrchové energie působí mezi nanočásticemi přitažlivá síla, která roste s povrchovou energií. Vlivem sil, se začnou nanočástice shlukovat do agregátů, aby snížili svou povrchovou energii. Díky povrchové úpravě se snižuje povrchová energie nanočástic a tím se zabraňuje aglomeraci [55].

2.2.6 Vlastnosti nanočástic ovlivňující vlastnosti maziv

Při samotném použití nanočástic hraje nejdůležitější roli jejich materiál, tvar a povrchová úprava, avšak při výrobě nanomaziv se musejí v úvahu vzít další faktory, jako je velikost a koncentrace nanočástic. Tato kapitola se bude zabývat otázkou, jak ovlivňuje velikost, tvar a koncentrace nanočástic výsledné vlastnosti nanomaziv.

Velikost

Výsledné vlastnosti nanomaziva jsou ovlivněny velikostí použitých nanočástic. Prvně je ovlivněna disperzní stabilita, která je nejdůležitější pro zlepšené vlastnosti nanomaziv. Disperzní stabilita je popsána pomocí rychlostí sedimentace, která je vyjádřena Stokesovým zákonem:

$$v_z = \frac{2(\rho_{NP} - \rho_F)gr^2}{9\mu} \quad (2)$$

,kde v_z je rychlost sedimentace v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, ρ_{NP} je hustota nanočástic v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ_F je hustota maziva v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, g je tíhové zrychlení, r je poloměr nanočástic, μ je dynamická viskozita v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [37]. Zde se ukazuje, že rychlost sedimentace roste s kvadrátem velikosti nanočástic. Pokud je definované rozmezí nanočástic od 1 nm po 100 nm, tak změnou velikosti nanočástic se kinematická viskozita mění řádově od jednotek do desetitisíců.

Tvar nanočástic

Různé tvary nanočástic mají nejen vliv na koeficientu tření, opotřebení, ale i mechanismus mazání. Pro nanomaziva jsou vhodné sférické nanočástice, fulereny, nanodestičky, nanotrubičky a cibulové nanočástice. Např. sférické nanočástice dokážou přenášet vyšší zatížení, ale při zatížení vykazují vyšší deformaci. Cibulové nanočástice se začnou deformovat a porušovat, díky čemuž vznikne tribologický film [46]. Nanodestičky dokážou přenést nejvyšší zatížení, ale oproti ostatním nanočásticím výrazně zhoršují koeficient tření a zvětšují opotřebení [58].

Koncentrace nanočástic

Koncentrace není vlastnost nanočástic, spíše se jedná o vlastnost nanomaziva, avšak zásadně ovlivňuje výsledné vlastnosti. Správná koncentrace nanočástic závisí na několika faktorech, jako je velikost, tvar, materiál nanočástic a druh maziva, proto nelze s určitostí říct, jaký je obecný optimální procentuální hmotnostní objem nanočástic v mazivu. Například Wan a kolektiv [41] zjistili, že dosažení nejnižšího koeficientu tření pro olej SE 15W-40 je ideální procentuální hmotnostní podíl nanočástic z nitridu boritého kolem 0,1 % hmotnostního objemu.

Gupta a kolektiv [60] zkoumal, jaký je ideální hmotnostní objem nanočástic oxidu mědi v motorovém oleji, kdy ideální koncentrace, při které se zjistilo nejmenší tření a opotřebení byla 1 % hmotnostního objemu. Koncentrace nanočástic musí být tedy volena v závislosti na jejich materiálu, tvaru, velikosti, mazivu ale také, jaká vlastnost maziva je prioritní. Například tepelná vodivost maziva roste s koncentrací nanočástic, ale koeficient tření se snižuje jen do určité hodnoty a následně začne růst.

3 DISKUZE

S postupem ve vývoji v průmyslu se kladou na maziva stále větší nároky, které musejí splňovat, jakož snížení tření v místě styku dvou ploch, zlepšení tvorby a stálost ochranného filmu i za vyšších rychlostí součástí a dobrá cenová konkurenceschopnost. Výše bylo ukázáno, že přidáním malého množství nanočástic (řádově v desetinách procent až v jednotkách procent) jako aditiv do maziv se zásadně zlepšují jejich tribologické a ochranné vlastnosti, avšak je nutno zmínit, že nelze očekávat zlepšení pro jakoukoliv kombinaci maziva a nanočástic, neboť existuje vícero parametrů, které se musí vzít u nanomaziv v potaz, jako je velikost, tvar a materiál nanočástic, druh maziva a zachování disperzní stability nanočástic v mazivu. Stále však existuje několik výzev, které omezují použití nanomaziv.

Zachování dlouhodobé disperzní stability nanočástic v mazivu je jedna z překážek pro užití nanomaziv v průmyslovém měřítku, neboť k sedimentaci dochází pokud se nanomazivo nachází v zásobníku po delší dobu (řádově ve dnech). Proto je potřeba se do budoucna zabývat udržení disperzní stability nanočástic v mazivu, která by mohla být dosažena vhodným zvolením povrchově aktivní látky, metodou výroby nanomaziv, nebo úpravou nanočástic.

Další překážkou pro široké používání nanočástic je jejich produkce v průmyslovém měřítku, nebo v dostatečné kvalitě z hlediska tvaru a velikosti. Existuje již několik metod, které dokáží vyrábět velké množství nanočástic v dobré kvalitě, jako je detonační metoda pro výrobu nanodiamantů, avšak jako nanočástice mohou být použity různé materiály pro které doposud neexistuje průmyslová metoda výroby.

Výhodou použití nanočástic jako aditiv je velké množství materiálů, velikostí, tvarů a povrchových úprav, kdy různou kombinací výše zmíněných vlastností se může dosáhnout rozličných změn ve vlastnostech maziv, avšak dosavadní výzkum v této oblasti spočívá v experimentální metodě, aniž by existoval dostatečný teoretický základ. Zde by se měl výzkum zaměřit převážně na popis tvorby tribologického filmu a doby jeho životnosti. Tvorba tribologického filmu má několik výhod, nanomazivo by mohlo být periodicky užívané s dlouhou dobou odstupu, kdy po prvním použití by se vytvořil tribologický film, následně by nebyla potřeba přítomnost nanomaziv v systému a po nějaké době, kdy by se tribologický film opotřebil by se znovu použilo nanomazivo.

3.1 Nanomaziva v praktických aplikacích

Přestože ve výzkumu nanočástic a nanomaziv existuje stále dost neznámých nelze jejich technické využití přehlédnout, proto bych níže chtěl představit možné použití nanomaziv.

Jak již bylo zmíněno dlouhodobá disperzní stabilita je největším problémem pro použití nanomaziv, proto se mohou používat tam, kde se předpokládá neustálý pohyb maziva.

Další podmínkou je režim mazání, neboť doposud zjištěné mechanismy mazání z pohledu nanočástic potřebují aby byly nanočástice v kontaktu s oběma povrchy, proto mají nanomaziva využití pouze v systémech, kde se vyskytuje smíšené a mezní mazání.

Jako poslední je potřeba brát v úvahu cenu nanomaziva. S metodou dosavadní výroby nanočástic stále pro některé aplikace konkuruje cena nad získaným užitekem, proto prozatím nemá nanočástice smysl využívat pro aplikace, kde dochází k úniku maziva, které by bylo potřeba neustále doplňovat.

Návrh použití nanomaziv

- Válečkové řetězy s rychlostí do 3 m/s – jedná se o řetězy jejichž mazání je možné provést ručně například řetězy u jízdních kol, kdy po použití nanomaziv by mohlo dojít ke snížení tření a opotřebení .
- Krytovaná ložiska přenášející větší zátěž – neustálým pohybem ložiskových kuliček nedojde k aglomeraci nanočástic, díky použití nanomaziv se prodlouží životnost a sníží ztráty, dále díky nanočásticím dojde k mazání i při vyšší zátěži.
- Použití v systému s vysokým zatížením a malými rychlostmi – vysoké zatížení a malé rychlosti zapříčiňují nedostatečnou tvorbu mazacího filmu, v tomto případě by mohlo být řešením použití nanomaziv, kdy díky nanočásticím v mazivu se zajistí oddělení stykových ploch.
- V systému se změnou teploty – díky nanočásticím v mazivu se zvyšuje jeho viskozitní index, čímž se snižuje změna viskozity maziva v závislosti na teplotě. Tím se snižuje opotřebení a ztráty, které mohou nastat u startu stroje, kdy trvá určitá doba, než dojde k záběhu a dosažení provozní teploty.
- Použití v motorovém oleji – díky přidáním nanočástic do oleje se zlepší tepelná vodivost oleje, čímž se zlepšuje chlazení motoru a snižuje se množství potřebného oleje. Výhodou nanočástic je jejich malá velikost, díky čemuž nemohou být zachytávány filtry.
- Využití nanomaziv ve vesmíru – zatím neprobíhá výzkum, který by se zabýval jak by se nanomaziva chovaly v extrémních podmínkách, jako je vesmír. Díky chemické stálosti by se mohly nanočástice používat i jako aditiva do polyalfaolefinů (PAO), které se používají jako maziva ve vesmíru. Díky nízké gravitaci by nedocházelo k sedimentaci nanočástic, čímž by se nemusel řešit problém s disperzní stabilitou.

4 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce Nanomaziva v praktických aplikacích byla řešerše v oblasti nanomaziv včetně doporučení pro jejich praktické aplikace.

V první části současného stavu poznání bylo dílčím cílem definovat tvary, vlastnosti a velikosti nanočástic, které jsou vhodné pro tribologické účely. Tato část měla vnést základní vřled do problematiky nanočástic, což bylo podstatné vřhledem k dobrému pochopení jak nanočástice ovlivňují vlastnosti nanomaziv. V druhé části současného stavu poznání bylo dílčím cílem popsat nanomazivo s ohledem na výrobu, vlastnosti ovlivněné přidáním nanočástic, mechanismy mazání, které jsou způsobeny nanočásticemi, nežádoucí vnitřní procesy, jejich eliminace a vlastnosti nanočástic, které ovlivňují výsledné vlastnosti nanomaziv.

V diskuzi byly dále popsány možné vyhlídky a směry, kam by se mohl vývoj nanočástic, jako aditiv, do maziv ubírat. Výstupem této práce bylo navrhnutí použití nanomaziv, kde se, vřhledem k současné situaci výzkumu, můžou zlepřit tribologické vlastnosti systému, nebo by to mohlo vyřeřit problémy s nedostatečnou tvorbou mazacího filmu. Jednotlivé dílčí cíle i hlavní cíl, které byly stanoveny na začátku, byly splněny.

Závěrem bych chtěl říct, že výzkum nanočástic a nanomaziv má velký potenciál v mnoha oblastech vědy, medicíny a průmyslu. Přestože jejich užití má velký potenciál zatím se stále mnoho neví o negativních účincích na lidské zdraví a životní prostředí, kde i tento směr výzkumu je potřebný pro úplné porozumění této problematiky.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOLMBERG, Kenneth a Ali ERDEMIR. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology international*. Elsevier, 2019, **135**, 389-396. ISSN 0301-679X.
- [2] RAZ, Jelinek. Introduction. *Nanoparticles*. De Gruyter, 2015, s. 1-2. ISBN 9783110330021.
- [3] JEREMY, Ramsden. The Impact of Nanotechnology. *Nanotechnology – An Introduction*. Elsevier, 2011, s. 1-3. ISBN 9780080964478.
- [4] GERBER, Christoph. Heinrich Rohrer (1933-2013). *Nature*. London: Nature Publishing Group, 2013, **499**(7456), 30. ISSN 00280836.
- [5] Das, Sarit K. ; Choi, Stephen U. S. ; Yu, Wenhua ; Pradeep, T. ; Hoboken. *Introduction, Nanofluids: science and technology, Chapter 1, p.1-37*. 2007. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2007. ISBN 9780470074732.
- [6] SUN, Xiaofei, Yanyu ZHANG, Guangpeng CHEN a Zhiyong GAI. Application of Nanoparticles in Enhanced Oil Recovery: A Critical Review of Recent Progress. *Energies*. Basel: MDPI, 2017, **10**(3), 345.
- [7] LIU, Gen, Ligang ZHANG, Guitao LI, Fuyan ZHAO, Qinglun CHE, Chao WANG a Ga ZHANG. Tuning the tribofilm nanostructures of polymer-on-metal joint replacements for simultaneously enhancing anti-wear performance and corrosion resistance. *Acta biomaterialia*. Elsevier, 2019, **87**, 285-295 [cit. 2020-11-28]. ISSN 1742-7061.
- [8] MASUO, Hosokawa, Nogi KIYOSHI, Naito MAKIO a Yokoyama TOYOKAZU. Fabrication Technique of Organic Nanocrystals and Their Optical Properties and Materialization. *Nanoparticle Technology Handbook*. 2nd Edition. Elsevier, 2012, s. 1-1. ISBN 9780444563361.
- [9] TAHA-TIJERINA, Jose Jaime, Tharangattu Narayanan NARAYANAN, Chandra Sekhar TIWARY, Karen LOZANO, Mircea CHIPARA, Pulickel M AJAYAN a Jose Jaime TAHA-TIJERINA. Nanodiamond-based thermal fluids. *ACS applied materials & interfaces*. 2014, **6**(7), 4778-4785. ISSN 19448244.
- [10] LIU, Xiaoming, Fuping YUAN a Yueguang WEI. Grain size effect on the hardness of nanocrystal measured by the nanosize indenter. *Applied surface science*. Elsevier B.V, 2013, **279**, 159-166. ISSN 0169-4332.

- [11] Microwave-Induced Plasma-In-Liquid Process for Nanoparticle Production. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* . The Chemical Society of Japan, 2018, **91**(12), 1781-1798. ISSN 0009-2673.

- [12] _KHANNA, Prerna, Amrit KAUR a Dinesh GOYAL. Algae-based metallic nanoparticles: Synthesis, characterization and applications. *Journal of microbiological methods* . Elsevier B.V, 2019, **163** [cit. 2021-02-21]. ISSN 0167-7012. Dostupné z: doi:10.1016/j.mimet.2019.105656

- [13] CAN, Musa Mutlu, Sadan OZCAN, Abdullah CEYLAN a Tezer FIRAT. Effect of milling time on the synthesis of magnetite nanoparticles by wet milling. *Materials science & engineering. B, Solid-state materials for advanced technology* . Elsevier B.V, 2010, **172**(1), 72-75. ISSN 0921-5107.

- [14] GONDAL, M.A, Q.A DRMOSH, Z.H YAMANI a T.A SALEH. Synthesis of ZnO 2 nanoparticles by laser ablation in liquid and their annealing transformation into ZnO nanoparticles. *Applied surface science* . Elsevier B.V, 2009, **256**(1), 298-304. ISSN 0169-4332.

- [15] VALERII YU DOLMATOV. Detonation-synthesis nanodiamonds: synthesis, structure, properties and applications. *Russian Chemical Reviews* . 2007, **76**(4), 339-360. ISSN 0036-021X.

- [16] KURLAND, Heinz-dieter, Janet GRABOW, Gisbert STAUPENDAHL, Wilfried ANDRA, Silvio DUTZ, Matthias BELLEMANN a Heinz-dieter KURLAND. Magnetic iron oxide nanopowders produced by CO2 laser evaporation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* . 2007, **311**(1), 73-77. ISSN 0304-8853.

- [17] KHAN, Ibrahim, Khalid SAEED a Idrees KHAN. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry* . Elsevier B.V, 2019, **12**(7), 908-931. ISSN 1878-5352.

- [18] SAEED, Khalid a Ibrahim KHAN. Preparation and characterization of single-walled carbon nanotube/nylon 6, 6 nanocomposites. *Instrumentation science & technology* . Taylor & Francis, 2016, **44**(4), 435-444. ISSN 1073-9149.

- [19] SAEED, Khalid a Soo-young PARK. Preparation of multiwalled carbon nanotube/nylon-6 nanocomposites by in situ polymerization. *Journal of Applied Polymer Science* . Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 2007, **106**(6), 3729-3735. ISSN 0021-8995.

- [20] REHMAN, Aisha, Shadi HOUSHYAR a Xin WANG. Nanodiamond in composite: Biomedical application. *Journal of Biomedical Materials Research Part A* . Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2020, **108**(4), 906-922. ISSN 1549-3296.
- [21] SOLANO, Ricardo, David PATIÑO-RUIZ, Lesly TEJEDA-BENITEZ, Adriana HERRERA a Ricardo SOLANO. Metal – and metal/oxide-based engineered nanoparticles and nanostructures: a review on the applications, nanotoxicological effects, and risk control strategies. *Environmental science and pollution research international* . 2021. ISSN 09441344.
- [22] LI, Jia, Lanlan LIU, Di ZHANG, Dian YANG, Jinbao GUO a Jie WEI. Fabrication of polyaniline/silver nanoparticles/multi-walled carbon nanotubes composites for flexible microelectronic circuits. *Synthetic metals* . Elsevier B.V, 2014, **192**, 15-22. ISSN 0379-6779.
- [23] BOONKAEW, Benjawan, Pimpa SUWANPREUKSA, Leila CUTTLE, Philip Martin BARBER a Pitt SUPAPHOL. Hydrogels containing silver nanoparticles for burn wounds show antimicrobial activity without cytotoxicity. *Journal of Applied Polymer Science* . 2014, **131**(9), n/a-n/a. ISSN 0021-8995.
- [24] GURAV, Prasad, S. Srinu NAIK, Komel ANSARI, S SRINATH, K. Anand KISHORE, Y. Pydi SETTY a Shirish SONAWANE. Stable colloidal copper nanoparticles for a nanofluid: Production and application. *Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects* . Elsevier B.V, 2014, **441**, 589-597. ISSN 0927-7757.
- [25] MARINARO, M, F NOBILI, R TOSSICI a R MARASSI. Microwave-assisted synthesis of carbon (Super-P) supported copper nanoparticles as conductive agent for Li₄Ti₅O₁₂ anodes for Lithium-ion batteries. *Electrochimica acta* . Elsevier, 2013, **89**, 555-560. ISSN 0013-4686.
- [26] KUDR, Jiří, Yazan Abdulmajeed Eyadh HADDAD, Lukáš RICHTER, Zbyněk HEGER, Mirko ČERNÁK, Vojtěch ADAM a Ondřej ZÍTKA. Magnetic nanoparticles: From Design and Synthesis to Real World Applications. *Nanomaterials* . MDPI, 2017, **7**(9), 1-28. ISSN 2079-4991.
- [27] NAM, Yoon-ho, Han-don UM, Kwang-tae PARK, et al. Multi-layer coating of SiO₂ nanoparticles to enhance light absorption by Si solar cells. *Journal of the Korean Physical Society* . Seoul: The Korean Physical Society, 2012, **60**(11), 1944-1948. ISSN 0374-4884.
- [28] YAO, Y, Jj ZHANG, Lg XUE, T HUANG a As YU. Carbon-coated SiO₂ nanoparticles as anode material for lithium ion batteries. *Journal Of Power Sources* . ELSEVIER SCIENCE BV, 2011, **196**(23), 10240-10243. ISSN 0378-7753.

- [29] HU, Zhuang, Yuancheng TENG, Qing WANG a Lang WU. Dielectric properties of $\text{CaCu}_{2.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics by addition of Al_2O_3 nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* . New York: Springer US, 2018, **29**(11), 9245-9250. ISSN 0957-4522.

- [30] NITHIYANANTHAM, Udayashankar, Luis GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, Yaroslav GROSU, Abdelali ZAKI, Josu M IGARTUA a Abdessamad FAIK. Shape effect of Al_2O_3 nanoparticles on the thermophysical properties and viscosity of molten salt nanofluids for TES application at CSP plants. *Applied thermal engineering* . Elsevier, 2020, **169**. ISSN 1359-4311.

- [31] LUO, Ting, Xiaowei WEI, Xiong HUANG, Ling HUANG a Fan YANG. Tribological properties of Al_2O_3 nanoparticles as lubricating oil additives. *Ceramics international* . Elsevier, 2014, **40**(5), 7143-7149. ISSN 0272-8842.

- [32] TAHMASEBI SULGANI, Mohsen a Arash KARIMIPOUR. Improve the thermal conductivity of 10w40-engine oil at various temperature by addition of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles. *Journal of molecular liquids* . Elsevier B.V, 2019, **283**, 660-666. ISSN 0167-7322.

- [33] GUSAIN, Rashi a Om P. KHATRI. Ultrasound assisted shape regulation of CuO nanorods in ionic liquids and their use as energy efficient lubricant additives. *Journal of Materials Chemistry A* . 2013, **1**(18), 5612-5619. ISSN 2050-7488.

- [34] RAPOPORT, L., A. MOSHKOVICH, V. PERFILYEV, A. LAIKHTMAN, I. LAPSKER, L. YADGAROV, R. ROSENSTVEIG a R. TENNE. High Lubricity of Re-Doped Fullerene-Like MoS₂ Nanoparticles. *Tribology Letters* . Boston: Springer US, 2012, **45**(2), 257-264. ISSN 1023-8883.

- [35] JAIN, Nirmesh, Yanjun WANG, Stephen K JONES, Brian S HAWKETT, Gregory G WARR a Nirmesh JAIN. Optimized steric stabilization of aqueous ferrofluids and magnetic nanoparticles. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids* . 2010, **26**(6), 4465-4472. ISSN 07437463.

- [36] BEKETOV, I. V., A. P. SAFRONOV, A. I. MEDVEDEV, J. ALONSO, G. V. KURLYANDSKAYA a S. M. BHAGAT. Iron oxide nanoparticles fabricated by electric explosion of wire: focus on magnetic nanofluids. *AIP Advances* . American Institute of Physics, 2012, **2**(2).

- [37] GULZAR, M., H. MASJUKI, M. KALAM, M. VARMAN, N. ZULKIFLI, R. MUFTI a Rehan ZAHID. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research* . Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, **18**(8), 1-25. ISSN 1388-0764.
- [38] LEE, Gyoung-ja, Chang Kyu KIM, Min Ku LEE, Chang Kyu RHEE, Seokwon KIM a Chongyup KIM. Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method. *Thermochimica acta* . Elsevier B.V, 2012, **542**, 24-27. ISSN 0040-6031.
- [39] LI, Yanjiao, Jing'en ZHOU, Simon TUNG, Eric SCHNEIDER a Shengqi XI. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder technology* . Elsevier B.V, 2009, **196**(2), 89-101. ISSN 0032-5910.
- [40] GOHARSHADI, Elaheh K, Yulong DING, Majid Namayandeh JORABCHI, Paul NANCARROW a Elaheh K GOHARSHADI. Ultrasound-assisted green synthesis of nanocrystalline ZnO in the ionic liquid [hmim][NTf₂]. *Ultrasonics sonochemistry* . 2009, **16**(1), 120-123. ISSN 1350-4177.
- [41] QIANG, He, Li ANLING, Zhang YANGMING, Songfeng LIU a Guo YACHEN. Experimental study of tribological properties of lithium-based grease with Cu nanoparticle additive. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces* . Taylor & Francis, 2017, **11**(2), 75-82. ISSN 1751-5831.
- [42] LI, Wei, Shaohua ZHENG, Bingqiang CAO a Shiyu MA. Friction and wear properties of ZrO₂/SiO₂ composite nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research* . Dordrecht: Springer Nature B.V, 2011, **13**(5), 2129-2137. ISSN 13880764.
- [43] C, Pownraj a Valan Arasu A. Preparation and characterization of low cost eco-friendly GAO grafted bio-carbon nanoparticle additive for enhancing the lubricant performance. *Diamond and related materials* . Elsevier B.V, 2020, **108**.
- [44] BHAUMIK, S. a S.D. PATHAK. Analysis of Anti-Wear Properties of CuO Nanoparticles as Friction Modifiers in Mineral Oil (460cSt Viscosity) Using Pin-On-Disk Tribometer. *Tribology in industry* . University of Kragujevac, 2015, **37**(2), 196-203. ISSN 0354-8996.
- [45] HEMMAT ESFE, Mohammad, Ali Akbar ABBASIAN ARANI a Saeed ESFANDEH. Improving engine oil lubrication in light-duty vehicles by using of dispersing MWCNT and ZnO nanoparticles in 5W50 as viscosity index improvers (VII). *Applied thermal engineering* . Elsevier, 2018, **143**, 493-506. ISSN 1359-4311.

- [46] KHALID SHAFI, Wani a M.S CHAROO. “NanoLubrication Systems: An Overview”. *Materials today: proceedings* . Elsevier, 2018, 5(9), 20621-20630. ISSN 2214-7853.

- [47] LEE, Kwangho, Yujin HWANG, Seongir CHEONG, Youngmin CHOI, Laeun KWON, Jaekeun LEE a Soo KIM. Understanding the Role of Nanoparticles in Nano-oil Lubrication. *Tribology Letters* . Boston: Springer US, 2009, **35**(2), 127-131. ISSN 1023-8883.

- [48] AZMAN, Nurul a Syahrullail SAMION. Dispersion Stability and Lubrication Mechanism of Nanolubricants: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* . Seoul: Korean Society for Precision Engineering, 2019041, **6**(2), 393-414. ISSN 2288-6206.

- [49] RAPOPORT, L, V LESHCHINSKY, I LAPSKER, et al. Tribological properties of WS₂ nanoparticles under mixed lubrication. *Wear* . ELSEVIER SCIENCE, 2003, **255**(7), 785-793. ISSN 0043-1648.

- [50] TAO, Xu. The ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive. *Journal of Physics D: Applied Physics* . 1996, **29**(11), 2932-2937. ISSN 0022-3727.

- [51] LIU, G., X. LI, B. QIN, D. XING, Y. GUO a R. FAN. Investigation of the Mending Effect and Mechanism of Copper Nano-Particles on a Tribologically Stressed Surface. *Tribology Letters* . New York: Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2004, **17**(4), 961-966. ISSN 1023-8883.

- [52] CHOI, Y, C LEE, Y HWANG, M PARK, J LEE, C CHOI a M JUNG. Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. *Current applied physics* . Elsevier B.V, 2009, **9**(2), e124-e127. ISSN 1567-1739.

- [53] LEE, Kwangho, Yujin HWANG, Seongir CHEONG, Laeun KWON, Sungchoon KIM a Jaekeun LEE. Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil. *Current applied physics* . Elsevier B.V, 2009, **9**(2), e128-e131. ISSN 1567-1739.

- [54] GULZAR, M., H. MASJUKI, M. KALAM, M. VARMAN, N. ZULKIFLI, R. MUFTI a Rehan ZAHID. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research* . Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, **18**(8), 1-25. ISSN 1388-0764.

- [55] YU, W a Hq XIE. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. *Journal Of Nanomaterials* . HINDAWI, 2012, **2012**(2012). ISSN 1687-4110.

- [56] LÓPEZ-LÓPEZ, Modesto, Pavel KUZHIR, Georges BOSSIS a Pavel MINGALYOV. Preparation of well-dispersed magnetorheological fluids and effect of dispersion on their magnetorheological properties. *Rheologica Acta* . Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, **47**(7), 787-796. ISSN 0035-4511.

- [57] CHEN, Lifei, Huaqing XIE, Yang LI a Wei YU. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. *Thermochimica acta* . Elsevier B.V, 2008, **477**(1), 21-24. ISSN 0040-6031.

- [58] XU, Ze, Kun HU, Cheng HAN, Xian HU a Yu XU. Morphological Influence of Molybdenum Disulfide on the Tribological Properties of Rapeseed Oil. *Tribology Letters* . Boston: Springer US, 2013, **49**(3), 513-524. ISSN 1023-8883.

- [59] WAN, Qingming, Yi JIN, Pengcheng SUN a Yulong DING. Tribological Behaviour of a Lubricant Oil Containing Boron Nitride Nanoparticles. *Procedia engineering* . Elsevier, 2015, **102**, 1038-1045. ISSN 1877-7058.

- [60] GUPTA, Harsh, Santosh Kumar RAI, Nippani SATYA KRISHNA a Gagan ANAND. The effect of copper oxide nanoparticle additives on the rheological and tribological properties of engine oil. *Journal of dispersion science and technology* . Taylor & Francis, 2021, **42**(4), 622-632 [cit. 2021-04-20]. ISSN 0193-2691.

- [61] WANG, Xingyu, Fujian TANG, Xiaoning QI, Zhibin LIN, Dante BATTOCCHI a Xi CHEN. Enhanced Protective Coatings Based on Nanoparticle fullerene C60 for Oil & Gas Pipeline Corrosion Mitigation. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)* . MDPI, 2019, **9**(10), 1476.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

6.1 Seznam zkratek a symbolů

DLC	nestabilní stav amorfního uhlíku
STM	rastrovací tunelový mikroskop
ot.	otáčky
SEM	rastrovací elektronový mikroskop

6.2 Seznam veličin

R_{el}	mez kluzu
σ_i	napětí působící proti pohybu dislokací
k	konstanta zahrnující vliv hranic zrn
d	velikost zrna
v_z	rychlost sedimentace
ρ_{NP}	hustota nanočástic
ρ_F	hustota maziva
g	tíhové zrychlení
r	poloměr nanočástic
μ	dynamická viskozita

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Seznam obrázků

Obr. 1 Schématické zobrazení mechanismu klínu [6]	15
Obr. 2 Změna povrchu při dělení kostky o hustotě 1 g/cm ³ [8]	17
Obr. 3 Znázornění metody svrchu dolů a zdola nahoru [12]	20
Obr. 4 nanočástice magnetitu [13]	21
Obr. 5 Aparatura pro odpařovací metodu [16]	22
Obr. 6 Nanočástice Al ₂ O ₃ vlevo bez modifikace, vpravo s modifikací [31]	25
Obr. 7 CuO nanotyče [33]	25
Obr. 8 Fulleren [61]	25
Obr. 9 Cibulové nanočástice [34]	26
Obr. 10 vlevo CuO nanočástice [44], Al ₂ O ₃ nanočástice [32]	26
Obr. 11 Snímky z čtyřkuličkového testu A) opotřebení po použití základního maziva, B) zvětšená oblast A, C) opotřebení po použití maziva s 0,25 % měděných nanočástic, D) zvětšená oblast C [41]	31
Obr. 12 Znázornění mechanismů mazání a.) valivý mechanismus, b.) tvorba tribologického filmu, c.) samoopravný mechanismus, d.) leštící efekt [47]	32

Seznam grafů

Graf 1 Závislost meze kluzu na velikosti zrna pro med' [10]	18
Graf 2 Závislost tvrdosti na velikosti zrna pro nikl [10]	19
Graf 3 Závislost koeficientu tření na množství měděných nanočástic [41]	29
Graf 4 Závislost koeficientu tření na množství Al ₂ O ₃ nanočástic [31]	30