



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

POUŽITÍ DETONOVANÝCH
NANODIAMANTŮ V OBLASTI TRIBOLOGIE
USING OF DETONATION NANODIAMOND IN TRIBOLOGY RESEARCH FIELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Milan Mauer

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Milan Mauer**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Použití detonovaných nanodiamantů v oblasti tribologie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti vlivu detonovaných nanodiamantů na tření, opotřebení a mazání.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Analýza problému a cíl práce
3. Přehled současného stavu poznání
4. Diskuze
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní

Účel práce: výzkum a vývoj

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

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Dolmatov, V. Yu. (2010): Detonation nanodiamonds in oils and lubricants. Journal of Superhard Materials. vol. 32, no. 1, pp. 14-20, DOI: 10.3103/S1063457610010028.

Shenderova, O., Vargas, A., Turner, S.; Ivanov, D. M. a IVANOV, M. G. (2014): Nanodiamond-Based Nanolubricants: Investigation of Friction Surfaces. Tribology Transactions. vol. 57 no. 6, pp. 1051-1057; DOI: 10.1080/10402004.2014.933933.

Ali, M., Kamal, A. a Hou, X. (2015) Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils. Nanotechnology Reviews. vol. 4 no. 4, DOI: 10.1515/ntrev-2015-0031

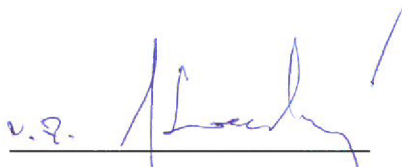
Redkin, V. E. (2004): Lubricants with Ultradisperse Diamond–Graphite Powder. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. vol. 40, no. 3, pp. 164-170. DOI: 10.1023/B:CAFO.0000031898.30405.2a.

Shen, M., LUO, J. a WEN, S. (2001): The Tribological Properties of Oils Added with Diamond Nano-Particles. Tribology Transactions. vol. 44, no. 3, pp. 494-498. DOI: 10.1080/10402000108982487.

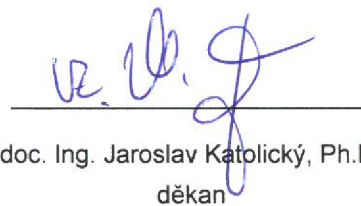
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 23. 11. 2015

L. S.



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



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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl podat základní přehled vlivu detonovaných nanodiamantů, použitých jako přísada v mazacích prostředcích, na tření, opotřebení a mazání. Shrnuje základní vlastnosti, způsoby výroby a chování těchto částic při použití v různých mediích. Část práce je zaměřena na detailnější popis zjištěných výsledků provedených experimentů. Poslední kapitola je pak věnována přehledu základních typů nanočástic používaných ke stejnému účelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

nanodiamant, detonovaný nanodiamant, olej, mazání, tření, opotřebení

ANOTATION

The main objective of this bachelor thesis is to give a general knowledge about nanodiamonds, which are chipped off during the explosions diamonds. These particles are used as additions in lubricating preparations to decrease the friction. Bachelor thesis summarizes the basic characteristics, methods of manufacture and application nanodiamonds in practice. Part of this thesis is dedicated to theoretical and detailed descriptions of procedures and experimental results in nanodiamonds field of study. Another part describes different types of nanoparticles, used for the same purpose as nanodiamonds. The final part sums up the advantages of nanoparticles and its purpose for experimental or practical usage.

KEYWORDS

nanodiamond, detonation nanodiamond, oil, lubrication, friction, wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAUER, M. *Použití detonovaných nanodiamantů v oblasti tribologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, *Použití detonovaných nanodiamantů v oblasti tribologie*, vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. a za pomoci uvedené literatury.

V Brně dne 19. května 2016

.....
Milan Mauer

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Nanodiamant	14
2.1.1 Vlastnosti nanodiamantů	14
2.1.2 Využití nanodiamantů v praxi	15
2.1.3 Výroba nanodiamantů	16
2.2 Vliv nanodiamantů na vlastnosti maziv	18
2.2.1 Mechanismy způsobené vlivem nanočástic	18
2.2.2 Diamantové grafitové prášky	19
2.2.3 Nanodiamanty	19
2.3 Použití aditiv ke zlepšení vlastností řezných kapalin a spojovacích past	20
2.4 Chování DND při jejich aplikacích	20
2.4.1 Zeta potenciál	21
2.4.2 Disperze ve vodném prostředí	22
2.4.3 Disperze v nevodném prostředí	23
2.4.4 Stabilizátory	23
2.5 Vlastnosti uhlíkových ocelí a hliníkových slitin při použití DND	24
2.6 Přidání DND do olejů na bázi polyalfaolefinů	27
2.7 Vliv DND na vlastnosti motorových olejů	30
2.8 Vlastnosti kapalného parafinu po přidání DND	31
2.9 PTFE fólie s nanodiamanty	33
2.10 Jiné druhy nanočástic zlepšující vlastnosti olejů	33
3 DISKUZE	36
4 ZÁVĚR	38
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	42
6.1 Seznam použitých zkratk a symbolů	42
7 SEZNAM OBRÁZKŮ	43
8 SEZNAM TABULEK	44

ÚVOD

Tření je jedním z nejstarších problémů v mechanice, ke kterému dochází vždy při pohybu těles v blízkém kontaktu. Už na počátku naší civilizace si lidé uvědomili, že pro posuv břemen po hrubším povrchu je nutné vynaložit mnohem větší úsilí. U každého mechanického zařízení dochází ke vzájemnému pohybu částí, který má za následek vznik tření a následných mechanických ztrát. Přítomnost tření se zejména projevuje opotřebením jednotlivých součástí stroje, což vede k výraznému snížení jejich životnosti a následně častější výměně. U spalovacích motorů se mechanické ztráty projevují snížením výkonu motoru, zvýšením spotřeby paliva a množství výfukových plynů. U většiny motorů dosahují ztráty vlivem tření přibližně 17 - 19 % z celkového výkonu, což je poměrně vysoká hodnota. Jelikož jsou v dnešní době na provoz automobilů kladeny čím dál větší nároky, z hlediska spotřeby pohonných hmot a ochrany životního prostředí, je tedy nutné mechanické ztráty co nejvíce minimalizovat. Existuje několik způsobů, jak tento problém řešit.

Jedna z možností, jak snížit třecí ztráty, spočívá v cílené modifikaci povrchu součástí. K tomuto účelu jsou používány tzv. DLC (metastabilní stav amorfního uhlíku obsahující významný podíl sp^3 vazeb) povlaky, jejichž aplikací se docílí zvýšení tvrdosti povrchu, chemické netečnosti a výborných tribologických vlastností. Mají široké uplatnění nejen v automobilovém průmyslu, ale i v medicíně, kde jsou použity k pokrytí kloubních náhrad.

Mechanické ztráty lze ovlivnit také vhodnou konstrukcí. Úkolem konstruktéra je navrhovat mechanické zařízení tak, aby docházelo k minimálnímu kontaktu jednotlivých dílů. K tomuto účelu jsou pro otáčivý a posuvný pohyb využívány různé druhy ložisek, které snižují ztráty vlivem tření na minimální hodnoty.

Nejrozšířenějším způsobem snižování tření je používání různých druhů olejů a maziv. Jelikož rychlost provozu strojů je neustále zvyšována, tak ani čisté mazací látky nejsou dostačující a je tedy nutné formou přísad jejich vlastnosti zlepšovat. Pro tento účel jsou v dnešní době vyvíjeny různé druhy nanočástic, u kterých byly pomocí experimentů zjištěny velice pozitivní výsledky. Jedním takovým typem částic jsou detonované nanodiamanty, kterými se tato práce zabývá.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

1

Základní způsob zlepšování vlastností maziv spočívá v příměsi vhodných přísad (aditiv, plniv). Aditiva jsou do olejů přidávána v poměrně malém množství (zlomky procent až několik procent) a ve většině případů jsou organického původu. Do maziv může být postupně přidáno 7-12 přísad různých typů [7]. Aditiva rozpustná v tekutých a plastických mazivech nejsou často dostačující k vytvoření a zachování silné mezní vrstvy oddělující dva povrchy. Dochází k tomu zejména v těžkých provozech, kde jsou používány nejvýkonnější stroje a dosahuje se tak velmi vysokých rychlostí. Někdy také může dojít ke vzniku chemické reakce se složkami maziva a povrchové vrstvy součástí, vlivem nekompatibility některých přísad s ostatními, a to zejména při vysokých teplotách [8]. V jiných případech mohou být použity nevhodné přísady, které způsobí vznik chemických sloučenin, které naopak urychlují opotřebení a korozi na třecích plochách.

Vysoce disperzní pevná plniva [7] jsou poměrně univerzálním, vysoce efektivním a ekonomickým způsobem zlepšení tribologických vlastností maziv. Tyto přísady jsou široce používány a jejich negativní vliv na fyzikálně-chemické vlastnosti olejů je minimální, oproti jiným přísadám. Jejich vlastnosti jsou zachovány i při velmi vysokých nebo nízkých teplotách. Existují různé druhy běžně používaných olejových kompozic, které pro zlepšení mazacích vlastností obsahují pevné látky, jako jsou prášky kovů, grafit, molybdenové sloučeniny a klasické diamanty. Kovy používané k tomuto účelu jsou např.: měď, cín, olovo, bronz a stříbro. Někdy mohou být použity také prášky molybdenu, grafitu a wolframové disulfidy. Pomocí testů bylo zjištěno, že nejlepší antifrikční vlastnosti má měď, stříbro a molybdenové disulfidové prášky. Avšak aplikace těchto přísad je omezena [8] z důvodu reologických (mechanické vlastnosti, vztahy mezi napjatostí a deformací) a antikoročních vlastností a z důvodu sedimentační stability. Jejich používání se v poslední době výrazně omezuje a to nejen z předešlých důvodů, ale také s ohledem na životní prostředí.

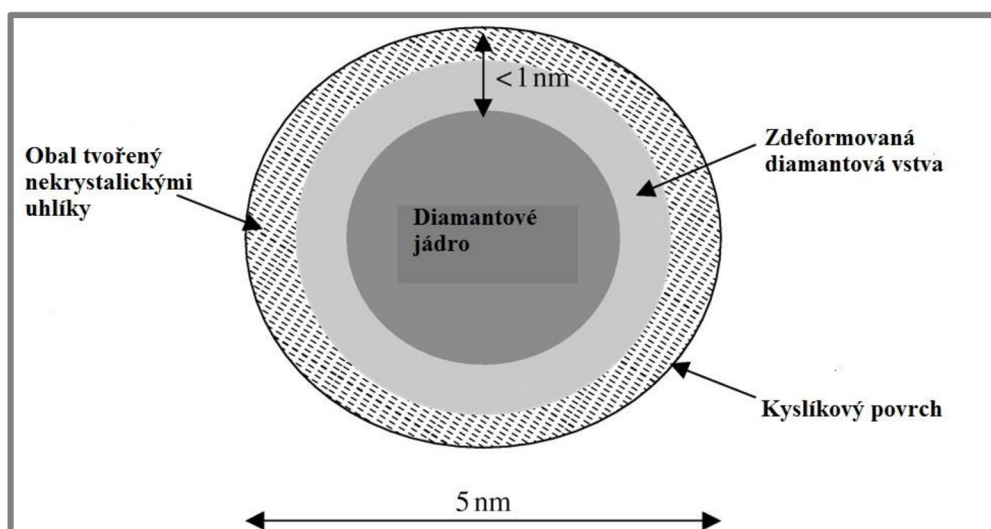
Proto se v současné době pozornost v oblasti vývoje nových aditiv pro mazací prostředky soustřeďuje na vývoj vysoce výkonných a ekologicky šetrných sloučenin. Novou a perspektivní oblastí se v poslední době ukazuje být využití anorganických nanočástic [9]. I když výzkum věnující se tomuto druhu částic zažívá velký rozmach především v posledních letech, tak v oblasti maziv se jejich využití aplikuje více než 50 let. Z hlediska tribologie je výzkum nanočástic zaměřen především na testování jejich odolnosti proti otěru a vysokým tlakům.

Cílem této práce je zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti aplikace nanočástic získaných detonační technikou. Tyto částice jsou označovány jako detonované nanodimanty (DND).

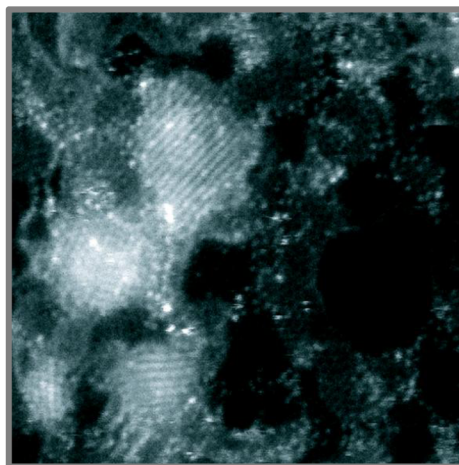
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Nanodiamant

Nanodiamanty jsou diamanty, které dosahují rozměrů v rozmezí 4-6 nm [1]. Řadíme je do skupiny uhlíkových nanomateriálů, do které rovněž zahrnujeme grafen, uhlíkové nanotrubky, uhlíková nanovlákná a diamantové tenké vrstvy [2]. Jejich struktura je tvořena krystalickou strukturou diamantu složená z sp^3 uhlíkových atomů (Obr. 1). V přírodě se nanodiamanty vyskytují například v meteoritech (Obr. 2).



Obr. 1 Struktura nanodiamantu [18]



Obr. 2 Nanodiamanty nalezené ve vzorku meteoritu [1]

2.1.1 Vlastnosti nanodiamantů

Protože je struktura nanodiamantů tvořena krystalickou strukturou diamantu, patří mezi jejich základní vlastnosti vysoká tvrdost, odolnost proti korozi, elektrochemická inertnost, nízký koeficient tření, mechanická stabilita a netoxičnost [2]. Mezi jejich

nejvýznamnější chemické vlastnosti patří: biokompatibilita, stabilita a široká modifikace povrchu k navázání organických molekul. Proto jsou na svůj povrch schopné navázat různé organické molekuly a léčiva [6]. Díky své malé velikosti mohou vnikat do buněk a pronikat z dýchacího ústrojí do nervů. Lidský organismus na ně reaguje bez jakýchkoliv negativních účinků. Další jejich výhodou je reaktivní povrch, který může být přizpůsoben k různým aplikacím. V neaglomerované formě jsou také schopny odolávat vysokým teplotám. Vzhledem k výše popsaným vlastnostem jsou nanodiamanty využívány v mnoha odvětvích.

2.1.2 Využití nanodiamantů v praxi

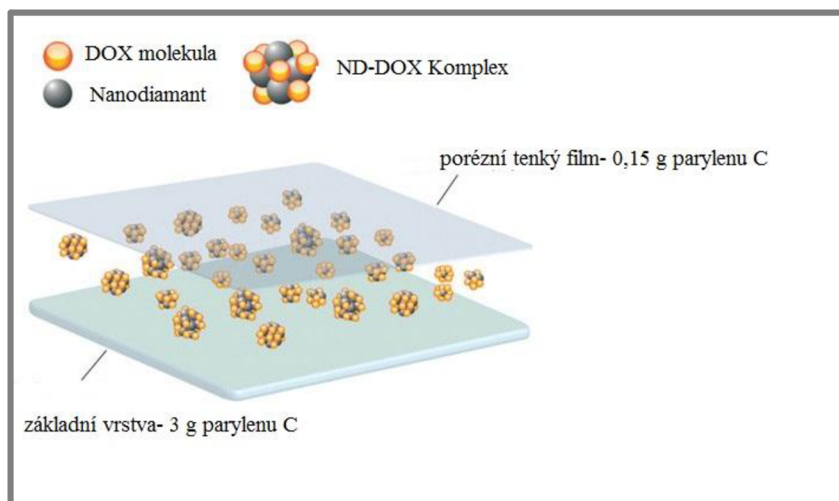
2.1.2

V současné době je výroba syntetických diamantů velice rozšířená. Vzhledem k jejich vysoké tvrdosti jsou nejvíce používány v oblasti obrábění, broušení, vrtání a leštění. Kvůli jejich vysoké tepelné a elektrické vodivosti jsou velice využívány v elektrotechnice, kde jsme schopni pomocí oxidace hrotu AFM mikroskopu vytvořit tranzistory nebo jiné umělé nanostruktury [1]. Dosáhne se toho vlivem zakončení diamantového povrchu vodíkem nebo kyslíkem, díky kterému lze změnit jeho povrchovou vodivost více jak milionkrát.

Další důležitou oblastí použití je jaderná energetika. Jelikož jsou nanodiamanty dobrými vodiči tepla a nijak nereagují s okolím palivového článku, je možné je využít k pokrytí palivových tyčí [1].

V rozsáhlé míře jsou nanodiamanty rovněž využívány i v oblasti lékařství, kde se pomocí nich dosahuje výrazného zlepšení mnoha léčebných metod. V dnešní době mnoho lidí trpí zeleným zákalem a jeho léčení se zdokonaluje pomocí nanodiamantů [2]. Ve vývoji jsou kontaktní čočky s nanodiamanty, které svou přítomností umožňují postupné uvolňování léků proti tomuto onemocnění. Nanodiamanty jsou také schopny na svůj povrch vázat látky a být tak jejich nosiči (Obr. 3). Této vlastnosti se snaží vědci využít v oblasti léčby rakoviny [6]. Při zjištění rakoviny se zvolí vhodný způsob léčby, nejčastěji se používá chemoterapie, při níž se do těla pošle chemické látky, jejichž úkolem je zničit množící se nádorové buňky. Tyto látky však nejsou schopny se do těla uvolňovat postupně, a proto může být vše řešeno pomocí nanodiamantů, které jsou na sebe schopny navázat velké množství léků a postupně je do těla uvolňovat.

Další oblastí, ve které se nanodiamanty používají, a o kterých bude tato práce pojednávat, jsou maziva. Suspenzací nanodiamantů jako přísady do maziv můžeme docílit výrazného zlepšení tribologických vlastností.



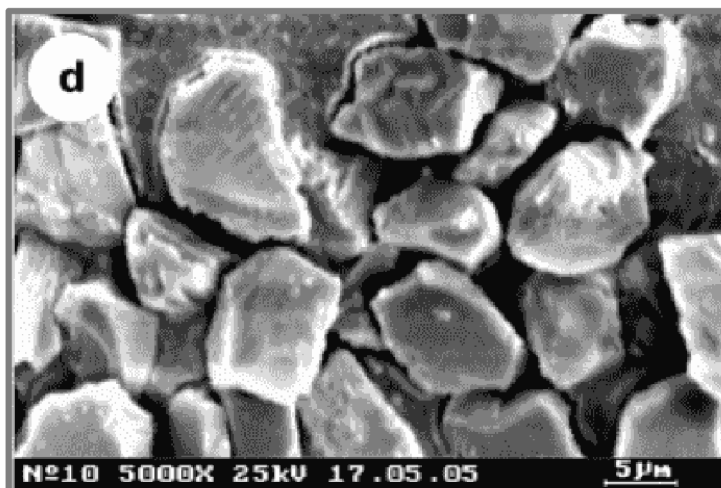
Obr. 3 Schéma vrstev nanodiamantů s léky [6]

2.1.3 Výroba nanodiamantů

To, že nanodiamanty se v přírodě vyskytují pouze v meteoritech, nám v průmyslu není mnoho platné. Z tohoto důvodu se je snažíme průmyslově vyrábět. Syntetické diamanty jsou z hlediska vlastností naprosto stejné jako přírodní. Co se týče tvaru, jsou uměle vyrobené diamanty naprosto dokonalé a jejich cena je mnohem nižší. První pokusy k jejich výrobě proběhly už na počátku 20. století [5], ale trvalo dlouho, než se objevily pozitivní výsledky. Základní myšlenka vytvoření technologie pro výrobu nanodiamantů vznikla ve vojenském průmyslu [4], kde se prováděly testy s výbušninami. V dnešní době existuje několik způsobů pro výrobu různých druhů nanodiamantů.

Nanodiamanty syntetizované pomocí ultrazvuku

V kapalinách je možné aplikováním vysoce intenzivního ultrazvuku docílit vzniku velice extrémních jevů [1]. Zvukové vlny, šířící se v kapalině, způsobí lokální velmi prudké zvýšení a snížení tlaku, které je závislé na frekvenci. Během procesu vznikají malé vakuové bubliny nebo dutiny tzv. kavity. Po dosažení určité velikosti nejsou tyto bubliny schopny přijímat energii a následně při fázi zvýšeného tlaku kolabují. Důsledkem toho vznikají rázy, které se mohou šířit rychlostí až $280 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$. Tento jev je označován jako ultrazvuková kavitace. V roce 2008 [3] bylo zjištěno, že lze tímto postupem vyrábět nanodiamanty ze suspenze grafitu v organické kapalině za atmosférického tlaku a teploty. Pro experimenty byla použita kapalina s vysokým bodem varu a intenzita zvuku přibližně $80 \text{ W} \times \text{cm}^{-2}$. Během testu byl vytvořen tlak okolo 15 barů. Nanodiamanty vzniklé tímto postupem byly velice ostré, opticky čisté a dosahovaly rozměrů 6-9 nm (Obr. 4). Z hlediska nákladů je tato metoda konkurenceschopná v porovnání s jinými. Vzhledem k dosaženým výsledkům bylo zjištěno, že lze pomocí ultrazvuku provést syntézu i jiných látek, jako je například kubický nitrid boru, nitrid uhlíku atd.

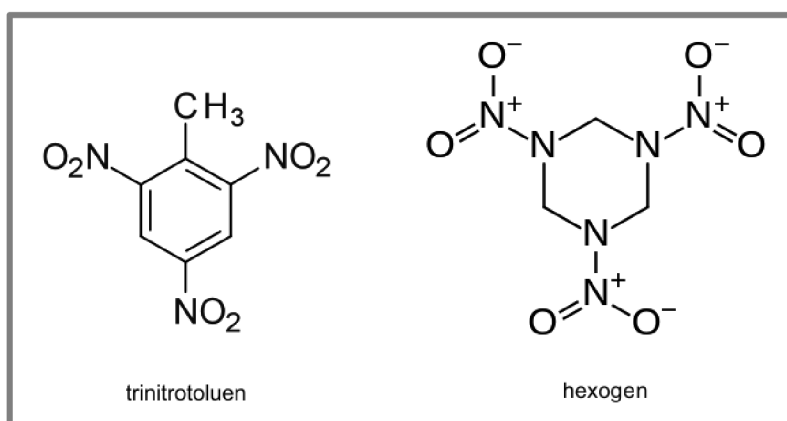


Obr. 4 Nanodiamanty syntetizované ultrazvukovou kavitací [3]

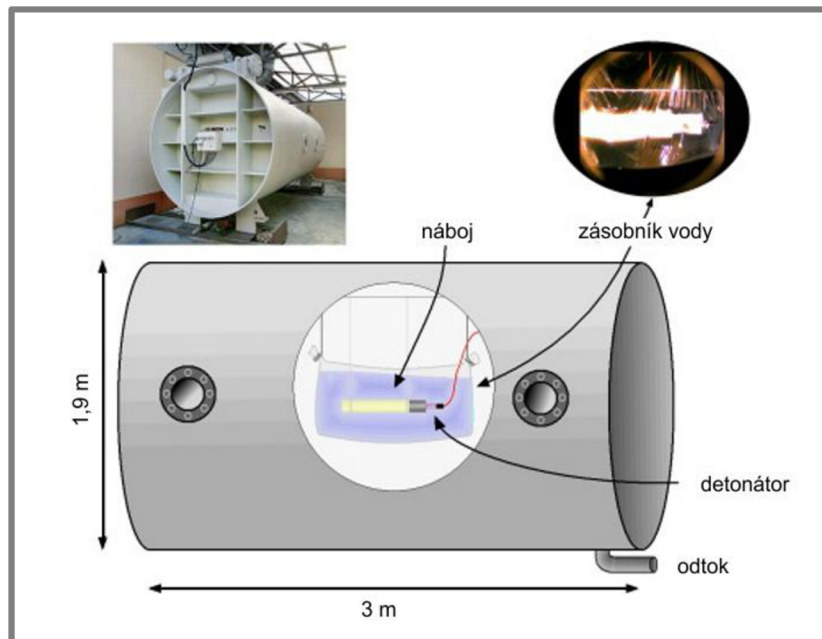
Nanodiamanty získané detonační technikou

DND jsou nanodiamanty, které vznikají při explozi trinitrotoluenu (TNT) a hexogenu (RDX) (Obr. 5) [1]. Výbuch probíhá v uzavřené odpalovací komoře ve vodním nebo suchém prostředí (Obr. 6). Na čele dochází ke vzniku detonačních vln a čas vzniku se pohybuje v řádech mikrosekund. Celý proces exploze musí být intenzivně chlazen. Velikost nanodimantů závisí na množství chladicího média v komoře. Čím více média přivádíme, tím větší DND vznikají. Částice vyrobené pomocí této metody mají velmi velký povrch a běžné velikosti se pohybují okolo 5 nm [4]. Tento postup výroby byl objeven v roce 1962 v tehdejší SSSR [5]. Podobné nanočástice byly nalezeny v mezihvězdném prachu. Vzhledem k velikosti a rovnoměrnosti zrn je tento druh syntetických nanodiamantů používán především k leštění a broušení.

Vyrobené DND mají povrch obalený slupkou grafitu a amorfního uhlíku. Vzniklé „saze“ [1] se pro další průmyslové využití nechají při vysoké teplotě a tlaku vařit v autoklávech (reaktor používaný pro reakce, které probíhají za vysokého tlaku a teploty) s kyselinami po dobu několika dní, což je prováděno z důvodu odstranění přebytečného kontaminačního materiálu z materiálu komory a nediamantového uhlíku. Pomocí tohoto postupu docílíme vzniku čistých DND.



Obr. 5 Výbušniny TNT a RDX jsou zdrojem uhlíku pro růst nanodiamantů [1]



Obr. 6 Výroba DND detonační technikou [1]

Nanodiamantové filmy

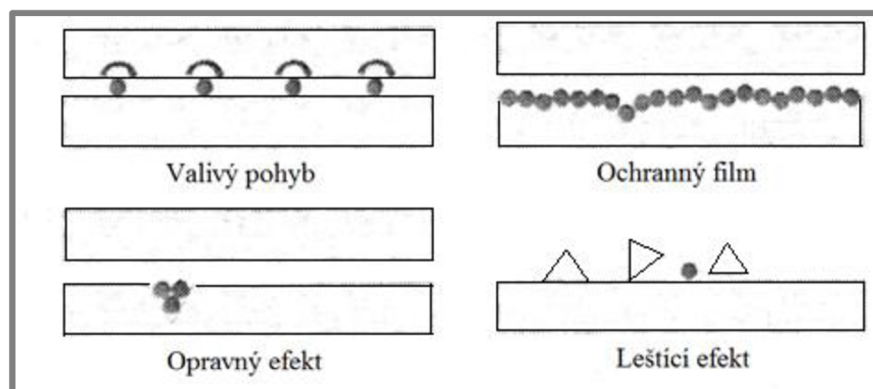
Další způsob výroby nanodiamantů spočívá v urychlené depozici z plynné fáze při mikrovlnném výboji [5]. Vytvoří se velmi čistý diamant rozkladem směsi metanu a vodíku v mikrovlnném výboji (1300 W) při sníženém tlaku (30 mbar) a za relativně nízké teploty podložky (600-800 °C) [1]. Jako podložka může být použita křemíková destička o průměru 10 cm a více.

2.2 Vliv nanodiamantů na vlastnosti maziv

Přidáváním nanodiamantových částic do maziv dochází na povrchu ošetřených součástí ke vzniku reakčních filmů [17] snižujících smykové napětí mezi stykovými plochami. Pevné přísady rovněž vytvoří na povrchu ochrannou vrstvu a snižují tak opotřebení mezi povrchy. Ke snižování tření dochází vlivem malých kulatých nanočástic, které způsobují vznik valivého pohybu mezi povrchy, kde dochází ke tření a zároveň vyplňují nerovnosti vzniklé vlivem opotřebení. Vzhledem k velikosti částic se nejvyšší účinnosti dosahuje při smíšeném a mezném mazacím režimu. Aplikací těchto částic může být tření sníženo asi o 30 % a hloubka opotřebení o více jak 50 %. Detailněji se o jednotlivých hodnotách budeme zabírat při popisech provedených experimentů.

2.2.1 Mechanismy způsobené vlivem nanočástic

Během přidávání nanočástic do olejů se pomocí testů zjistilo, že díky jejich přítomnosti dochází ke vzniku několika mechanismů [17], jež zlepšují vlastnosti stykových ploch (Obr. 7). Nanočástice způsobují vznik valivého pohybu, ochranného filmu, opravného efektu (mending effect) a leštícího efektu.



Obr. 7 Mechanismy způsobené přítomností nanodiamantů [17]

2.2.2 Diamantové grafitové prášky

2.2.2

Zlepšování vlastností mazacích přípravků může být provedeno aplikací ultra rozptýlených prášků s částicemi o velikosti 10-100 nm. Nejčastěji používanými jsou ultra rozptýlené diamantové grafitové prášky (UDP-DG) [7], získané z výbušnin s nadměrným obsahem uhlíku. Produktem výbuchu je směs diamantových a nanodiamantových forem uhlíku v krystalickém a amorfním stavu. Diamantové částice představující asi 20-40 % hmotnosti UDP-DG. Svou přítomností způsobují během procesu mazání oddělení výstupků mezi povrchy, zvyšují sílu mazacího filmu a zaplňují nerovnosti povrchů.

První průmyslový závod k výrobě UDP-DG a diamantových prášků (UDP-D) byl založen v polovině roku 1980 [7] ve vědecko-průmyslové asociaci Altai. Další výzkumy v této oblasti byly provedeny na katedře fyziky v Krasnojarsku a na akademii věd v Rusku. Použitím UDP-DG v mazivech a průmyslových kapalinách došlo k velice pozitivním vlivům na jejich vlastnosti. Jde zejména o použití u ložisek, skluzavek, vodících válečků, ozubených a šroubových kol, motorů a převodovek.

Bylo provedeno velké množství testů pro zjištění vlivů těchto přísad na vlastnosti maziv. Testy motoru S-742.10 na akademii v Brně [7] potvrdily velmi pozitivní vliv oleje s těmito aditivami na běh motoru. Ztráty výkonu motoru klesly o 10-30 % a to v důsledku snížení tření mezi spojkami, klikovými a vačkovými hřídele. Došlo také ke zvýšení účinnosti o 4-8 %, snížila se spotřeba paliva o 3-6 % a poklesla i teplota výfukových plynů o 2-9 %.

Při testech, kde byl jako základový olej použit polyester (PE) [19], došlo přidáním UDP-D k výraznému zvýšení tloušťky mazacího filmu a to především při nízkých otáčkách. S rostoucím obsahem těchto přísad se tloušťka filmu i viskozita nadále zvětšovaly. Například při rychlosti $0,1 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$ vytvoří čistý PE film tloušťky asi 6 nm, zatímco po přidání 0,05 %, 0,3 % a 0,5 % UDP-D vznikl film o tloušťce 8,5 nm, 11 nm a 11,5 nm. Koeficient tření se stoupající rychlostí ($0,1-40 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$) nejprve prudce klesal, ale postupně došlo k plynulému snižování, až se dosáhlo stabilní hodnoty nezávislé na rychlosti.

2.2.3 Nanodiamanty

2.2.3

Pomocí mnoha testů a analýz bylo prokázáno, že použitím DND a diamantů obsahující saze (DS, meziprodukt z nanodiamantové syntézy) [8] v olejových sloučeninách lze docílit výrazného snížení tření a opotřebení. Přestože DS se

používaly pro zlepšení tribologických vlastností po celá desetiletí, tak DND o malých velikostech jsou poměrně novou přísadou. Jejich použitím bylo dosaženo značného prodloužení životnosti nástrojů a jednotlivých součástí mechanického zařízení. Rovněž došlo ke zvýšení dovoleného zatížení třecí dvojice. Nanomaziva mohou obsahovat i jiné druhy nanočástic [17], jako jsou: Cu, CuO, TiO₂, Ag, a oxid grafenu.

Uhlík obsažený v DS je při normálních podmínkách inertní a nereaguje s kovy. K dosažení adhezního chování [8] docílíme existencí určitých podmínek, co se týče teplot, tlaku a přítomnosti chemicky účinných látek. Jelikož při tření mezi dvěma povrchy vznikají vysoké teploty, dochází přítomností uhlíku a chemicky účinných látek k nasycení povrchové vrstvy atomy uhlíku. To má za následek vznik sekundárních struktur (austenit, martenzit) a následné snížení měrné povrchové energie. Dochází tak k adheznímu chování a snížení součinitele tření. U těsnících a vláknových maziv se vlivem aditiva zvýší hermická těsnost spojů, sníží se koroze mezi kontaktními plochami a dojde ke snížení a stabilizaci smykových sil a sil od kroutícího momentu, což je výhodné pro automatické montáže, opravy strojů a zařízení.

Používáním DS nedošlo k žádným negativním vlivům [8] na vlastnosti motorových olejů. Nebylo zjištěno žádné zhoršení tepelně-oxidační stability, ani nedocházelo k agresivnímu chování vůči neželezným kovům a slitinám.

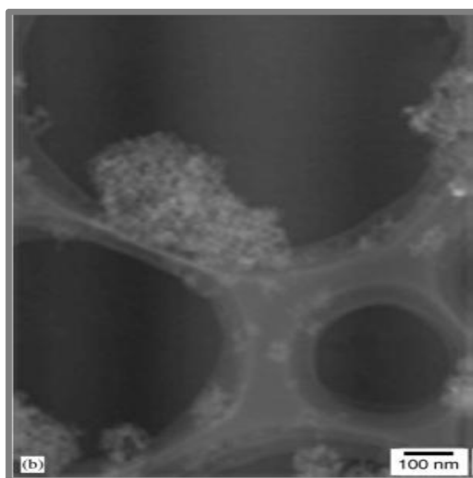
2.3 Použití aditiv ke zlepšení vlastností řezných kapalin a spojovacích past

Řezné kapaliny [7] na bázi minerálních olejů, které obsahují UDP-DG a další přísady, byly vyvinuty pro mechanické zpracování řezáním. Jsou vhodné zejména k vrtání děr, k leštění ferity, ručnímu a strojnímu řezání závitů. Jejich používáním se životnost nástroje zvýšila o 20-40 % a proces řezání se zlepšil v důsledku snížení a stabilizace třecích sil. Jsou vhodné k nahrazení řezných kapalin jako je např. kyselina olejová, která znečišťuje životní prostředí a má negativní vliv na zdraví obsluhy. Pro kovoobráběcí operace byla vytvořena chladicí směs [8] na bázi minerálních olejů s přísadou DS. Její hlavní výhoda spočívá ve snižování řezné síly, prodlužování životnosti nástrojů a především není škodlivá pro obsluhu. Příklad DS může být použita i např. ve spojovacích pastách. Jejím přidáním docílíme zlepšení těsnosti spojů a snížení koroze povrchů.

2.4 Chování DND při jejich aplikacích

U většiny anorganických látek může být problém jejich nerozpustnost a neschopnost vytvořit stabilní disperze [9] v základovém oleji (Obr. 8). U nanopřísad v průmyslových olejích je koloidní stabilita rozhodujícím požadavkem na jejich tribologické aplikace. Z tohoto důvodu jsou prováděny různé povrchové modifikace nanočástic pomocí vhodných krycích agentů nebo vhodných disperzních činidel. DND mohou být modifikovány [15] pro zvýšení stability jejich disperzí ve vhodném nosiči nebo kapalině a poskytovat tak chemickou kompatibilitu pro olej. Je

tedy nutný vhodný výběr stabilizátorů, které nenaruší zbytek složek v produktu, ve kterém jsou použity.



Obr. 8 Shluky a nerovnoměrnosti DND [10]

I když je primární velikost DND přibližně 10 nm, může dojít snadno k jejich shluku [10] v důsledku syntézy, především po přidání do různých médií. V důsledku toho je nutný další rozptyl DND, pomocí ultrazvukové nebo povrchové úpravy s použitím anorganických elektrolytů nebo jiných vhodných látek.

K lepšímu rozptýlení DND ve vodném prostředí byla při experimentech použita metoda grafitizačně-oxidační [10]. Grafitizace byla nejprve provedena v N_2 při teplotě 1273 K a poté bylo provedeno oxidační zpracování na vzduchu při teplotě 723 K po dobu dvou hodin. Následně se prášek za působení ultrazvuku rozptýlil ve vodě a došlo k vytvoření suspenze, obsahující více než 50 % částic o průměru menším než 50 nm. Avšak došlo i ke vzniku agregátů hrubších rozměrů, což bylo zapříčiněno vznikem C-O-C vazby (můstkové vazby kyslíku) mezi krystaly DND v průběhu tepelného zpracování.

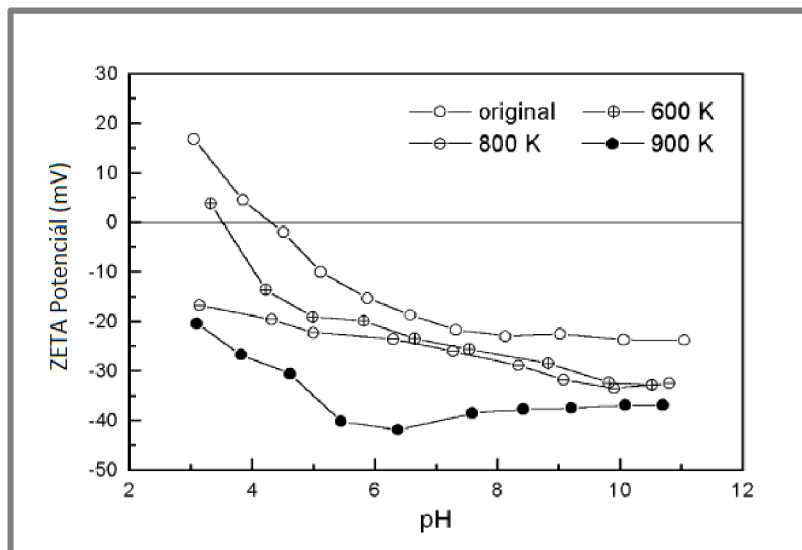
Pro výzkum zabývající se vlivem tepelné úpravy na vlastnosti a rozptyl DND byl použit vzorek poskytnutý firmou Lingyun [10], která je profesionálním výrobcem DND. K čištění byla použita kyselina sírová a chloristá. Pro zkoumání disperzního chování vzorků po tepelném zpracování se vzorky vložily v nádobě do kamen a zahřívaly rostoucí teplotou okolo $10\text{ K}\times\text{min}^{-1}$. Po dosažení odpovídající teploty byly konzervovány po dobu 30 minut a poté se nechaly zchladit na vzduchu. Jako disperzní medium byla použita iontová voda a bílý olej. Pro disperzi částic v suspenzích bylo použito ultrazvukové míchání.

Primárně měly vzorky rozměr [10] menší než 60 nm, s průměrnou velikostí okolo 12 nm a střední velikostí 8,5 nm. Přibližně 88,3 % částic bylo menších než 18 nm.

2.4.1 Zeta potenciál

2.4.1

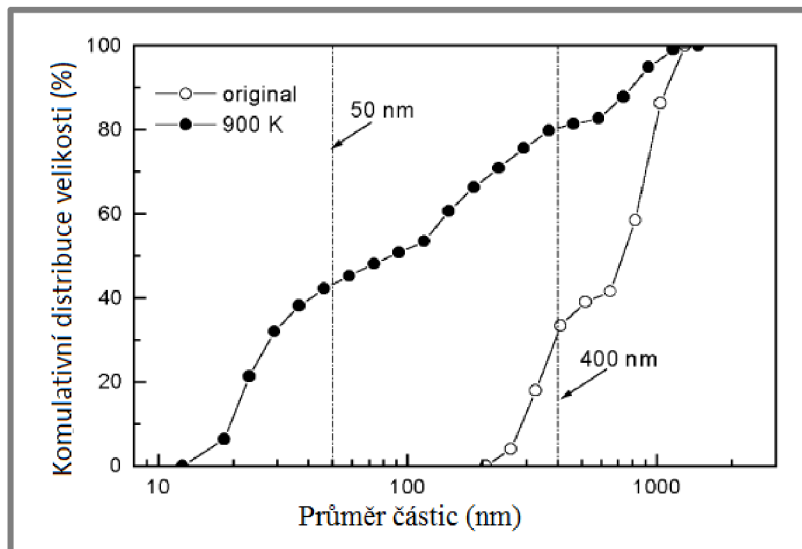
Změnou povrchu funkční skupiny DND ve vodném prostředí došlo ke změně zeta potenciálu [10] (Obr. 9). Se stoupající teplotou rostlo relativní množství a hustota karboxylu v povrchu DND.



Obr. 9 Změna zeta potenciálu vzorku DND [10]

2.4.2 Disperze ve vodném prostředí

Na následujícím obrázku (Obr. 10) je možné vidět disperzní chování původního vzorku DND a vzorku DND ohřátého na teplotu 900 K ve vodném prostředí při pH 7 [10]. Je zřejmé, že došlo ke shluku. Částice původního vzorku byly hrubé, ale jejich rozložení poměrně úzké. Velikost se pohybovala v rozmezí 200-1000 nm. Po ohřevu se ve vzorku nacházelo více než 40 % částic o rozměrech menší než 50 nm, a to v důsledku zvýšeného zeta potenciálu, který způsobil vznik elektrostatického odporu mezi částicemi.

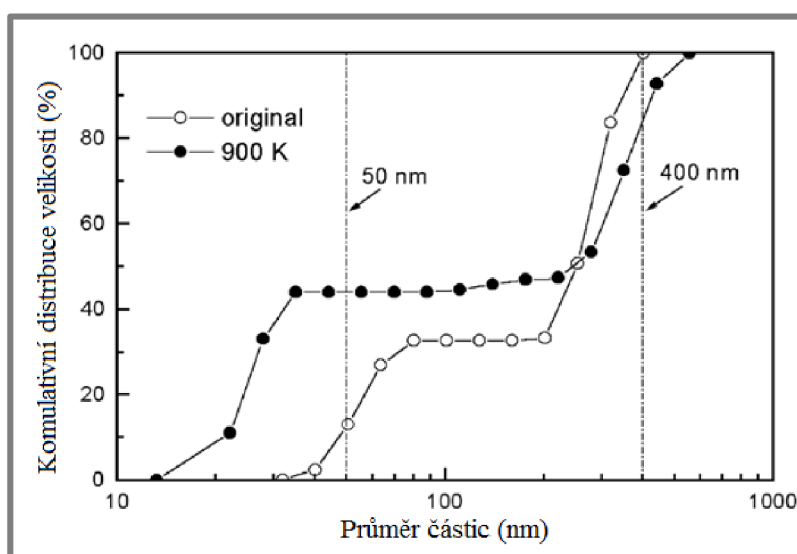


Obr. 10 Disperzní chování vzorku DND ve vodném prostředí [10]

2.4.3 Disperze v nevodném prostředí

2.4.3

Podobný průběh byl pozorován i v nevodném prostředí bílého oleje [10]. Rozložení velikosti DND v nepolárním rozpouštědle je možné vidět na následujícím obrázku (Obr. 11). U vzorků ohřátých na teplotu 900 K se zastoupení malých částic zvětšilo z původních 13 % na 44 %. To bylo pravděpodobně způsobeno zvětšením karboxylových skupin na povrchu vzorku DND. Dochází tam k existenci van der Waalsových sil a vodíkové vazby mezi molekulárními polymery a DND a také tam může dojít ke vzniku elektrické přitažlivosti mezi karboxylovými skupinami a kotevními skupinami dispergačního činidla. Zvětšující se množství karboxylových skupin poskytuje větší množství úchytků pro polymery a zároveň způsobuje zvětšení hustoty absorpčního dispergačního činidla, tím je realizována stabilní suspenze malých částic.



Obr. 11 Disperzní chování vzorku DND v nevodném prostředí [10]

2.4.4 Stabilizátory

2.4.4

Nanodiamantové prášky mohou být stabilizovány různými povrchově aktivními látkami [10], což je výhodné v případě, že stabilizátory jsou sloučeninami podílejícími se na potenciálním použití prášků. Z testů a analýz vyplynulo, že sukcinimidové dispergátory a alkylaryl-sulfonátové detergenty (mycí prostředky) [15] mohou být vhodnými stabilizátory pro koncentrované suspenze použité v mazivech. Při použití DND v motorových a převodových olejích je rovněž nutné použití vhodných přísad pro stabilizaci těchto částic (Tab. 1).

Tab. 1 Typy stabilizátorů používané pro motorové a převodové oleje [15]

Stabilizátory	Popis složení
Převodový olej-složení 1	Soubor aditiv obsahující S, P, N
Převodový olej-složení 2	Soubor aditiv obsahující S, P, N
Motorový olej-složení 1	Bazický Ca detergent + N- dispergátor
Motorový olej-složení 2	Prací prostředek a dispergátor
Motorový olej-složení 3	Motorový olej obsahující S, P, N, B, Zn, Mg
Motorový olej-složení 4	Motorový olej obsahující S, P, N, Zn, Ca, Mg
Motorový olej-složení 5	Tepelně stabilní dispergátor polyalkenyl sukcinimidu
Motorový olej-složení 6	Bazický Ca alkylaryl sulfonát
Motorový olej-složení 7	Neutrální Ca alkylaryl sulfonát

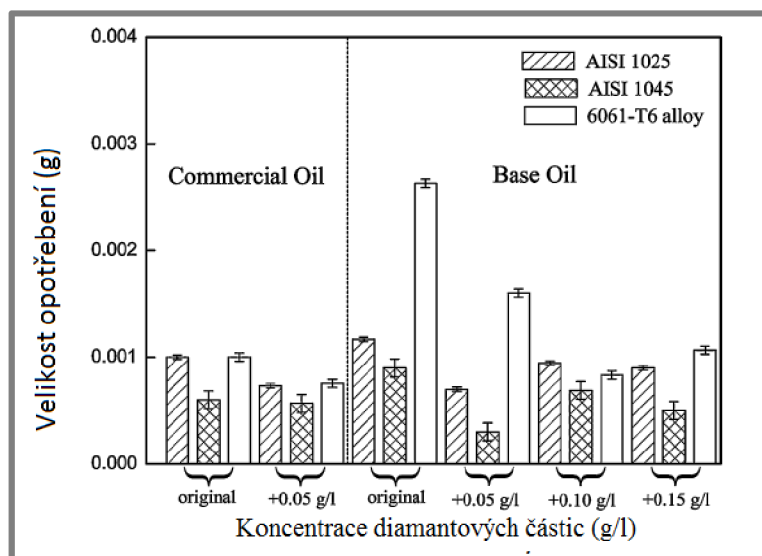
Následující tabulka (Tab. 2) shrnuje důležité výsledky testování stability 3% parafinové suspenze NDS 40 (směs obsahující 40 % nanodiamantů).

Tab. 2 Procentuální stabilita při použití různých typů stabilizátorů po uplynutí několika dní [15]

Stabilizátory	Procentuální stabilita			
	15 min	20 dní	75 dní	Obnova- 75 dní
Převodový olej-složení 1	47,54	0	-	-
Převodový olej-složení 2	44,53	3,1	-	-
Motorový olej-složení 1	99,02	54	11,9	37,2
Motorový olej-složení 2	95,49	42,8	20,5	61,8
Motorový olej-složení 3	76,26	54,6	7,2	81,7
Motorový olej-složení 4	90,59	56,7	12,9	74
Motorový olej-složení 5	89,92	17,6	9,1	65,1
Motorový olej-složení 6	85,62	37	11,1	34,1
Motorový olej-složení 7	97,22	61,5	19,2	84
0,5 složení 5 + 0,5 složení 7	93,94	36,9	24,3	54,4

2.5 Vlastnosti uhlíkových ocelí a hliníkových slitin při použití DND

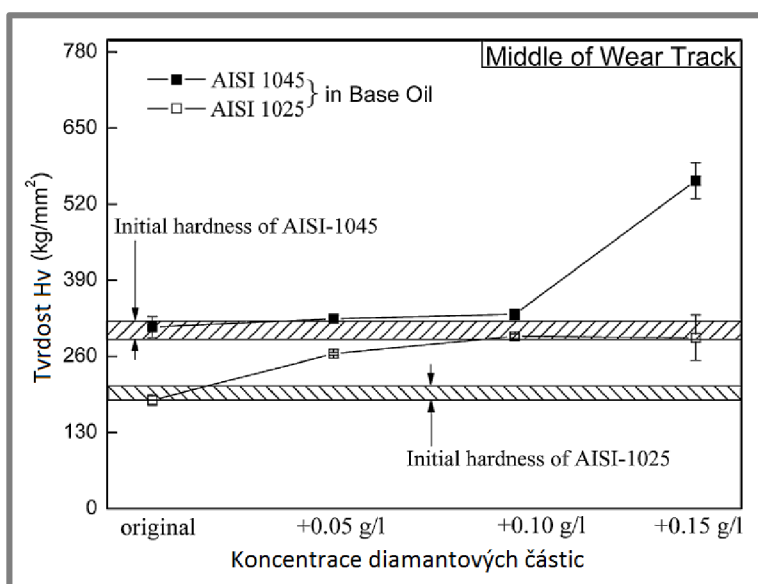
Bylo provedeno porovnání dvou uhlíkových ocelí AISI 1045, AISI 1025 a hliníkové slitiny 6061-T6 při použití olejů s různou koncentrací DND [11]. Experimenty bylo nejdříve zjištěno, že při zvýšení teploty na 50 °C nemá koncentrace nanodiamantů v základním oleji žádný vliv na jeho viskozitu. Dále se zjišťoval vliv DND na velikost opotřebení. Na následujícím obrázku jsou znázorněny ztráty třením těchto materiálů ve dvou olejích s různými nanodiamantovými koncentracemi (Obr. 12).



Obr. 12 Závislost velikosti opotřebení na koncentraci DND [11]

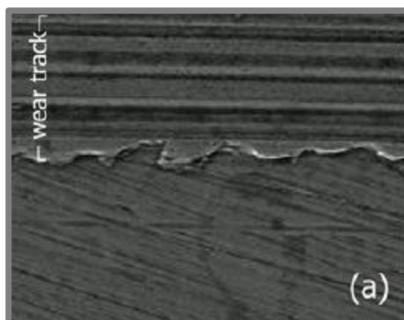
Snížení hodnot opotřebení přidáním DND se u uhlíkových ocelí výrazněji projevilo při použití oceli s nižším obsahem uhlíku tj. AISI 1025. Je zřejmé, že čím více uhlíku ocel obsahuje, tím má nanodiamantová přísada menší vliv na snížení opotřebení. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při optimální koncentraci $0,05 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$ [11]. U hliníkové slitiny 6061-T6 došlo rovněž k výraznému zlepšení hodnot opotřebení jak v základovém oleji, tak i v komerčním oleji. Při koncentraci přibližně $0,1 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$ DND v základovém oleji se dosáhne přibližně stejných hodnot opotřebení, jako u komerčního oleje s nanodiamantovou koncentrací $0,05 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$.

Přítomnost DND v olejích měla rovněž velice pozitivní vliv na hodnoty tvrdosti [11] pozorovaných ocelí. Hodnoty tvrdosti byly tím vyšší, čím vyšší byla koncentrace těchto částic v oleji (Obr. 13). Při koncentraci $0,05\text{-}0,1 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$ byl výraznější nárůst tvrdosti u oceli AISI 1025 než u oceli AISI 1045. U oceli AISI 1045 došlo k výraznějšímu nárůstu tvrdosti až při vyšší koncentraci, tedy přibližně $0,15 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$.



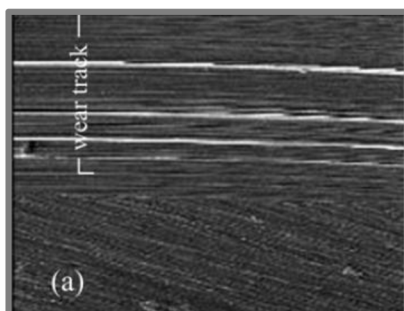
Obr. 13 Hodnoty tvrdosti ocelí v závislosti na koncentraci DND [11]

Následující obrázek (Obr. 14) zobrazuje hranice mezi původním a opotřebovaným povrchem u vzorku z oceli AISI 1025 při použití oleje s koncentrací $0,05 \text{ g} \times \text{l}^{-1}$ DND.



Obr. 14 Vliv DND v oleji na tvrdost povrchu oceli [11]

U hliníkové slitiny neměla přítomnost DND výraznější vliv [11] na povrchovou tvrdost (Obr. 15).



Obr. 15 Změna povrchové tvrdosti hliníkové slitiny při použití oleje s DND [11]

Velmi pozitivních výsledků bylo docíleno i při testech koeficientu tření [11]. U všech zkoumaných materiálů došlo vlivem DND k jeho výraznému snížení, a to jak v základovém, tak i v komerčním oleji. Podtržená čísla v následující tabulce (Tab. 3) označují minimální průměrné hodnoty koeficientu tření pro dané vzorky a zároveň udávají ideální koncentrace DND.

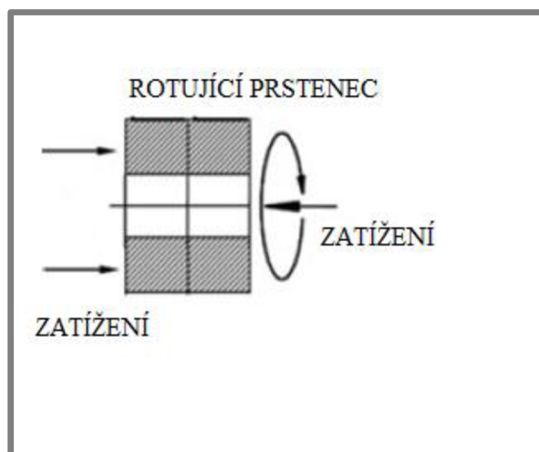
Tab. 3 Hodnoty koeficientu tření v závislosti na koncentraci DND [11].

Testovaný materiál	Mazadlo				
	Komerční olej	Komerční olej +0,05 (g/l)	Základový olej +0,05 (g/l)	Základový olej +0,10 (g/l)	Základový olej +0,15 (g/l)
AISI-1025	0,323	<u>0,315</u>	0,366	0,345	<u>0,340</u>
AISI-1045	0,345	<u>0,339</u>	0,351	<u>0,344</u>	0,349
6061-T6	0,308	<u>0,272</u>	0,419	<u>0,326</u>	0,330

2.6 Přidání DND do olejů na bázi polyalfaolefinů

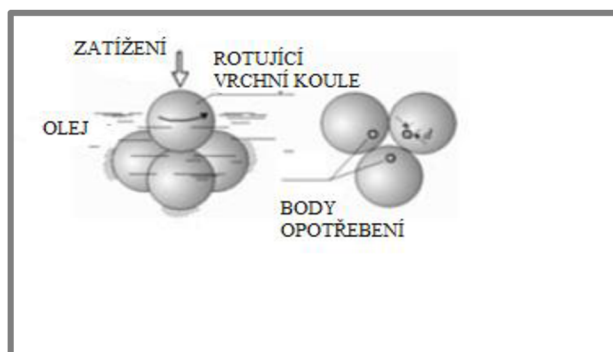
Na základě zjištěných pozitivních vlivů DND na vlastnosti olejů byly provedeny experimenty pro zjištění, zda lze podobných výsledků dosáhnout i u olejů na bázi polyalfaolefinů (PAO) [13]. DND byly do olejů přidávány v koncentraci přibližně 0,03-0,05 hm. %. Pro porovnání hodnot byly použity dva závodní motorové oleje Exp Val US a Mobil Super 5000 5W30 API SN. DND byly přidávány buď samostatně, nebo v kombinaci s dalšími synergickými přísadami jako jsou: ultra rozptýlené polytetrafluoretylenové částice (PTFE, bílý krystalický polymer parafinického vzhledu) a organická molybdenová přísada - molybden alkyl dithiofosfát (MoDDP).

K realizování testů závodního motorového oleje a PAO s přidáním DND bylo použito zařízení SMT-1 [13], které pracuje na principu rotace dvou zatížených ocelových prstenců (Obr. 16). Rychlost rotace se postupně navyšovala na 500, 1000 a 1500 ot \times min⁻¹. Prstence byly vyrobeny z ocele 52100 o tvrdosti HRC=52 a drsnosti povrchu Ra=0,38 [16]. Zatížení bylo realizováno pomocí pružiny, která působila silou 314N.



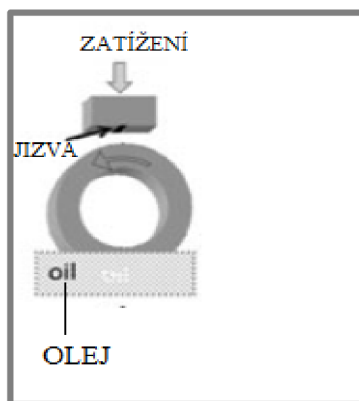
Obr. 16 Zařízení SMT-1 [13]

Hodnoty koeficientu tření [13] a opotřebení se stanovily pomocí tzv. čtyř-kuličkového testu (Obr. 17). Kuličky měly průměr 12,7 mm a rotovaly rychlostí 1460 ot \times min⁻¹ [16]. Zatížení o velikosti 196 N působilo po dobu šedesáti minut.



Obr. 17 Čtyř-kuličkový test [13]

Test výkonnosti [13] DND v oleji Mobil Super 5000 5W30 API SN byl proveden na zařízení UMT-3, pracující na principu tlakového působení kovového kvádrů na rotující ocelový prstavec (Obr. 18).



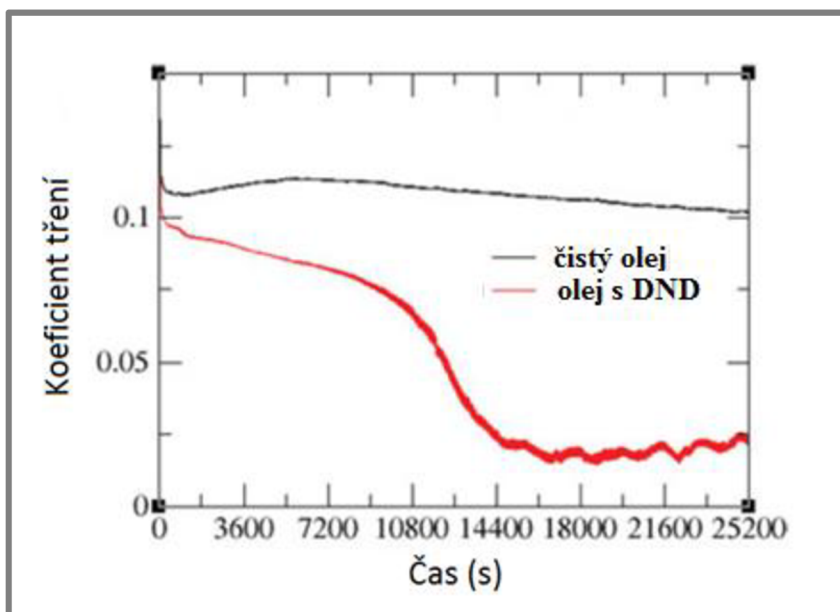
Obr. 18 Zařízení UMT-3 [13]

V následující tabulce (Tab. 4) jsou zobrazeny výsledky testů koeficientu tření pro koncentraci: DND (0,03- 0,05%), PTFE (0,3%) a MoDDP (0,5%) [13].

Tab. 4 Hodnoty koeficientu tření a velikosti opotřebení pro PAO s různými přísadami [13]

Olej	přísady	Koeficient tření			Opotřebení (mm)
		500 ot × min ⁻¹	1000 ot × min ⁻¹	1500 ot × min ⁻¹	
PAO-6	-	0.065	0.195	0.052	0.646
PAO-6	DND	0.048	0.030	0.022	0.362
PAO-6	PTFE	0.048	0.035	0.043	0.306
PAO-6	MoDDP	0.056	0.048	0.048	0.306
PAO-6	DND/ PTFE	0.043	0.004	0.001	0.350
PAO-6	DND/ MoDDP	0.043	0.017	0.026	0.299

Podle očekávání koeficienty tření a charakteristiky opotřebení u oleje PAO-6 obsahující DND nebo DND v kombinaci s PTFE nebo MoDDP vykazují výrazně lepší hodnoty [13] oproti běžným olejům bez přísad. Při použití přísad PTFE a MoDDP bez DND bylo rovněž zjištěno drobné zlepšení vlastností oleje, ale ne tak výrazné jako při kombinaci s DND. Např. kombinace DND a MoDDP přísady u motorových olejů má výrazný vliv na spotřebu paliva. K výraznému snížení koeficientu tření použitím těchto přísad však nedošlo hned, ale bylo potřeba provést delší test, který ukázal výraznější změnu až po sedmi hodinách testu [13] (Obr. 19). Došlo rovněž ke snížení opotřebení.



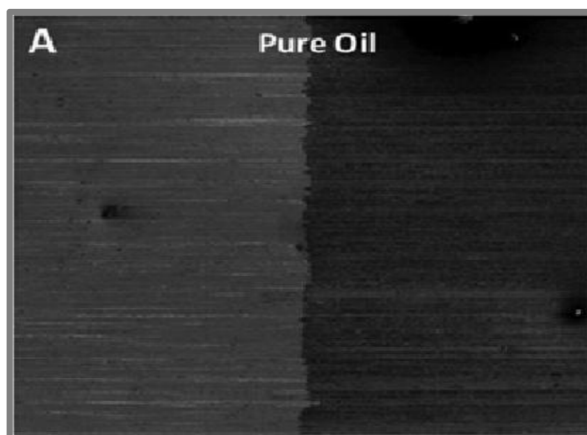
Obr. 19 Hodnoty koeficientu tření v závislosti na čase při použití oleje s DND [13]

Z následující tabulky (Tab. 5) je zřejmé, že přítomnost DND v oleji má rovněž významný leštící účinek [13] na povrch součástí. Hodnota drsnosti povrchu (R_a) a střední kvadratická hodnota drsnosti povrchu (rms) testovaného vzorku s přísadou DND je o 30 % nižší, než při použití čistého oleje.

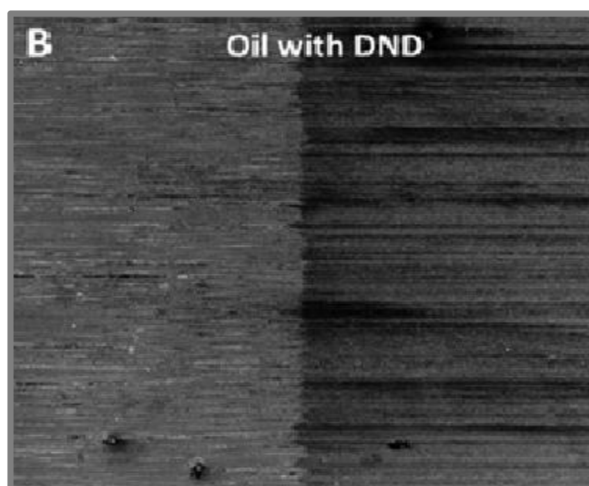
Tab. 5 Hodnoty drsnosti povrchu součásti při použití čistého oleje a oleje s DND [13]

Použitý olej	$R_a(\mu\text{m})$	rms(μm)
Čistý olej	0.28 ± 0.025	0.22 ± 0.01
Olej s DND	0.18 ± 0.02	0.14 ± 0.008

Na následujících obrázcích je možné vidět rozdíl drsnosti povrchu vzorku při použití čistého oleje (Obr. 20) a oleje s přísadou DND (Obr. 21).



Obr. 20 Drsnost povrchu při použití čistého oleje [13]



Obr. 21 Drsnost povrchu při použití oleje s DND [13]

2.7 Vliv DND na vlastnosti motorových olejů

Jelikož cena pohonných hmot stále roste, je snaha neustále snižovat jejich spotřebu. K tomu má výrazný vliv snižování tření mezi jednotlivými částmi motoru. Již z předešlých experimentů víme, že toho lze dosáhnout přidáním DND do motorových a převodových olejů.

Pro experimenty zabývající se tímto problémem byly použity různé motorové oleje (AS8, M10G, M6310G), u kterých bylo zjištěno, že přidáním 0,5-1hm. % DS se dosáhne nejnižších hodnot tření [8]. Avšak při použití příliš velkého množství DS došlo ke vzniku nespojitostí v olejové vrstvě v důsledku zahřívání na vysoké teploty. Během používání motorových olejů s přísadou DS nebyly zjištěny žádné negativní vlivy, ať už na provoz zařízení nebo na životní prostředí. Naopak došlo ke zvýšení výkonu motoru o 4-8 %, snížení měrné spotřeby paliva o 3-6 % a teplota výfukových plynů klesla o 2-9 %. Aplikaci DS v průmyslových a převodových olejích měla za následek snížení koeficientů tření o 20-30 %.

Byly rovněž provedeny i testy vlivu DND smíchaných s motorovým olejem na spotřebu paliva [16]. Pro testy se použily automobily Toyota Celica (rok výroby 2003) a Ford Focus (rok výroby 2002). Toyota Celica měla před výměnou oleje průměrnou spotřebu okolo jeden galon na 29,5 míle a u Fordu Focusu to bylo přibližně jeden galon na 31,4 míle. Poté došlo k výměně oleje a přidání 200 ml PAO s DND do 4 litrů motorového oleje pro každé auto. Po následném měření průměrné spotřeby paliva bylo zjištěno, že u Toyoty se spotřeba snížila o 5,6 % a u Fordu o 3,4 %. Snížení spotřeby se výrazněji projevilo až po opětovném doplnění nádrže. U obou vozů bylo rovněž pozorováno výrazné snížení hluku motoru.

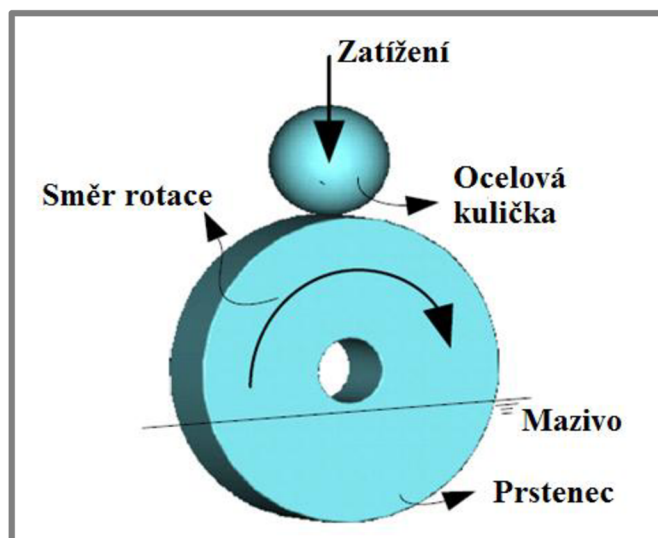
Qiao YL. a kol. [23] pomocí svých výzkumů dokázali pozitivní vliv DND na tribologické vlastnosti i při vysokých teplotách (500 °C) a tlacích.

Cíl snížení spotřeby paliva samozřejmě souvisí se snížením tření mezi jednotlivými částmi motoru. Například tření mezi pístem a válcem spalovacího motoru je poměrně značné a je tedy potřeba vymyslet efektivní způsob k jeho snížení. Při použití nanodiamantového polymerního povlaku [17] došlo při porovnání s běžně používanou MoS₂ polymerovou vrstvou ke snížení tření až o 7 %.

2.8 Vlastnosti kapalného parafinu po přidání DND

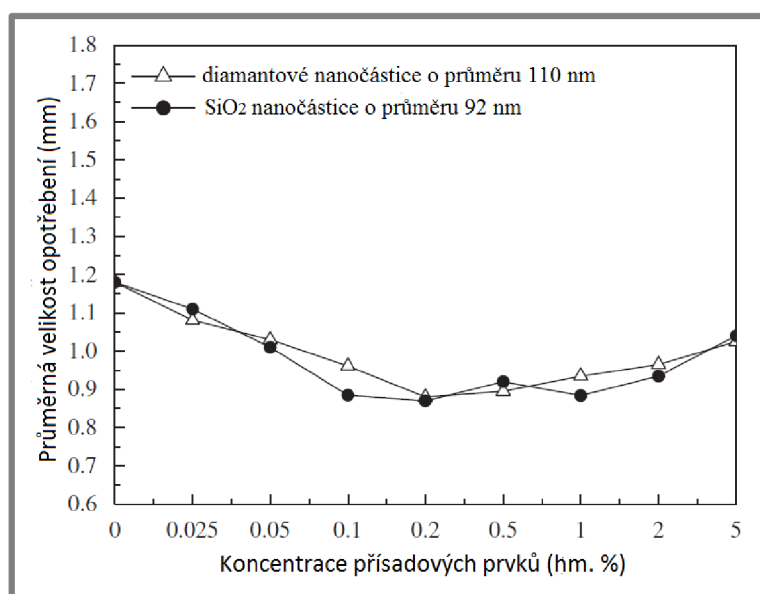
2.8

Bylo rovněž zjištěno, že použitím DND lze zlepšit vlastnosti kapalného parafinu [12]. Ke zjištění potřebných výsledků bylo použito testovací zařízení pracující na principu stacionárního působení ocelové kuličky na otáčející se prstenec (Obr. 22).



Obr. 22 Schéma zařízení sloužící k zjištění vlivu DND na vlastnosti kapalného parafinu [12]

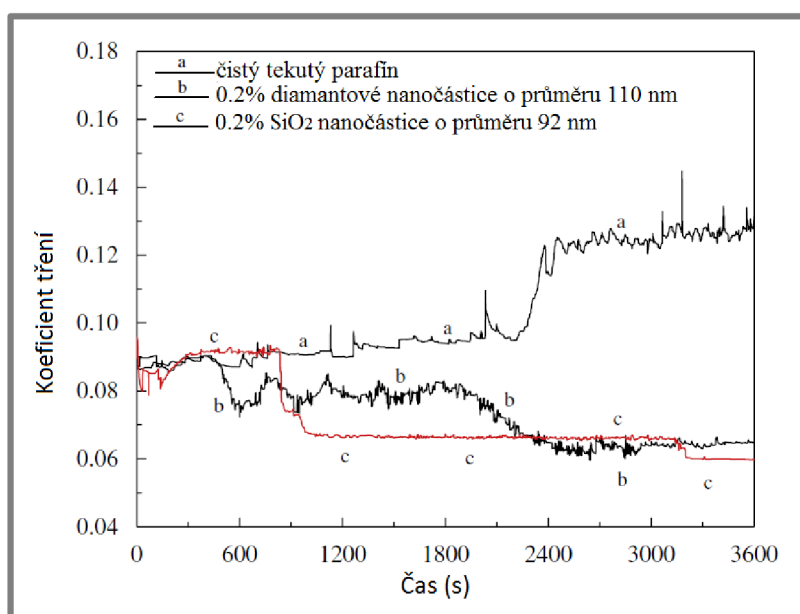
Výsledky testů ukázaly, že průměrná velikost opotřebení je závislá na koncentraci DND (Obr. 23) [12]. Při použití čistého tekutého parafinu v mazivech se průměrná velikost opotřebení pohybovala okolo 1,18 mm. To se však značně změnilo s přidáním přibližně 0,025 hm. % DND. Optimální koncentrace DND minimalizující velikost opotřebení byla přibližně 0,2-0,5 hm. %.



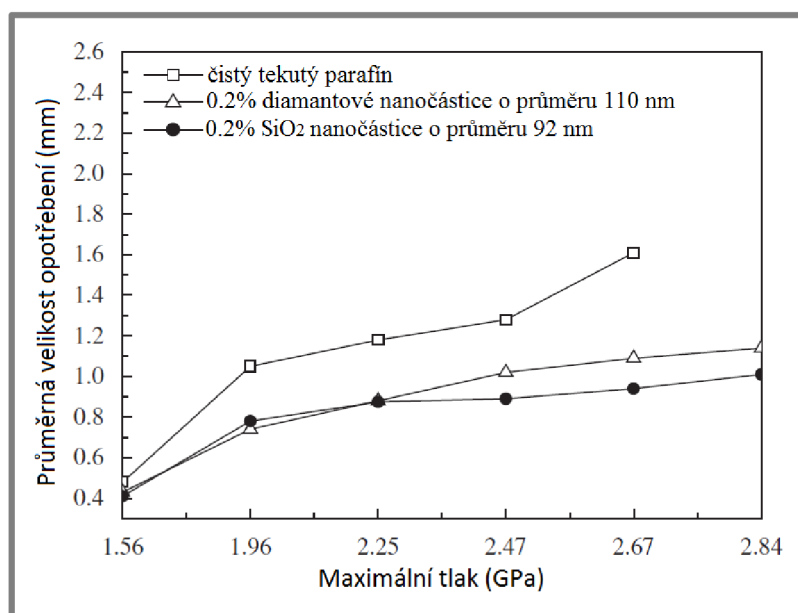
Obr. 23 Závislost velikosti opotřebení na koncentraci nanočástic v kapalném parafinu [12]

Koeficient tření [12] byl získán jako funkce koncentrace aditivních povrchově modifikovaných částic kyseliny olejové v kapalném parafínu. Po jejich přidání došlo k výraznému snížení koeficientu tření. Koeficient tření byl měřen tzv. kluznými testy. Ty byly postupně provedeny s čistým tekutým parafínem, parafínem s přísadou 0,2 hm. % DND a nakonec byl použit parafín s přidáním 0,2 hm. % SiO_2 nanočástic. Výsledné hodnoty byly zaneseny do grafu (Obr. 24). Je zřejmé, že koeficient tření čistého tekutého parafínu se postupně s časem zvyšuje, což je způsobeno adhezí mezi stykovými plochami. U parafínu obsahujícího 0,2 hm. % DND byl z počátku koeficient tření stejný jako u čistého parafínu, avšak postupem času se začal snižovat a na hranici času 2400 s se stal stabilním [12]. Koeficient tření u tekutého parafínu s koncentrací 0,2 hm. % SiO_2 nanočástic byl po celou dobu velmi nízký a stabilní.

Experiment také ukázal, že přidané nanočástice zmírňují nárůst opotřebení při zvyšující se velikosti působícího tlaku (Obr. 25) [12].



Obr. 24 Změny koeficientu tření v závislosti na čase při použití parafínu s příměsí nanočástic [12]



Obr. 25 Velikost opotřebení v závislosti na velikosti působícího tlaku při použití parafínu s příměsí nanočástic [12]

2.9 PTFE fólie s nanodiamanty

2.9

PTFE fólie [14] jsou díky jejich výborným vlastnostem široce používány pro různé tribologické aplikace. Vyznačují se zejména nízkým koeficientem tření, vysokou tepelnou stabilitou a vysokou chemickou odolností. I přes tyto dobré vlastnosti jsou jejich aplikace omezeny kvůli špatné odolnosti proti opotřebení a otěru. Z tohoto důvodu byla provedena řada výzkumů pro zjištění vhodných aditiv, které by byly schopny tyto vlastnosti zlepšit. Bylo zjištěno, že daným požadavkům by mohly vyhovovat nanodiamantové částice. Provedly se tedy experimenty, při kterých byly DND přidávány do PTFE fólií. Odolnost proti opotřebení se u PTFE fólií postupně zvyšovala se stoupajícím obsahem nanodiamantových částic až do obsahu 2 hm. %. Zároveň došlo ke snížení koeficientu tření z hodnoty 0,21 na 0,16 a šířka stopy opotřebení se zmenšila z 0,85 mm na 0,44 mm. S vyšším obsahem se vlastnosti už nezlepšovaly, spíše zhoršovaly.

2.10 Jiné druhy nanočástic zlepšující vlastnosti olejů

2.10

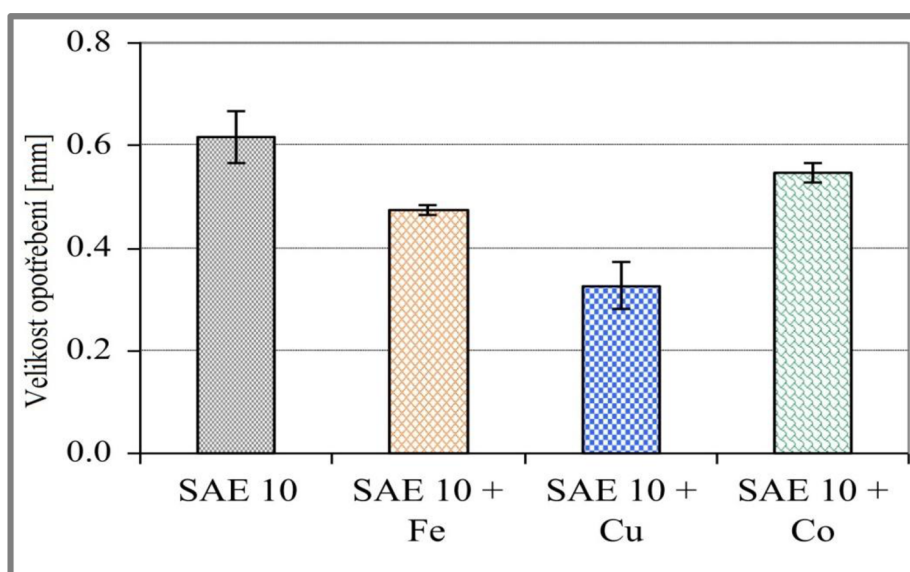
Pozitivní vliv na vlastnosti olejů nebyl zjištěn pouze u DND, ale i u jiných druhů nanočástic, pomocí kterých bylo dosaženo velmi příznivých výsledků.

Nanočástice mědi a oxidu měďnatého (CuO)

Byly provedeny testy pro zjištění vlivu nanočástic CuO [17] na vlastnosti motorového oleje 20W4G. Použité nanočástice měly kulovitý tvar a jejich velikost byla přibližně 25-55 nm. Výsledky ukázaly výrazné snížení tření a to až o 24 %. Došlo rovněž ke snížení opotřebení (o 53 %) a koeficientu tření.

K dalšímu experimentu byl použit motorový olej SAE 20W50 [17], do kterého se postupně v různých koncentracích přidávaly CuO nanočástice. Cílem bylo zjistit vliv přísady na vlastnosti oleje, jako jsou viskozita, bod tuhnutí, bod vzplanutí a součinitel tepelné vodivosti. Tyto vlastnosti byly zkoumány z důvodu jejich výrazného vlivu na účinnost oleje. Tepelná vodivost se zvýšila o 3 % a bod vzplanutí stoupl o 7,5 % při koncentraci 0,1 hm. %. Bod tuhnutí se zvýšil o 3,7 % při koncentraci 0,2 hm. %. U jiných koncentrací naopak došlo k poklesu bodu tuhnutí.

Padgurskas J. a kol. [20] zkoumali účinek Fe, Cu, a CuO nanočástic na tribologické vlastnosti minerálního oleje SAE10 a výsledky poté zanesli do grafu (Obr. 26). Z grafu je zřejmé, že největší vliv na snížení opotřebení mají měděné nanočástice, které snížily opotřebení až o 47 %.



Obr. 26 Velikost opotřebení v závislosti na typu použitých nanočástic [20]

Nanočástice oxidu titaničitého (TiO₂)

Kao MJ. a Lin CR. [21] zjišťovali tribologické chování mezi dvěma součástkami z litiny, při použití nanočástic TiO₂ v parafinovém oleji. Ke zkouškám použili kluzný tester s vratným pohybem. Velikost zrn byla přibližně 50 nm a koncentrace dosahovala 5 hm. %. Zjistilo se, že tyto částice jsou schopny snížit hloubku jizvy opotřebení až o 80,84 %.

Stříbrné nanočástice (Ag)

Twist CP. a kol. [22] zkoumali účinky nanočástic stříbra přidávaných do motorového oleje SAE 15W40 při velmi vysokých teplotách (180-300 °C). Částice byly do oleje přidávány v různých koncentracích od 0,5 do 35 hm. %. Výsledky testů ukázaly výrazné snížení opotřebení ve srovnání se základním olejem. Nejlepších hodnot se dosáhlo při koncentraci 2,5-5 hm. %. Mechanismus vlivu Ag nanočástic na snížení tření spočívá v ukládání a absorpci těchto nanočástic na povrchu součástí a vytvoření tak mazacího filmu mezi třecími povrchy. Nejlepších hodnot se dosáhlo při filmu o tloušťce 75 a 150 nm, aniž by byl zjištěn nějaký nepříznivý vliv na koeficient tření nebo opotřebení.

Nanočástice grafenu a oxidu grafenu

Výzkum nových nanočástic pro zlepšení tribologických vlastností stále probíhá. Jeden z nejnovějších materiálů je grafen [17]. Mezi jeho základní fyzikální vlastnosti patří mechanická pevnost, pevnost v tahu, tepelná vodivost a velmi velké poměry stran. Při použití těchto částic došlo ke zlepšení třecích vlastností až o 80 % a odolnosti proti opotřebení o 33 % ve srovnání s čistým olejem. Těchto hodnot bylo dosaženo při optimální koncentraci $0,025 \text{ mg} \times \text{ml}^{-1}$ v základním oleji. Ke zlepšení vlastností dochází vlivem rovinné geometrie grafenu, díky které může snadno klouzat v mazací vrstvě mezi povrchy.

3 DISKUZE

Vývoj průmyslu úzce souvisí s rostoucími nároky na vlastnosti maziv, pomocí kterých lze dosáhnout co nejnižších ztrát vlivem tření, s čímž samozřejmě souvisí snížení provozních nákladů dané výroby. Z tohoto důvodu jsou neustále kladeny nároky na vývoj nových a výkonnějších přísad, kterými lze dosáhnout co nejvyšší efektivity mazacích prostředků. Hlavním cílem výroby je samozřejmě konkurenceschopnost a s tím související provoz strojů za extrémních vlivů (vysoké rychlosti, tlaky atd.). To má za následek vznik podmínek, kde tloušťka mazacího filmu zajišťující minimální hodnotu tření mezi povrchy je tak malá, že pevné přísady přestávají být účinné. Z tohoto důvodu se vývoj nových aditiv zaměřuje na částice, jejichž rozměry jsou v řádech nanometrů. Z předešlé rešerše vyplývá, že daný problém by mohl být řešen využitím DND.

Nanodiamanty mají vynikající vlastnosti (vysoká tvrdost, odolnost proti korozi, elektrochemická inertnost, nízký koeficient tření), protože jejich struktura je tvořena krystalickou strukturou diamantu, čehož lze využít v průmyslu. V přírodě se však nacházejí pouze v meteoritech a je tedy nutná jejich průmyslová výroba. V dnešní době existuje mnoho způsobů, kterými lze vyrobit tvarově dokonalé a cenově přijatelné nanodiamanty. DND jsou vyráběny pomocí detonační techniky. Ty mají díky své malé velikosti a kulatému tvaru schopnost vytvořit valivý pohyb v mazacím filmu mezi povrchy a zároveň vyplňují nerovnosti vzniklé vlivem opotřebení. Největšího efektu je dosaženo při smíšeném a mezném mazacím režimu. Pomocí mnoha experimentů bylo zjištěno, že lze pomocí těchto částic dosáhnout výrazného snížení tření a opotřebení. Použitím mazadel s přísadou DND byl zjištěn velmi pozitivní vliv na povrchové vlastnosti různých druhů ocelí a hliníkových slitin, kde došlo ke značnému snížení drsnosti a zvýšení tvrdosti povrchu. Při aplikaci těchto částic v motorových a převodových olejích bylo rovněž docíleno výborných výsledků. Došlo především ke zvýšení výkonu motoru přibližně o 6 % a spotřeba paliva klesla o 3-6 %. Hodnota koeficientu tření se snížila o 20-30 % a to i za vysokých teplot a tlaku. Ke snížení tření však nedochází hned, ale je potřeba pár hodin provozu stroje, než se objeví zlepšení. Pozitivní vliv byl potvrzen také při použití DND u PAO, kapalného parafínu a PTFE fólií. Ideální koncentrace, ve které jsou částice do maziv přidávány, se pohybuje v desetinách až jednotkách hm. %, vždy záleží na druhu základního média. DND nemusí být do mazacích prostředků přidávány samostatně, ale je možná kombinace s jinými přísadami k docílení nejlepších výsledků. Primární velikost DND je přibližně 10 nm, ale vlivem syntézy může dojít snadno k jejich shluku a to zejména při aplikaci. K dosažení stabilní disperze je nutné částice modifikovat pomocí vhodných stabilizátorů, které nenarušují zbytek složek daného média.

Z provedených experimentů vyplývají tyto důležité vlastnosti DND: [8]

- I při nízké koncentraci DND v oleji se docílí vysoké efektivity.
- Velmi dobrá kompatibilita s mnoha syntetickými a minerálními oleji.
- Uhlíkové shluky obsažené v DND jsou šetrné k životnímu prostředí v porovnání s kovovými částicemi.

Přítomnost uhlíkových shluků se může projevit v různých aspektech: [8]

- Uhlíkové shluky malých velikostí se nasatí do povrchu, vyplní nehomogenní části a vytvoří nové třecí plochy. Tím dojde ke snížení tření a opotřebení a to zejména při nedostatku dostatečné vrstvy maziva.
- Zlepšují viskozitu maziva v tenkých vrstvách a tím snadnější rozptýlení po struktuře. Nedochází tedy k tak velkým ztrátám oleje prosakováním mezerami a těsněním.
- Sníží viskozitu mazadla při nižších teplotách a tím posouvají teplotní rozsah použití o 5-10 °C směrem k nižším teplotám.
- Absorbují pryskyřici, vznikající oxidací oleje a zabraňují jejímu ukládání na třecím povrchu.
- Zajistí více jak šedesátihodinový účinek po výměně maziva z důvodu pevného zachycení uhlíkových shluků na třecích plochách pomocí mechanických, absorpčních a difúzních mechanismů.

Přidáním DS do maziv lze získat: [8]

- Zlepšení rozběhových podmínek pro spalovací motory a jiné mechanické zařízení, tím dochází ke snížení opotřebení a prodloužení životnosti součástí.
- Snížení spotřeby drahých olejů pro provoz přesných obráběcích strojů.
- Zvýšení výkonu vznětových a zážehových motorů, následné snížení hladiny hluku a spotřeby paliva.

Je zřejmé, že význam nejen DND, ale i jiných druhů nanočástic v oblasti tribologie nadále poroste. To lze vyčíst i z neustálého vývoje nových druhů nanočástic, kterými lze dosahovat minimálních ztrát a ušetřit tak provozní náklady. Je však potřeba zamezit usazování a docílit stabilních disperzí pomocí vhodných činidel a stabilizátorů. Vzhledem k vynikajícím vlastnostem se nanodiamanty používají i v jiných odvětvích. K čemu všemu se budou moci v budoucnu použít, zatím nevíme, ale je jasné, že jimi budeme obklopeni.

4 ZÁVĚR

V souladu se zadáním řeší bakalářská práce vliv DND na tření, opotřebení a mazání.

První část práce má za cíl podat ucelený přehled o dosud používaných typech aditiv a shrnout důvody, proč by měly být nahrazovány novými druhy přísad, kterými mohou být právě DND. Dále jsou zde popsány základní vlastnosti, způsoby výroby a nejdůležitější oblasti, ve kterých jsou nanodiamanty zkoumány a aplikovány.

V hlavní části je nejprve popsáno chování DND po přidání do různých mazacích prostředků, kdy dochází ke značné tvorbě shluků. Následuje výběr nejpoužívanějších druhů činidel, kterými lze tento problém řešit. Jedna z nejdůležitějších částí této práce je zaměřena na popis zjištěných výsledků provedených experimentů, při kterých byly DND přidávány do motorových a převodových olejů, PAO, kapalného parafínu a PTFE fólií. Jsou zde rovněž shrnuty výsledky testů povrchových vlastností, při kterých byly porovnány dvě uhlíkové oceli a hliníková slitina při použití mazadel s různou nanodiamantovou koncentrací.

Poslední kapitola obsahuje popis jiných druhů nanočástic používaných ke stejnému účelu.

Na závěr byla v diskuzi popsána problematika DND, která byla doplněna o možné vyhlídky do budoucnosti těchto částic.

Souhrnně z výše popsáných experimentů vyplývá, že použití DND v mazacích prostředcích má velice pozitivní vliv na tření, opotřebení a celkově na provoz mechanických zařízení. Dochází však ke značné tvorbě shluků, a je proto potřeba provádět různé úpravy, nebo použít vhodná činidla, kterými lze zajistit stabilitu DND. Budou-li splněny tyto podmínky, mohou DND značně přispět k lepšímu provozu výroby a různých dopravních prostředků.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PŘIBYL, Vladimír. Aldebaran bulletin. *Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie* [online]. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna, 2015, **13**(30) [cit. 2016-05-11]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_30_dia.php
- [2] ŠLEGEROVÁ, Jitka a Petr CÍGLER. Nanodiamanty - fluoresenční a zobrazování nanosondy. *Laboratoř syntetické nanochemie, Ústav organické chemie a biochemie* [online]. Praha, 2014, **108** (4), 387 s. [cit. 2016-05-11]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_04_387-393.pdf
- [3] Nanodiamonds – Use and Applications. *Hielscher – Ultrasound Technology* [online]. 2013 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <https://www.hielscher.com/ultrasonic-synthesis-of-nanodiamonds.htm>
- [4] Nanodiamonds: Detonation Synthesis Nanodiamonds: A unique engineering material. In: *Nano Materials & Processes* [online]. Nano Materials & Processes, Inc. (“NMPI”), 2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.nanompi.com/nanodiamonds.php>
- [5] NAIS DENTAL POLISHERS. Synthetic diamonds. *Diamond Abrasives and Mineral Polishers* [online]. 2014 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://diamondabrasives.eu/synthetic-diamonds/>
- [6] RECKOVÁ, Helena. S nanodiamanty do boje proti rakovině. In: *VTM* [online]. 2014 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/aktuality/s-nanodiamanty-do-boje-proti-rakovine>
- [7] RED’KIN, V. E. Lubricants with Ultradisperse Diamond–Graphite Powder. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* [online]. 2004, **40**(3), 164-170 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1023/B:CAFO.0000031898.30405.2a. ISSN 0009-3092. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/B:CAFO.0000031898.30405.2a>
- [8] DOLMATOV, V. Yu. Detonation nanodiamonds in oils and lubricants. *Journal of Superhard Materials* [online]. 2010, **32**(1), 14-20 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.3103/S1063457610010028. ISSN 1063-4576. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.3103/S1063457610010028>
- [9] VYMETÁLEK, Jan a Michal STEJSKAL. Nanočástice jako ekologicky akceptovatelné mazivostní přísady? In: *APROCHEM 2007*: 16. Konference Chemické Technologie, Materiály, Petrochemie, Polymery, Ropa, Legislativa, Prostředí, Bezpečnost. [cit. 2016-05-11] Svazek 2. Milovy - Sněžné n. M., 2007, s. 1397-1404. ISBN 8002018923. Dostupné z: http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2007_161.pdf
- [10] XU, Xiangyang, Zhiming YU, Yongwei ZHU a Baichun WANG. Influence of surface modification adopting thermal treatments on dispersion of detonation nanodiamond. *Journal of Solid State Chemistry* [online]. 2005, **178**(3), 688-693 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.jssc.2004.12.025. ISSN 00224596. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022459604006681>

- [11] CHOU, Chau-Chang a Szu-Hsien LEE. Tribological behavior of nanodiamond-dispersed lubricants on carbon steels and aluminum alloy. *Wear* [online]. 2010, **269**(11-12), 757-762 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.001. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004316481000270X>
- [12] PENG, D.X., Y. KANG, R.M. HWANG, S.S. SHYR a Y.P. CHANG. Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin. *Tribology International* [online]. 2009, **42**(6), 911-917 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.12.015. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09000061>
- [13] SHENDEROVA, O., A. VARGAS, S. TURNER, D. M. IVANOV a M. G. IVANOV. Nanodiamond-Based Nanolubricants: Investigation of Friction Surfaces. *Tribology Transactions* [online]. 2014, **57**(6), 1051-1057 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1080/10402004.2014.933933. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2014.933933>
- [14] LEE, Jung-Yeob a Dae-Soon LIM. Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, **188-189**, 534-538 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.102. ISSN 02578972. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897204005535>
- [15] CHOLAKOV, G. St. a et al. Physical stability of detonation nanodiamonds in liquid lubricants. *Bulgarian Chemical Communications* [online]. 2012, **44**(Number 1), 31-40 [cit. 2016-05-17]. ISSN 0324-1130. Dostupné z: http://bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_44_Number_1_2012/Volume_44_Number_1_2012_PDF/BCC-44-1-2012_5.pdf
- [16] IVANOV, M. G., D. M. IVANOV, S. V. PAVLYSHKO, I. PETROV, A. VARGAS, G. MCGUIRE a O. SHENDEROVA. Nanodiamond-Based Nanolubricants. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* [online]. 2012, **20**(4-7), 606-610 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1080/1536383X.2012.657010. ISSN 1536-383x. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1536383X.2012.657010>
- [17] ALI, Mohamed Kamal Ahmed a Hou XIANJUN. Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils. *Nanotechnology Reviews* [online]. 2015-01-1, **4**(4), - [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1515/ntrev-2015-0031. ISSN 2191-9097. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/ntrev.2015.4.issue-4/ntrev-2015-0031/ntrev-2015-0031.xml>
- [18] HOLT, K. B. Diamond at the nanoscale: applications of diamond nanoparticles from cellular biomarkers to quantum computing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2007, **365**(1861), 2845-2861 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1098/rsta.2007.0005. ISSN 1364-503x. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2007.0005>

- [19] SHEN, Mingwu, Jianbin LUO a Shizhu WEN. The Tribological Properties of Oils Added with Diamond Nano-Particles. *Tribology Transactions* [online]. 2001, **44**(3), 494-498 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1080/10402000108982487. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000108982487>
- [20] PADGURSKAS, Juozas, Raimundas RUKUIZA, Igoris PROSYČEVAS a Raimondas KREIVAITIS. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. *Tribology International* [online]. 2013, **60**, 224-232 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.10.024. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X12003490>
- [21] KAO, Mu-Jung a Chil-Ruey LIN. Evaluating the role of spherical titanium oxide nanoparticles in reducing friction between two pieces of cast iron. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2009, **483**(1-2), 456-459 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.07.223. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838808018719>
- [22] TWIST, Christina P., Irene BASSANETTI, Matthew SNOW, et al. Silver-Organic Oil Additive for High-Temperature Applications. *Tribology Letters* [online]. 2013, **52**(2), 261-269 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1007/s11249-013-0211-1. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-013-0211-1>
- [23] QIAO, Yu-lin, Xiao-feng SUN, Bin-shi XU a Shi-ning MA. High temperature tribological behaviors of nano-diamond as oil additive. *Journal of Central South University of Technology* [online]. 2005, **12**(2), 181-185 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1007/s11771-005-0036-7. ISSN 1005-9784. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11771-005-0036-7>

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

6.1 Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>DLC</i>	- metastabilní stav amorfního uhlíku
<i>DND</i>	- detonované nanodiamanty
<i>DS</i>	- diamanty obsahující saze (meziprodukt z nanodiamantové syntézy)
<i>TNT</i>	- trinitrotoluen
<i>RDX</i>	- hexogen
<i>UDP-DG</i>	- ultra rozptýlené diamantové grafitové prášky
<i>UDP-D</i>	- ultra rozptýlené diamantové prášky
<i>PE</i>	- polyester
<i>PAO</i>	- oleje na bázi polyalfaolefinů
<i>PTFE</i>	- ultra rozptýlené polytetrafluorethylenové částice
<i>MoDDP</i>	- organická molybdenová přísada - molybden alkyl dithiofosfát
<i>HRC</i>	- tvrdost
<i>Ra</i> [μm]	- drsnost povrchu
<i>ot</i>	- otáčky
<i>rms</i> [μm]	- střední kvadratická hodnota drsnosti
<i>hm</i>	- hmotnostní

7 SEZNAM OBRÁZKŮ**7**

Obr. 1 Struktura nanodiamantu [18]	14
Obr. 2 Nanodiamanty nalezené ve vzorku meteoritu [1]	14
Obr. 3 Schéma vrstev nanodiamantů s léky [6]	16
Obr. 4 Nanodiamanty syntetizované ultrazvukovou kavitací [3]	17
Obr. 5 Výbušniny TNT a RXD jsou zdrojem uhlíku pro růst nanodiamantů [1]	17
Obr. 6 Výroba DND detonační technikou [1]	18
Obr. 7 Mechanismy způsobené přítomností nanodiamantů [17]	19
Obr. 8 Shluky a nerovnoměrnosti DND [10]	21
Obr. 9 Změna zeta potenciálu vzorku DND [10]	22
Obr. 10 Disperzní chování vzorku DND ve vodném prostředí [10]	22
Obr. 11 Disperzní chování vzorku DND v nevodném prostředí [10]	23
Obr. 12 Závislost velikosti opotřebení na koncentraci DND [11]	25
Obr. 13 Hodnoty tvrdosti ocelí v závislosti na koncentraci DND [11]	25
Obr. 14 Vliv DND v oleji na tvrdost povrchu oceli [11]	26
Obr. 15 Změna povrchové tvrdosti hliníkové slitiny při použití oleje s DND [11]	26
Obr. 16 Zařízení SMT-1 [13]	27
Obr. 17 Čtyř-kuličkový test [13]	27
Obr. 18 Zařízení UMT-3 [13]	28
Obr. 19 Hodnoty koeficientu tření v závislosti na čase při použití oleje s DND [13]	29
Obr. 20 Drsnost povrchu při použití čistého oleje [13]	29
Obr. 21 Drsnost povrchu při použití oleje s DND [13]	30
Obr. 22 Schéma zařízení sloužící k zjištění vlivu DND na vlastnosti kapalného parafínu [12]	31
Obr. 23 Závislost velikosti opotřebení na koncentraci nanočástic v kapalném parafínu [12]	31
Obr. 24 Změny koeficientu tření v závislosti na čase při použití parafínu s příměsí nanočástic [12]	32
Obr. 25 Velikost opotřebení v závislosti na velikosti působícího tlaku při použití parafínu s příměsí nanočástic [12]	33
Obr. 26 Velikost opotřebení v závislosti na typu použitých nanočástic [20]	34

8 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Typy stabilizátorů používané pro motorové a převodové oleje [15]	24
Tab. 2 Procentuální stabilita při použití různých typů stabilizátorů po uplynutí několika dní [15]	24
Tab. 3 Hodnoty koeficientu tření v závislosti na koncentraci DND [11].	26
Tab. 4 Hodnoty koeficientu tření a velikosti opotřebení pro PAO s různými přísadami [13]	28
Tab. 5 Hodnoty drsnosti povrchu součástí při použití čistého oleje a oleje s DND [13]	29