

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2013/65



## ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

## A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

## 1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

<b>Šifra projekta</b>	J2-2115
<b>Naslov projekta</b>	Uporaba nanodelcev kot aditivov v mazivih in tornih materialih
<b>Vodja projekta</b>	14556 Mitjan Kalin
<b>Tip projekta</b>	J Temeljni projekt
<b>Obseg raziskovalnih ur</b>	4650
<b>Cenovni razred</b>	B
<b>Trajanje projekta</b>	05.2009 - 04.2012
<b>Nosilna raziskovalna organizacija</b>	782 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
<b>Raziskovalne organizacije - soizvajalke</b>	106 Institut "Jožef Stefan"
<b>Raziskovalno področje po šifrantu ARRS</b>	2 TEHNIKA 2.11 Konstruiranje 2.11.03 Specialna razvojna znanja
<b>Družbeno-ekonomski cilj</b>	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija

2. Raziskovalno področje po šifrantu FOS<sup>1</sup>

<b>Šifra</b>	2.03
<b>- Veda</b>	2 Tehniške in tehnološke vede
<b>- Področje</b>	2.03 Mehanika

## B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Povzetek raziskovalnega projekta<sup>2</sup>

SLO

V projektu smo sistematično analizirali in pojasnili temeljne tribološke mehanizme mejnega mazanja z MoS<sub>2</sub> nanocevkami ter določiti parametre, ki nanj vplivajo, ter kako. Te ugotovitve smo v Laboratoriju za tribologijo in površinsko nanotehnologijo določili v sodelovanju z Odsekom za fiziko trdne snovi na Inštitutu Jožef Stefan, kjer so nanodelce sintetizirali in

okarakterizirali ter določili njihove fizikalne in kemijske lastnosti. Na osnovi teh rezultatov smo pridobili ustrezno temeljno znanje o mehanizmih in lastnostih nanodelcev in mejnega mazanja, s čimer bo možno formulirati olje z aditivi na osnovi nanodelcev, ki bo zaradi fizikalnega principa mazanja neodvisno od tribokemijskih interakcij s površinami (jeklo ali DLC prevleke). Zato bo možno doseči ustrezno mazanje tudi z inertnimi površinami (DLC prevlekami), hkrati pa ne bo povečevalo okoljske obremenitve (emisij). Kot prvi v svetovnem merilu smo pokazali, da je z uporabo nanodelcev v olju možno doseči učinkovito mazanje površin, prevlečenih z DLC prevlekami. Ovrednotili pa smo tudi vpliv hrapavosti površin ter utekanja na tribološke lastnosti nanodelcev in njihove mehanizme mazanja, ki namesto na do sedaj uporabljanem kemijskem, temeljijo na fizikalnem principu mazanja. Uporabljen fizikalni princip mazanja z nanodelci je povsem inovativen in nov pri mazanju z oljem, še posebej kemijsko inertnih površin. Omogočil bo skokovit napredek na področju mazanja površinskih zaščitnih prevlek ter preprečil porast trenja in obrabe (izgube energije, povečano vzdrževanje) zaradi opuščanja uspešnih, a okolju in avtomobilskim katalizatorjem škodljivih aditivov na osnovi S, P in Zn.

ANG

In the framework of the project, we have systematically studied and explained the fundamental tribological mechanism of the boundary lubrication with MoS<sub>2</sub> nanotubes and defined the parameters that (and how) affect it. We performed this study in the Laboratory for Tribology and Surface Nanotechnology in collaboration with the Condensed Matter Physics department at Jožef Stefan Institute, where the nanoparticles have been synthesized and characterized and their physical and chemical properties determined. Based on these results we obtained the necessary understanding of the boundary lubrication mechanisms and the properties of the selected nanoparticles. This enables the formulation of the lubricant with the nanoparticle-based additives that will be - because of the physical-based lubrication concept – broadly independent of the tribochemical interactions with the surfaces (steel or diamond like carbon, i.e. DLC coating). This will thus enable a successful lubrication of “inert” surfaces (DLC coatings) and at the same time it will not increase the negative environmental impact (emissions). We have also evaluated the influence of the surface roughness and running-in on the tribological properties of the nanoparticles and their lubrication mechanisms, which are based on a physically based lubrication concept instead of a chemically based concept that was used so far. The concept based on the physically based lubrication with the nanoparticles is innovative and novel for the oil lubrication, in particular for the lubrication of chemically inert surfaces. This will enable a step-change in the boundary lubrication of inert surface coatings, such as DLC, and prevent the increase in the friction and wear (energy loss, increased maintenance) due to the abandoning of the otherwise successful chemically based additives, which are, however, based on S, P, and Zn and therefore polluting and dangerous for the environment and catalysts systems.

#### 4. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu<sup>3</sup>

Svetovni trendi pri zniževanju trenja in obrabe potekajo v več smereh, npr. razvoj boljših mazalnih aditivov, razvoj površinskih prevlek, večplastne in “pametne” nano-strukturirane prevleke, prilegajoče (kameleon) površine, teksturiranje površin, idr. Močan trend razvoja, s katerim se tudi sami ukvarjamo že več let je na področju uporabe nizko-strižnih trdih prevlek na osnovi diamantu-podobnega ogljika (diamond-like carbon - DLC) v pogojih mejnega mazanja. V zadnjih letih se uporaba DLC prevlek izrazito povečuje in velja prepričanje, da so ena najbolj perspektivnih površinskih prevlek za uporabo v mehanskih sistemih. DLC prevleke so značilne po veliki trdoti, nizkem trenju, dobrih protiobrabnih lastnostih in inertnosti (nizka površinska energija). Prav inertnost, ki je z vidika oksidacije, korozije in preprečevanja adhezije v kontaktih zaželena, pa povzroča velike težave pri uspešnem mejnem mazanju DLC prevlek, kjer imajo tribokemijske reakcije z aditivi in ostalimi produkti odločilno vlogo, zato so DLC prevleke zelo omejene za tvorjenje interakcij s klasičnimi aditivi in mazivi. Področje teh raziskav je še zelo novo, naša skupina pa je vodilna v svetovnem merilu, saj smo s tega področja objavili večino znanstvenih publikacij in kot prvi dokazali nekatere oblike interakcij DLC prevlek.

Za izboljšanje in optimizacijo teh kontaktov je potrebno izboljšati tudi stanje razvoja na področju samih aditivov. Izkazalo se je namreč, da nekatere DLC prevleke lahko (omejeno) tvorijo tribokemijske filme, vendar so bili ti pozitivni rezultati doseženi z močnimi EP aditivi, ki

vsebujejo S, P in Zn kot ključne reaktivne elemente današnjih najuspešnejših aditivov. Prav to pa predstavlja veliko oviro za nadaljnji razvoj in zaščito DLC prevlek ter tudi vseh ostalih inženirskih površin, saj so omenjeni aditivi zelo problematični s stališča vpliva na okolje. Trenutno so namreč največje težave pri razvoju aditivov in maziv prav velike emisije v obliki toplogrednih plinov in delcev, ki škodijo okolju. Poleg tega nekateri elementi, kot so S in P izrazito poškodujejo katalizatorje v avtomobilih in tovornjakih, ki pa so nujni zaradi zmanjševanja emisij. Zaradi tega bo potrebno te ključne elemente aditivov na zahtevo zakonodaje opustiti. Brez novih rešitev bi to privedlo do pomembnega povečanja obrabe in trenja komponent, saj primernega nadomestila za te aditive še nimamo.

Večina rešitev mejnega mazanja poteka torej v smeri tribokemijske aktivacije aditivov, ki v trenutku »kritičnega« dotika vršičkov gibajočih se površin kemijsko reagirajo s površino in tvorijo zaščitni tribokemijski mejni film. Ena izmed alternativnih rešitev, ki je sama po sebi inovativna in nova, saj se do danes še ni uspešno uvedla in potrdila v uporabi, pa je uporaba nanodelcev v mazivih. V tem primeru aditivi niso tekoči, temveč trdni delci, mehanizem njihovega delovanja pa ne temelji na kemijskih reakcijah, temveč naj bi primarno temeljil na osnovi fizikalnih mehanizmov nizko-strižnih plasti in drugih fizikalnih mehanizmov, ki pa so še predmet raziskav. Namreč, nanocevice, nanožičke in fulerenom-podobne strukture na osnovi  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  ali ogljika so v začetnem obdobju razvoja prikazale zelo perspektivne lastnosti pri zniževanju trenja na nanonivoju. Tudi sicer so ti materiali kot makro-strukture poznani, da znižujejo trenje v klasičnih mazalnih sistemih kot trda maziva. Predvsem zaradi makroskopske velikosti se taki aditivi doslej niso mogli uspešno uporabljati v tekočih mazivih. Njihov razvoj v obliki nanodelcev pa odpira povsem nove inovativne možnosti in nove rešitve:

(1) Problem povečanega trenja in obrabe (poraba energije, povečano vzdrževanje), ki se bo pojavil z ukinitvijo (ali zgolj zmanjševanjem) aditivov na osnovi S, P in Zn zaradi zahtev zakonodaje (trenutno ustrezne zamenjave za te aditive še ni) bi z uporabo nanodelcev kot aditivov v oljih lahko preprečili.

(2) Na sodobnih nekovinskih prevlekah, kot so DLC in druge, ki pa so kemijsko veliko bolj inertne od kovin, bi lahko dosegli uspešno mejno mazanje brez, doslej nujnih, tribokemijskih reakcij. Zaradi dejstva, da imajo te prevleke manjšo površinsko energijo od kovin pa je tudi jasno, da z uporabo obstoječih mehanizmov mazanja (tribokemijsko delovanje aditivov) ne bo učinkovitost takega mazanja nikoli enakovredna kot s kovinami.

To so bili tudi glavni cilji oz. hipoteze tega projekta, pri čemer pa je potrebno omeniti, da ob uspešni implementaciji nanodelcev v maziva zaradi fizikalnega principa delovanja nizko-strižne plasti plastovitih kristalov in/ali drugih fizikalnih učinkov nanodelcev (namesto tribokemijskih reakcij s klasičnimi aditivi) mazivo z nanodelci ne bo povzročalo emisij toplogrednih plinov! Z zamenjavo obstoječih kemijsko-aktiviranih aditivov bi se torej zmanjšale okoljske obremenitve.

V projektu smo sistematično analizirali in pojasnili temeljne tribološke mehanizme mejnega mazanja z  $\text{MoS}_2$  nanocevkami, ter določiti parametre, ki nanj vplivajo. Te ugotovitve bomo v Laboratoriju za tribologijo in površinsko nanotehnologijo (L-TINT) določili v sodelovanju z Odsekom za fiziko trdne snovi na IJS, kjer so sintetizirali (v povezavi s podjetjem Nanotul, d.o.o., Ljubljana) in karakterizirali te nanodelce in določili njihove fizikalne in kemijske lastnosti. Pridobili smo ustrezno temeljno znanje o mehanizmih in lastnostih nanodelcev in mejnega mazanja, kar omogoča formuliranje olja z aditivi na osnovi nanodelcev, ki bo neodvisno od tribokemijskih interakcij s površinami (jeklo ali DLC prevleke), hkrati pa ne bo povečevalo okoljske obremenitve (emisij). Za primerjavo smo uporabili tudi analize v nemazanih (»suhih«) triboloških pogojih, za kar smo nanodelce vključili v polimerno matrico in izdelali »samomazalne« polimerne kompozite, kjer so nekateri nanodelci pokazali dobre tribološke rezultate, o katerih poročajo v literaturi.

V prvi fazi programa so bili sintetizirani nanomateriali v obliki končne  $\text{MoS}_2$  spojine. V začetni

fazi raziskav smo tudi potrdili ugodne tribološke lastnosti teh MoS<sub>2</sub> nanocevk na nano nivoju z mikroskopom na atomsko silo, tako na zraku, kjer imajo vpliv na površino adsorbirane vodne in druge atmosfere molekule, kot tudi v vakuumu, kjer vpliva teh molekul ni – te raziskave so bile zajete v dveh diplomskih nalogah in predstavljene v nekaj prispevkih na slovenskih in mednarodnih konferencah.

V nadaljevanju raziskav smo na makro-nivoju nanodelce mešali v olje. Da smo izločili vpliv viskoznosti, polarnosti in nasičenosti molekul v olju ter tako zagotoviti zgolj mazalni učinek nanodelcev, smo izbrali eno samo komercialno dostopno bazno olje, ki je primerno za potencialne aplikacije. Glede na to, da avtomobilska industrija prva zahteva spremembo olj za zmanjšanje emisij, smo izbrali eno izmed teh tipičnih olj, torej polyalfaolefin (PAO). Kot podlago za makro-tribološke preizkuse smo izbrali široko uporabljen in klasičen ter obrabno obstojen material, to je jeklo. Služilo nam bo kot dobra referenca za ostale potencialne materiale in številne aplikacije. Izbrali smo tribološko primerno jeklo z veliko trdoto, npr. DIN 100Cr6, ki se pogosto uporablja v praksi in znanstveni literaturi.

Tribološke analize na makro nivoju smo v večjem delu izvajali v mazanih pogojih z uporabo nanodelcev v baznem olju. Pri tem pa smo v tej fazi projekta tribološke analize razširili še z uporabo diamantu-podobnih (DLC) prevlek za izbiro materiala drsnih parov. DLC prevleke so ene izmed najbolj obetajočih površinskih prevlek, vendar pa so zelo inertne, zato z uporabo obstoječih mehanizmov mazanja (tribokemijsko delovanje aditivov) učinkovitost takega mazanja ne bo nikoli enakovredna kot pri kovinah. Pri nanodelcih pa gre za fizikalni koncept mazanja na osnovi fizikalno adsorbiranih nanofilmov in je zato ta koncept potencialna rešitev problema mazanja teh sodobnih materialov.

Študijo smo razširili tudi glede režima mazanja, in sicer na hidrodinamični ter mešani režim mazanja, tako na jeklu kot na DLC prevlekah, v obeh primerih tudi v primerjavi s samim baznim oljem. To nam je pomagalo razumeti mehanizem mazanja z nanodelci na različnih materialih z različno dovzetnostjo za formacijo tribofilmov. Na režim mazanja vplivali tudi preko topografije. Izbrali smo namreč tudi 2 različni hrapavosti površine, kar poleg vpliva na režim mazanja omogoča tudi študijo vpliva oblike površine na mazanje z delci. Pri fizikalnem konceptu mazanja ima namreč oblika površine pomembnejšo vlogo kot pri tribokemijskem.

Tribološke teste smo izvajali na dveh preizkuševališčih. Prvo preizkuševališče je bilo standardno preizkuševališče kroglica-disk, kjer smo zaradi majhne količine potrebnega maziva lahko preizkušali različne materialne vrste in oblike nanodelcev, da smo MoS<sub>2</sub> nanocevke primerjali še z drugimi delci, in sicer z nekaterimi komercialno dostopnimi delci ter z nekaterimi, ki smo jih pridobili od tujih partnerjev (Weizmann inštitut, Izrael). Drugo preizkuševališče, naprava MTM, pa nam je omogočilo sestavo kompleksnejših preizkusov, s čimer smo dobili tribometrične podatke v vseh režimih mazanja, poleg tega pa smo lahko ovrednotili tudi vpliv utekanja. Ta naprava nam je z modulom za ex-situ optično interferometrijo omogočila tudi opazovanje tribofilmov v različnih fazah preizkušanja, s čimer smo pridobili razumevanje o mehanizmih mazanja z nanodelci, tako na jeklu kot na DLC površinah.

Opravili smo tudi topografske, kemijske in strukturne analize tribofilma, obrabljenih površin, obrabnih delcev ter nanodelcev. Z meritvami obrabe smo ovrednotili protiobrabni učinek nanodelcev, z elektronskim mikroskopom smo preučili morfologijo tribofilmov, njihovo kemijsko sestavo pa okarakterizirali z metodami EDS, XPS in AES, pri čemer smo sodelovali tudi z nekaterimi zunanjimi izvajalci (IJS). Kemijske analize so nam omogočile razumevanje kemijske sestave površinskih filmov, s čimer smo dobili pomembne informacije o formiranju teh filmov ter o mehanizmih mazanja z nanodelci.

Nekateri najpomembnejši rezultati naših raziskav so naslednji:

(1) Uporaba nanodelcev v olju bistveno zniža tako koeficient trenja kot tudi obrabo v primerjavi s

samim baznim oljem, pri čemer je ta učinek največji v režimu mejnega mazanja. To smo za MoS<sub>2</sub> nanocevke pokazali prvi v svetovnem merilu.

(2) MoS<sub>2</sub> nanocevke v primerjavi s podobnimi nanodelci drugačne kemijske sestave v večji meri znižajo trenje in obrabo in so zato izmed primerljivih nanodelcev najprimernejši za dodajanje oljem.

(3) Kot prvi v svetovnem merilu smo pokazali, da je z uporabo nanodelcev v olju možno učinkovito mazanje relativno nereaktivnih površin, kot so prevleke na osnovi diamantu-podobnega ogljika (DLC).

(4) Pridobili smo znanje o mehanizmih mazanja z nanodelci in pokazali, da gre pri takšnem mazanju za fizikalne in ne kemijske učinke nanodelcev. Pokazali smo, da so ti mehanizmi mazanja podobni za klasične materiale (jeklo) in sodobnejše, manj reaktivne materiale (DLC).

(5) Pokazali smo, da mehanizmi mazanja temeljijo na stiskanju, deformiranju, drobljenju in eksfoliaciji nanodelcev v kontaktu, s čimer se formira tribološki film na površinah. Le-ta je ključnega pomena za zniževanje trenja in obrabe in pokazali smo, da je prisoten pri različnih pogojih preizkušanja.

(6) Ovrednotili smo vpliv površinske obdelave na učinke nanodelcev pri mazanju in izpostavili določene razlike, ki se v tem pogledu pojavijo med mazanjem jeklenih oz. DLC površin.

(7) Razčlenili smo tudi vpliv utekanja površin na mazanje z nanodelci, kjer smo pokazali, da olje z dodanimi nanodelci tudi po utekanju zagotavlja učinkovito mazanje, pri čemer se zopet pojavijo nekatere razlike med jeklenimi in DLC površinami.

S tem smo povsem izpolnili zastavljene cilje ter potrdili raziskovalne hipoteze. Svoje ugotovitve in rezultate pa smo predstavili v več mednarodno priznanih znanstvenih publikacijah ter v obliki prispevkov na številnih konferencah.

#### **5. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev<sup>4</sup>**

V skladu s programom projekta so se zaključile vse ključne faze dela, in sicer smo, poleg sinteze nanodelcev, določili vplivne parametre, izbrali bazna maziva, materiale podlage in določili testne pogoje. Vseh izbrane materiale (nanodelce, podlage, oljne mešanice) smo tudi okarakterizirali. Opravili smo veliko število triboloških testov, na podlagi katerih smo s uporabo naprednih analitskih tehnik določili dejanske mazalne mehanizme. Pri tem smo uporabljali sodobne mikroskopske tehnike, ter metode za kemijsko analizo, tudi v sodelovanju s tujimi partnerji. V skladu s tem in s poročilom o realizaciji programa raziskovalnega projekta v 4. točki tega poročila lahko sklenemo, da je bilo delo končano v okviru z zadanimi časovnimi smernicami predlaganega projekta. V okviru projekta smo potrdili raziskovalne hipoteze in prišli do nekaterih pomembnih ugotovitev in zaključkov (navedenih v 4. točki tega poročila), do mnogih tudi kot prvi v svetovnem merilu. V okviru rezultatov projekta je nastalo tudi več objav v priznanih znanstvenih revijah ter številni prispevki na domačih in mednarodnih konferencah. Zaradi aktualnosti in inovativnosti rezultatov so v načrtu tudi nadaljnji prispevki na mednarodnih konferencah, pa tudi dodatne znanstveni članki so že v pripravi, s čimer bomo predstavili celovit sklop rezultatov, torej tudi ugotovitve iz zadnjih faz projekta.

#### **6. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine<sup>5</sup>**

Morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta ni.

Sestava projektne skupine se je v letu 2011 spremenila in sicer je bilo potrebno zamenjati dva raziskovalca, saj je delo na projektu pokazalo, da so potrebna nova znanja na področju mejnih plasti ter prenosa toplote in snovi v teh sistemih. En raziskovalec pa je bil brisan, ker mu je prenehalo delovo razmerje.

## 7. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine<sup>6</sup>

Znanstveni dosežek		
1.	COBISS ID	12245787
		Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Mehanizmi in izboljšave tornih in obrabnih lastnosti MoS2 nanocevk kot potencialnih aditivov oljem
	ANG	Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS <sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives
Opis	SLO	Različni tipi nanodelcev so bili eksperimentalno preučevani kot mazalna sredstva in rezultati so pokazali, da je to obetajoč koncept mazanja. Vendar pa do sedaj MoS2 nanocevke v tem pogledu še niso bile eksperimentalno vrednotene. Zato smo se v tej študiji osredotočili na tribološke lastnosti več-stenskih MoS2 nanocevk kot potencialnih aditivov mazalnemu oljem. Preizkusi so bili opravljeni v režimu mejnega mazanja pri kontaktnem tlaku 1 GPa (Hertzov, maksimalen) in drsni hitrosti 0,005 m/s z uporabo kroglica-disk tribometra. Rezultate smo primerjali z referenčnim baznim oljem in pokazali, da MoS2 nanocevke bistveno znižajo trenje in obrabo v primerjavi z baznim mazivom. Trenje je bilo več kot 2-krat nižje, obraba pa se je znižala celo za 5-9-krat. Predstavili smo več triboloških mehanizmov in učinkov zaradi prisotnosti MoS2 nanocevk. Ugotovili smo, da se na površini tvori proti-obrabni in nizko-strižni film. Ta tribofilm se formira (i) ali preko adhezije tankih MoS2 nano-lusk na površino, pri čemer se te luske na površino nalagajo preko enega izmed štirih možnih pod-mehanizmov, predlaganih v tem delu; ali (ii) preko stiskanja in deformiranja skupkov nanocevk, kar ima za posledico debelejši mejni mazalni film. V nasprotju s kotaljenjem nanocevk, za katerega smatramo, da ni verjetno, smo ugotovili, da sta razslojevanje in deformiranje nanocevk prevladujoča učinka teh delcev v režimu mejnega mazanja.
	ANG	Several types of nanoparticles have been experimentally investigated as possible lubrication agents and the results suggest that this is a promising idea. However, so far, MoS <sub>2</sub> nanotubes have not been experimentally evaluated in this respect. Accordingly, this study is focused on the tribological behavior of MoS <sub>2</sub> multi-wall nanotubes (MWNTs) as a potential additive in lubricating oils. The experiments were performed in the boundary-lubrication regime under a contact pressure of 1 GPa (Hertz, max) and a sliding velocity of 0.005 m/s using a ball-on-disc tribotester. The results were compared to a reference base oil, and it was found that MoS <sub>2</sub> nanotubes significantly decreased the friction and wear compared to the base lubricant. The friction was more than 2-times lower and the wear as much as 5-9-times lower. Several tribological mechanisms and effects due to the MoS <sub>2</sub> nanotubes are presented. It was established that a wear-protective and low-shear film was forming on the surface. This tribofilm was formed either by (i) the adhesion of thin MoS <sub>2</sub> nano-sheets on the surface, where these sheets were deposited on the surface by one of the four possible sub-mechanisms proposed in this work; or by (ii) the compaction and deformation of nanotube aggregates, which resulted in a thicker boundary film. Thus, in contrast to the rolling of the nanotubes, which we do not consider to be plausible, the exfoliation and deformation of the nanotubes were found to be the prevalent effects for the nanotubes in the boundary-lubrication regime.
Objavljeno v		Elsevier; Wear; 2012; Vol. 280/281, iss. [4]; str. 36-45; Impact Factor: 1.872; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056;

		A': 1; Avtorji / Authors: Kalin Mitjan, Kogovšek Janez, Remškar Maja	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
2.	COBISS ID	12730139	Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO	Vpliv hrapavosti površin in utekanja na mazanje jeklenih površin z oljem z dodanimi MoS2 nanocevkami v vseh režimih mazanja
		ANG	Influence of surface roughness and running-in on the lubrication of steel surfaces with oil containing MoS [sub] 2 nanotubes in all lubrication regimes.
	Opis	SLO	Čeprav so nekatere študije izpostavile ugodne učinke mazanja z MoS2 in WS2 nanodelci, še vedno manjka razumevanje, kako se ti nanodelci obnašajo pri različnih kontaktnih pogojih, celo najbolj običajnih, kot je hrapavost površin. Zato smo se osredotočili na primerjavo učinkov mazanja MoS2 nanocevk, dodanih PAO olju, na jeklenih površinah različnih hrapavosti. Preučevali smo mazanje jeklenih površin z uporabo MoS2 nanocevk v vseh režimih mazanja in tudi z upoštevanjem utekanja. Pokazali smo, da je bilo trenje ob uporabi olja z nanocevkami pri različnih kontaktnih pogojih za 40-65 % nižje kot ob uporabi samega baznega olja. Nadalje smo pokazali, da je z dodatkom MoS2 nanocevk olju trenje enako za gladke in hrapave jeklene površine, kar pomeni, da nanocevke v tem pogledu v celoti določajo tribološko obnašanje jeklenih kontaktov v mejnem in mešanem režimu mazanja, ne glede na hrapavost površin ali utekanje le-teh.
		ANG	Despite several studies that have confirmed the beneficial effect of MoS2 and WS2 nanoparticle-assisted lubrication, an understanding of how the nanoparticles behave in different, even very common contact conditions, such as roughness, is still missing. As a result we have focused on a comparison of the lubrication behaviour of MoS2 nanotubes mixed with PAO oil using steel surfaces with different roughnesses. Moreover, we have investigated the MoS2-nanotubes-assisted lubrication of steel/steel contacts in all lubrication regimes and also the effect of the running-in of these contacts. It was realized that the friction with the nanotubes-containing oil was 40-65 % lower compared to the base oil, depending on the different contact conditions used. Furthermore, we showed that by using MoS2 nanotubes in the oil the friction is the same for rough and smooth steel surfaces, meaning that the nanotubes completely govern the lubrication behaviour in self-mated steel contacts in the boundary- and mixed-lubrication regimes, irrespective of the surface roughness or the running-in.
	Objavljeno v	Tribol. int.. [Print ed.], 2013, vol. 61, str. 40-47, ilustr., doi: 10.1016/j.triboint.2012.12.003. Impact Factor: 1.553; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
3.	COBISS ID	12491035	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Načrtovanje lastnosti kontaktnih površin za učinkovito in zeleno mazanje DLC prevlek
		ANG	Designing tribological interface for efficient and green DLC lubrication
	Opis	SLO	DLC prevleke so prevleke z nizkim trenjem in obrabo in kot take same po sebi zagotavljajo nekatere lastnosti, ki so lahko ugodne za potrebe zelenega mazanja, ali pa ga celo omogočajo. Še posebej lahko njihove dobre proti-obrajne lastnosti predstavljajo potencial za drugačno, manj škodljivo in bolj okolju prilagojeno mazanje v primerjavi s konvencionalnimi materiali. Te prevleke lahko zato predstavljajo privlačen način za zasnovo novih zelenih tehnologij v različnih mehanskih sistemih. V tem delu predstavljamo nekaj izmed možnih strategij za zasnovo zelenega mazanja, pri čemer se osredotočamo le na koncepte, ki so primerni za in mogoči

		zaradi specifičnih lastnosti DLC prevlek. Te strategije lahko vključujejo pristope s prevladujočimi kemijskimi interakcijami, tehnologije mazanja, temelječe na fizikalnih principih, ali na kombinaciji obeh, torej fizikalno-kemijskih lastnostih.
	ANG	DLC coatings are low friction and low wear coatings and thus inherently possess some of the characteristics that may be beneficial or even enable green lubrication requirements. In particular, their low wear behavior may represent a potential for different, less harmful and more environmentally adapted lubrication compared to conventional materials, which may become an attractive approach for novel green technologies in various mechanical systems. In this work, we present some of several possible strategies for designing green lubrication, focusing only on concepts that are well-suited and enabled in a combination with specific properties of DLC coatings. These may include approaches through predominantly chemical-based interactions, physical-based lubrication technologies, and a combination of both, i.e. physical-chemical properties.
Objavljeno v		Japanese Society of Tribologists; Tribology online; 2012; Vol. 7, no. 3; str. 112-118; Avtorji / Authors: Kalin Mitjan Impact Factor: 0.009; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056 (2011)
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	9999999 Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO Nanodelci kot novi aditivi v zeleni, na fizikalnem principu temelječi tehnologiji mazanja DLC prevlek
		ANG Nanoparticles as novel lubricating additives in a green, physically based lubrication technology for DLC coatings
	Opis	SLO Preveleke iz diamantu-podobnega ogljika (DLC) zagotavljajo nizko trenje in obrabo v najbolj zahtevnih triboloških kontaktih. Vendar pa je njihova reaktivnost z aditivi relativno nizka in jo je težko optimirati. Poleg tega bo v bližnji prihodnosti zaradi okoljskih razlogov potrebno opustiti tudi delno učinkovite aditive, ki vsebujejo visoko stopnjo SAPS (žveplov pepel, fosfor, žveplo). Na osnovi nedavnih napredkov v nanotehnologiji anorganskih MoS2 in WS2 nanodelcev, ki zagotavljajo mazanje na podlagi nizko-strižnih plasti, predlagamo za slabo reaktivne DLC prevleke potencialno zamenjavo trenutnega kemijsko zasnovanega mazanja z uporabo nove tehnologije fizikalno-delujočih aditivov. Z uporabo MoS2 nanocevk v baznem olju pri mazanju DLC-prevlečenih kontaktov smo predstavili 30% znižanje trenja v primerjavi z jeklenimi površinami ter 50% znižanje trenja v primerjavi s samim baznim oljem. Takšna tehnologija mazanja, temelječa na fizikalnih učinkih, predstavlja inovativno rešitev za visoko učinkovite, a nereaktivne površine in sočasno zagotavlja zeleno, okolju prijazno mazanje.
		ANG Diamond-like carbon (DLC) coatings provide low friction and wear in the most demanding tribological contacts. However, their chemical reactivity with oil additives is poor and difficult to optimise. Moreover, even the partially effective, but high-SAPS (sulphuric ash, phosphor, sulphur) additives, will be phased out in the near future for environmental reasons. Based on recent advancements in the nanotechnology of inorganic MoS2 and WS2 nanoparticles, which lubricate through the low shear of basal planes, we propose a potential replacement of the current chemical-based lubrication with this novel, physical-based additive lubrication technology for poorly reactive DLC coatings. In our work, 30 % less friction compared to steel surfaces and 50 % less friction compared to the base oil was achieved by employing MoS2 nanotubes in the base oil in self-mated DLC contacts. This physical-based lubrication technology represents an innovative solution for highly effective but non-reactive surfaces and simultaneously provides green-lubrication performance.
		Wear; 2013, Impact Factor: 1.872; Srednja vrednost revije / Medium



	Objavljeno v	Category Impact Factor: 1.056. Sprejeto v objavo.	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	99999999	Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO	Mazanje z DLC prevlekami prevlečenih površin z uporabo MoS2 nanocev v vseh režimih mazanja: vpliv hrapavosti površin in utekanja
		ANG	Lubrication of DLC-coated surfaces with MoS2 nanotubes in all lubrication regimes: surface roughness and running-in effects
	Opis	SLO	<p>MoS2 in WS2 nanodelci na eni strani ter DLC prevleke na drugi so deležni vse večje pozornosti v triboloških aplikacijah. Vendar pa so raziskave, ki vključujejo kombinacijo DLC prevlek in mazanja z uporabo nanodelcev zelo redke in tudi razumevanje takšnih triboloških sistemov ostaja omejeno. V tem delu smo se posvetili takšnemu tribološkemu sistemu s preučevanjem učinkov hrapavosti površin in utekanja na tribološke lastnosti z DLC prevlekami prevlečenih kontaktov v vseh režimih mazanja. Predstavljamo tudi model vpliva hrapavosti površine na mehanizem mazanja MoS2 nanocev. Ta model je osnovan na 2D prikazu dejanskih dimenzijskih razmerij profila površine z upoštevanjem vršičkov površine, nanodelcev in debeline mazalnega filma in je zato neodvisen od kontaktnih materialov.</p> <p>Pokazali smo, da je dodatek nanocev baznemu olju znižal koeficient trenja DLC prevlek za več kot 50 % na gladkih ter do 40 % na hrapavih z DLC prevlekami prevlečenih površinah. Nanodelci so bili najbolj učinkoviti v režimu mejnega mazanja in so imeli zanemarljiv učinek v režimu EHD mazanja. Hrapavost površin je imela znaten in dvojen učinek: medtem, ko je bilo v primerjavi s hrapavimi trenje nižje na gladkih površinah, so hrapave površine med utekanjem v kontaktu nanodelce bolje zadržale.</p>
		ANG	<p>MoS2 and WS2 nanoparticles, on the one hand, and DLC coatings, on the other, are receiving increasing attention for tribological applications. However, investigations that combine DLC coatings and lubrication using nanoparticles are very scarce and the understanding of such tribological systems remains limited. In this work we looked at such a lubrication system by studying the effects of surface roughness and running-in on the behaviour of DLC-coated contacts in all lubrication regimes. We also present a model of how the surface roughness influences the mechanism of lubrication for the MoS2 nanotubes. This model is based on a 2D 1:1 projection scale of dimensions of the surface profile, including its asperities, nanoparticles and film thicknesses, and is thus independent of the contacting materials.</p> <p>It was realized that the addition of the nanotubes to the base oil lowered the coefficient of friction of the DLC by more than 50 % for the smooth, DLC-coated surfaces and up to 40 % for the rough, DLC-coated surfaces. The nanoparticles were the most effective under boundary-lubrication conditions and had a negligible effect in the EHL regime. The surface roughness has a notable and two-fold effect: while the friction was lower on the smooth, compared to the rough, DLC-coated surfaces, the rough surfaces were better able to retain the nanoparticles within the contact during the running-in.</p>
	Objavljeno v	Wear; 2013, Impact Factor: 1.872; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056. Sprejeto v objavo.	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

### 8. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine<sup>7</sup>

Družbeno-ekonomski dosežek
----------------------------

1.	COBISS ID	12109851	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Načrtovanje lastnosti kontaktnih površin za učinkovito in zeleno mazanje DLC prevlek	
	ANG	Designing tribological interface for efficient and green DLC lubrication	
Opis	SLO	DLC prevleke so prevleke, ki zagotavljajo nizko trenje in obrabo in s tem same po sebi zagotavljajo lastnosti, potrebne za zelenega tehnologije mazanja. Še posebej njihove proti-obrabnosti predstavljajo potencial za drugačno, manj škodljivo in bolj okolju prilagojeno, ki predstavljajo privlačen način za zasnovo novih zelenih tehnologij mazanja. V tem delu predstavljamo različnih pristopov, ki jih je možno uporabiti pri načrtovanju učinkovitega zelenega mejnega mazanja DLC prevlek. Ti pristopi lahko temeljijo na: 1. kemijskih interakcijah, 2. fizikalnih interakcijah, 3. kombinaciji fizikalno-kemijskih interakcij.	
	ANG	DLC coatings are low friction and low wear coatings and thus inherently possess some of the green technology properties. In particular, their low wear behavior may represent a potential for different, less harmful and more environmentally adapted lubrication that may become an attractive approach for novel green technologies. In this work, we present few different approaches that are possible for designing DLC interfaces, to achieve effective green boundary lubrication. These may include: 1. chemically-based interactions, 2. physically-based interactions, and 3. a combination of physical-chemical interactions.	
Šifra	B.04 Vabljen predavanje		
Objavljeno v	Japanese Society of Tribologists; Lubricant additive technology for green innovation; 2011; Str. 2-9; Avtorji / Authors: Kalin Mitjan		
Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljen predavanje)		
2.	COBISS ID	11861531	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Tribološki učinki MoS2 nanocevkv v olju	
	ANG	Tribological behaviour of MoS2 nanotubes in oil	
Opis	SLO	Čeprav so bile že z mnogimi vrstami nanodelcev izvedene eksperimentalne študije uporabe delcev kot mazalnih sredstev in je bil ta koncept predstavljen kot zelo obetaven, MoS2 nanocevke v tem pogledu še niso bile eksperimentalno obravnavane. V tej študiji smo se zato osredotočili na tribološke učinke novih MoS2 nanocevkv kot aditivov baznemu sintetičnemu olju. Eksperimentalno delo je bilo izvedeno v režimu mejnega mazanja pri konstantnem kontaktnem tlaku in drsni hitrosti na kroglica-disk tribometru. Rezultate smo primerjali z referenčnim mazivom in pokazali, da ta tip nanodelcev bistveno zniža trenje in obrabo v primerjavi z baznim oljem. Ugotovili smo, da je tanek mazalni film pomemben, čeprav ne nujno edini možni mehanizem, na katerem temeljijo ugodne tribološke lastnosti, dosežene z uporabo nanocevkv.	
	ANG	Despite numerous types of nanoparticles having been experimentally analysed as possible lubrication agents and that this idea has also been proven as a promising concept, MoS2 nanotubes have not yet been experimentally analysed in this respect. This study is focused on tribological behaviour of novel MoS2 nanotubes as additive in base synthetic oil. Experimental work was performed in the boundary lubrication regime under constant pressure and sliding velocity on a ball-on-disc tribotester. The results were compared to a reference lubricant and it was found that this type of nanoparticles significantly decrease friction and wear compared to the base lubricant. It was established that a lubricous thin film is an important, although not the only possible mechanism responsible for its beneficial tribological performance.	

	Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
	Objavljeno v	The Austrian Tribology Society = Österreichische Tribologische Gesellschaft; ECOTRIB 2011; 2011; Str. 911-916; Avtorji / Authors: Kogovšek Janez, Kalin Mitjan, Remškar Maja	
	Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci	
3.	COBISS ID	24823591	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<p><i>SLO</i> Študije koaksialnih MoS2 nanocevk ter smeri njihove uporabe</p> <p><i>ANG</i> Studies of MoS<sub>2</sub> co-axial nanotubes in directions of their applicatios</p>	
	Opis	<p><i>SLO</i> Koaksialne MoS2 nanocevkke so unikatni nanomateriali, ki so predstavljeni v tej študiji. Mehanizem njihove sinteze je prikazan s pomočjo vrstičnega tipalnega mikroskopa, difrakcije rentgenskih žarkov in visoko-ločljivostne preseвне elektronske mikroskopije. Študija se v nadaljevanju osredotoča na potencialne aplikacije teh unikatnih nanocevk. Avtorji so opazovali pojav eksfoliacije teh nano-strukturiranih materilov in ugotovili, da ekfoliacija MoS2 lahko vodi v sintezo mnogih drugih novih materialov, na primer v kombinaciji z organskimi molekulami. Odkrili so, da je pri MoS2 možno izkoristiti pojav fotoluminescence za aplikacije v nano-fotoniki, ta nov material pa je tudi predlagan za zasnovo specifičnih tranzistorjev za uporabo na področju opto-elektronike. Te anorganske nanocevkke so bile preučevane tudi kot osnovni material za elektrode baterij za ponovno polnjenje. MoS2 je poznan tudi kot trdno mazivo, ki je v industriji v uporabi že zadnjih 60 let. Težave z oksidacijo prostih robov in ohranitvijo luskaste strukture v vzporedni orientiranosti glede na površino podlage pa se lahko odpravljajo z zmanjšanjem debeline teh struktur. Zaželeno je dobiti čim tanjše možne luske, kar pa je mogoče doseči z eksfoliacijo koaksialnih MoS2 nanocevk. Ugodni tribološki učinki teh MoS2 nanocevk v različnih sistemih so predstavljeni.</p> <p><i>ANG</i> The co-axial MoS2 nanotubes represent a unique family of nanomaterials and are presented in this study. Growth mechanism is discussed based on atomic probe electron microscopy, X-ray diffraction and high-resolution transmission electron microscopy. This report then focuses on the application potentials of these unique nanotubes. The authors observed exfoliation phenomena of these nano-layered materials and found that the exfoliation of MoS2 can lead to the synthesis of many new materials in combination for example, with organic molecules. It was discovered that MoS2 photoluminescence holds promise for new nanophotonic applications, and the new material was also proposed to design a field-effect transistor, which can be applied in new areas of optoelectronics. These inorganic nanotubes were furthermore studied as host materials for electrodes of rechargeable batteries. MoS2 is also known as a solid lubricant which has been used in the industry for the last 60 years. The problem of edge oxidation and preservation of the flakes in a parallel orientation with the surface with a low degree of restacking can be minimized with the reduction of the thickness. So it is desired to obtain the thinnest flakes possible, which can be achieved by exfoliating MoS2 coaxial nanotubes. The beneficial tribological properties of the MoS2 nanotubes in various systems are also presented.</p>	
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	École Polytechnique Fédérale; Transition metal chalcogenide and halide nanostructures 2011; 2011; Avtorji / Authors: Remškar Maja, Višić Bojana, Jelenc Janez, Iskra Ivan, Češarek Maja, Dominko Robert, Kržan Andrej, Kogovšek Janez, Kalin Mitjan, Pušavec Franci, Kopač Janez	
	Tipologija	1.10 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci (vabljen predavanje)	
4.	COBISS ID	26299943	Vir: COBISS.SI

Naslov	SLO	Vpliv hrapavosti in utekanja jeklenih površin pri mazanju z MoS[spodaj]2 nanocevkami
	ANG	The effect of surface roughness and running-in on the lubrication of steel surfaces with with the use of MoS2 nanotubes
Opis	SLO	Kljub nekaterim študijam, ki so pokazale dobre zmogljivosti maziv z dodatkom MoS2 in WS2 nanodelcev, še vedno manjka natančnejše razumevanje obnašanja teh nanodelcev v različnih, tudi povsem običajnih kontaktnih pogojih, npr. pri različni površinski hrapavosti. V tej študiji smo se zato osredotočili na primerjavo učinkov MoS2 nanocevk, dodanih PAO olju, pri mazanju jeklenih površin z različno hrapavostjo. Preučevali smo zmogljivost mazanja s pomočjo MoS2 nanocevk v kontaktnih jeklo/jeklo v vseh režimih mazanja, poleg tega pa tudi učinek utekanja teh kontaktov. Rezultate smo primerjali s samim baznim oljem in ugotovili, da je bilo trenje ob uporabi maziva z nanodelci 40-65 % nižje kot s samim baznim oljem, odvisno od uporabljenih kontaktnih pogojev. Nadalje smo pokazali, da je bilo trenje ob uporabi MoS2 nanodelcev v mazivu za hrapave in gladke jeklene površine enako, kar pomeni, da nanocevke v preučevanem območju kontaktnih pogojev popolnoma narekujejo obnašanje jeklenih kontaktov v mejnem in mešanem režimu mazanja, ne glede na hrapavost površin ali utekanje le-teh.
	ANG	Although some studies have shown a good performance of lubricants to which MoS2 and WS2 nanoparticles were added, an understanding of the behaviour of the nanoparticles at different, even very common contact conditions, such as surface roughness, is still missing. We have thus performed a comparison of the lubrication behaviour of MoS2 nanotubes mixed with PAO oil using steel surfaces with different roughnesses. We have studied the performance of the MoS2-nanotubes-assisted lubrication of steel/steel contacts in all lubrication regimes and also considered the effect of the running-in. We compared the results with those of the pure base oil and showed that depending on the different contact conditions used the friction with the nanotubes-containing oil was 40-65 % lower compared to using the base oil alone. Furthermore, we showed that when the MoS2 nanotubes were added to the oil the friction was the same for the rough and the smooth steel surfaces. This means that, irrespective of the surface roughness or the running-in, the nanotubes completely govern the lubrication behaviour of the self-mated steel contacts in the studied range of contact conditions of the boundary- and mixed-lubrication regimes.
Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
Objavljeno v	Slovensko društvo za tribologijo = Slovenian Society for Tribology; Zbornik predavanj Posvetovanja o tribologiji, hladilno mazalnih sredstvih in tehnični diagnostiki; 2012; Str. 233-246; Avtorji / Authors: Kogovšek Janez, Remškar Maja, Kalin Mitjan	
Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci	
5. COBISS ID	88888888	Vir: vpis v poročilo
Naslov	SLO	Prof. dr. Mitjan Kalin postal Redni član STLE
	ANG	Prof. dr. Mitjan Kalin elected a Fellow STLE
Opis	SLO	Dr. Kalin je bil izvoljen v naziv Redni član (Fellow) svetovnega združenja tribologov STLE (2012) zaradi izjemnih dosežkov in prispevkov na področju tribologije in tehnologije mazanja. Redni član svetovnega združenja tribologov izkazuje izjemne dosežke na področju izobraževanja, vodenja, raziskav ali razvoja tehnologij na področju tribologije in mazanja. Vsako leto STLE izvoli 4-5 Rednih članov s celega sveta. Doslej je od leta 1973 nagrado Fellow prejelo le okoli 150 članov STLE, ki je sicer edino svetovno združenje tribologov z okoli 5000 člani. Dr. Kalin je najmlajši prejemnik tega priznanja doslej.

	<p>Čeprav priznanje ni samo plod tega projekta, je nenehno udejstvovanje in uvajanje novosti – tudi na področju nanotehnologij zelenega mazanja, ki ga obravnava ta projekt – pomembno prispevalo k odločitvi za podelitev tega priznanja.</p>
ANG	<p>Dr. Kalin was elected a Fellow of the STLE international tribologists association (2012) for his outstanding personal achievements and long term contribution in the field of tribology and lubrication engineering. A Fellow member of the STLE is recognized for the outstanding personal achievements in the field of education, management, research or technological development in the field of tribology and lubrication engineering. Each year, the STLE only elects 4-5 Fellow members worldwide. Since 1973 about 150 Fellow members received this award within the STLE, which is the only world tribology association with about 5000 members. Dr. Kalin is the youngest ever recipient of this award.</p> <p>Although this award does not reflect only the work in the presented project, the constant engagement and innovation – also in the field of nanotechnology, green lubrication, which is covered by this project – contributed significantly to the decision to grant Dr. Kalin this recognition.</p>
Šifra	E.02 Mednarodne nagrade
Objavljeno v	Ni objave.
Tipologija	3.25 Druga izvedena dela

## 9. Drugi pomembni rezultati projektne skupine<sup>8</sup>

V končni fazi priprave sta še dva znanstvena članka, ki bosta predvidoma objavljena v letu 2013. Aktivno sodelujemo tudi z več skupinami v svetu in z nekaterimi izmed njih smo sodelovali tudi pri tem projektu (Wizmann inštitut, Izrael; Sulzer Sorevi SAS, Francija; Inštitut Jožef Stefan, Slovenija).

## 10. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine<sup>9</sup>

### 10.1. Pomen za razvoj znanosti<sup>10</sup>

SLO

V tem projektu so pridobili različne znanstveno-relevantne rezultate, ki predstavljajo pomemben preskok v smeri zmanjševanja trenja (energija, poraba goriva), zmanjševanja obrabe (povečanje trajnosti, manj vzdrževanja), nov fizikalni koncept mehanizma mejnega mazanja za ne-reaktivne površinske ter nov fizikalni koncept za nadomestilo okolju škodljivih aditivov na osnovi kemijskih reakcij.

(1) Prvič v svetovnem merilu je bila izvedena sistematična študija triboloških lastnosti MoS<sub>2</sub> nanocevk (v splošnem). Uporaba teh nanodelcev v olju bistveno zniža tako koeficient trenja kot tudi obrabo v primerjavi s samim baznim oljem, pri čemer je ta učinek največji v režimu mejnega mazanja.

(2) Kot prvi v svetovnem merilu (in tudi v primerjavi z drugimi, podobnimi delci) smo pokazali, da je z uporabo plastovitih nanodelcev (ne le MoS<sub>2</sub> nanocevk) v olju možno učinkovito mazanje relativno nereaktivnih površin, kot so prevleke na osnovi diamantu-podobnega ogljika (DLC), ki so ene izmed najbolj obetajočih površinskih prevlek.

(3) Pridobili smo znanje o mehanizmih mazanja z nanodelci in pokazali, da gre pri takšnem mazanju za fizikalne in ne kemijske učinke nanodelcev. Pokazali smo, da so ti mehanizmi mazanja podobni za klasične materiale (jeklo) in sodobnejše, manj reaktivne materiale (DLC). Predlagani fizikalni koncept mejnega mazanja z nanodelci predstavlja znanstveno in tehnološko

nov in inovativen pristop.

(4) Zaradi fizikalnega principa delovanja nizko-strižnih plasti plastovitih kristalov in/ali drugih fizikalnih učinkov nanodelcev bo možno nadomestiti okolju škodljive aditive, ki vsebujejo S, P in Zn in ki se ukinjajo zaradi emisij, pri čemer ne bo prisotnega povečanja trenja in obrabe na konvencionalnih površinah, ki bi sicer sledilo odstranitvi aditivov in bi povečalo porabo energije ter poškodbe mehanskih komponent ter vzdrževanje.

(5) S predlaganim fizikalnim konceptom mejnega mazanja brez aditivov, ki vključujejo reaktivne elemente P, S in Zn, je možno formulirati olje, s katerim bo doseženo zmanjšanje onesnaževanja okolja zaradi emisij toplogrednih plinov, ki so posledica kemijskih reakcij teh elementov. Prav tako bodo preprečene poškodbe katalizatorjev v avtomobilih in tovornjakih, ki so največja nevarnost za te sisteme in nastajajo zaradi prisotnosti P in S.

(6) V projektu smo prvi v svetovnem merilu sistematično analizirali in zaradi tega lahko verodostojno pojasnili dejanski tribološki mehanizem mejnega mazanja z nanodelci, predvsem z MoS<sub>2</sub> nanocerkami. Pokazali smo, da mehanizmi mazanja temeljijo na stiskanju, deformiranju, drobljenju in eksfoliaciji nanodelcev v kontaktu, s čimer se formira tribološki film na površinah. Le-ta je ključnega pomena za zniževanje trenja in obrabe in pokazali smo, da je prisoten pri različnih pogojih preizkušanja.

(7) Ovrednotili smo vpliv površinske hrapavosti na učinke nanodelcev pri mazanju in izpostavili določene razlike, ki se v tem pogledu pojavijo med mazanjem jeklenih oz. DLC površin. Razčlenili smo tudi vpliv utekanja površin na mazanje z nanodelci, kjer smo pokazali, da olje z dodanimi nanodelci tudi po utekanju zagotavlja učinkovito mazanje, pri čemer se zopet pojavijo nekatere razlike med jeklenimi in DLC površinami.

ANG

In this project we acquired several scientifically relevant results that represent a step-change in terms of friction reduction (energy saving, fuel economy), wear reduction (increased durability, less maintenance), a new physical-based boundary lubrication concept for advanced non-reactive surface coatings and a new physical-based concept for the replacement of the chemically-activated polluting additives.

(1) A systematic study of the tribological properties of MoS<sub>2</sub> nanotubes (in general) was performed for the first time worldwide. The use of these nanoparticles in oil significantly decreases the coefficient of friction and wear compared to the base oil alone, and this effect is the greatest in the boundary lubrication regime.

(2) As the first in the world (and even in comparison with other similar types of particles), we showed that by using the nanoparticles with the layered structure (not just MoS<sub>2</sub> nanotubes) in oil an effective lubrication can be achieved for the relatively non-reactive surfaces, such as coatings based on the diamond-like carbon (DLC), which are one of the most promising surface coatings.

(3) We have acquired knowledge about the lubrication mechanisms with the nanoparticles and shown that such a lubrication is based on the physical rather than chemical effects of nanoparticles. We have shown that these lubrication mechanisms are similar for the classical materials (steel) and for the modern, less reactive materials (DLC). The proposed physically based concept of the boundary lubrication with the use of the nanoparticles represents a scientifically and technologically new and innovative approach.

(4) Through the physically based mechanisms of the low shear layers and/or other physical mechanisms achieved with the nanoparticles, it will be possible to replace the environmentally harmful additives containing P, S and Zn (which are being phased out due to the emissions) without the increase in the friction and wear on the conventional surfaces, which would result from the abandoning of these additives and which would inevitably cause new energy losses, damages to components and an increased need for maintenance.

(5) With the proposed physically based boundary lubrication concept without the additives containing the chemically reactive elements of P, S and Zn it is possible to formulate an oil that

will enable the elimination of the pollution (emissions) caused by the chemical reactions of the reactive additive elements (S, P, Zn) and the reduction in greenhouse gases formation. Furthermore, the elimination of P and S from the automotive lubricant systems will also eliminate the most detrimental reasons for the damages to the catalyst systems in cars and trucks, which is a radical innovation.

(6) In the project we have for the first time systematically analysed and for that reason also been able to confidently present the verified tribological boundary lubrication mechanisms based on the use of the nanoparticles, in particular the MoS<sub>2</sub> nanotubes. We have shown that the lubrication mechanisms are based on compression, deformation, fragmentation and exfoliation of the nanoparticles in the contact, which results in a formation of a tribological film on the surface. This tribological film is crucial for the reduction of the friction and wear, and we showed that it is present in a variety of test conditions.

(7) We have evaluated the impact of the surface roughness on the lubrication effects of the nanoparticles and highlighted the differences that occur in this respect in the lubrication of the steel and the DLC-coated surfaces. We have also analyzed the effect of the running-in on the nanoparticles-based lubrication and we showed that after the running-in the oil with the nanoparticles still enables an effective lubrication; again with some differences in lubrication of the steel and the DLC-coated surfaces.

## 10.2. Pomen za razvoj Slovenije<sup>11</sup>

SLO

Tehnologije prevlek imajo velik vpliv na socialne učinke v industrijskih državah, tj. v EU in Sloveniji, še posebej ker tu obstoji veliko SME podjetij za izdelavo prevlek, pa tudi večjih podjetij, ki temeljijo na teh tehnologijah in skupaj tvorijo izjemen potencial za nova delovna mesta. Nove kompozitne in nanostrukturne prevleke, kot npr. DLC, predstavljajo tehnološka področja z visokim potencialom rasti, vendar obstoji tudi velika konkurenčnost na tem področju znotraj EU in širše v svetu. V Sloveniji sicer ni podjetja, ki bi tržno proizvajalo DLC prevleke, vendar deluje veliko podjetij, ki izdelujejo druge podobne površinske prevleke in metode inženiringa površin, ki se srečujejo s podobnimi problemi in priložnostmi, obravnavanimi v tem projektu.

Rezultati tega projekta se nanašajo na temeljne znanstvene probleme ter tehnološke aplikacije in razvoj. Rezultati, ki izhajajo iz projekta omogočajo spodbujanje naprednih čistih tehnologij, napredek ključnih spodbujevalnih tehnologij (KET) ter nosijo potencial za razvoj čistejših vozil in plovil. Vse to so nekatere izmed prioritet razvoja, ki so povezane z aktualnimi tehnološkimi izzivi. Hkrati izsledki naših raziskav spodbujajo tudi nadaljnje raziskave na področju nanotehnologij in naprednih materialov, torej dodaten razvoj nanomaterialov in površinskih prevlek, med katerimi smo nekatere uporabili tudi v tem projektu in ki so še v fazi razvoja.

Poleg znanstvenega napredka in popularizacije nanotehnologij v povezavi z inženirskim področjem strojništva in tribologije je naš cilj prenos teh dosežkov v SME podjetja (Nanotul d.o.o., ki je lastnik patentnih pravic nanodelcev), pa tudi v večja podjetja za proizvodnjo mehanskih komponent in maziv, npr. OLMA d.d., s katero se že aktivno dogovarjamo za nadaljnje delo pri uvajanju nanodelcev v masti. Projekt pa je pomenil tudi združitev dveh uspešnih skupin na različnih komplementarnih področjih, na podlagi skupnega interesa in komplementarnih znanstvenih ter aplikativnih znanj, kar spodbuja nadaljnje sodelovanje in povečevanje kritične mase raziskovalnih potencialov.

Projektno delo je povezano tudi z doktorskim študijem, saj je bil M. Kalin izbran za mentorja na osnovi rezultatov prve faze tega projekta, iz česar smo pridobili tri-in-pol-letno štipendijo v sistemu »mladi raziskovalec«. Poleg tega smo tudi na podlagi novih spoznanj v okviru tega projekta na Fakulteti za strojništvo dopolnili program v novem študijskem predmetu z naslovom Nanotehnologije, ki omogoča neposreden prenos tega znanja študentom.

Nadalje je potrebno poudariti naše tesno sodelovanje pri razvoju nanomaterialov in maziv z drugimi skupinami v Evropi v okviru različnih projektov, npr. »Foremost« (32 partnerjev iz 13 držav, človeški viri 150 človek-let, vrednost 19 M€uro) in »2020 Interface« (9 partnerjev iz 6

držav, človeški viri 36 človek-let, vrednost 7,8 M€uro). Kot pobudnik in vodje oz. vodilni razvijalci v teh projektih smo nadalje prispevali k razpoznavanju Slovenije in naših inštitutov ter univerze. Z izkazovanjem novega znanja in izsledkov v tem projektu smo okrepili pri sodelujočih partnerjih našo razpoznavnost in znanstveno odličnost. S tem lahko pričakujemo tudi druge posredne koristi, npr. znanstvene obiske v/iz naših skupin, sodelovanje v novih EU ali bilateralnih projektih, mednarodno izmenjavo raziskovalcev ter nove pogodbe z industrijskimi partnerji v Evropi in širše. Prav slednje je v naši skupini postalo ustaljena dejavnost, saj izvajamo številne neposredne raziskave za svetovne vodilne korporacije.

ANG

Coating technologies have a strong impact on the social effects of the industrial world, i.e. in European Union, including Slovenia, especially because of many SME coating companies or SMEs and other larger companies that rely on these technologies and which have a considerable potential for job creation. Newly developed composite and nanostructured coatings, such as DLC, represent technological areas with very high growth potential; however, there is a considerable competition in this area within EU and worldwide. There are no companies for the production of the DLC coatings in Slovenia yet, but there are several companies producing other surface-protection coatings and surface engineering methods, with similar problems and opportunities as discussed in this project.

The results of this project refer to both basic scientific problems and to technological applications and developments. The results arising from the project enable a stimulation of the advanced clean technologies, a progress of the key enabling technologies (KET) and carry the potential for the development of cleaner vehicles and vessels. All of these are the priorities for the development associated with the current technological challenges. At the same time our research results also encourage further development in the field of nanotechnology and advanced materials, in particular nanomaterials and surface coatings, some of which were also used in this project and are still in the development stage.

Besides the scientific advancement and popularization of the nanotechnology in combination with the engineering application area (mechanical engineering and tribology), a clear commitment is a transfer of our achievements to SMEs (i.e. to »Nanotul d.o.o.«, which is the owner of exploitation rights for the nanoparticles) and potentially to larger industrial companies producing mechanical components and lubricants, e.g. OLMA d.d., with which we are already making arrangements for the mixing of the nanoparticles to greases. This project also meant joining the efforts of two successful groups in different but complementary fields that started to collaborate very fruitfully on the basis of common interest and complementary scientific and application knowledge, thus promoting further cooperation and the increase in the critical mass of the research potential.

The project also involves a doctoral study, since M. Kalin was selected as a mentor based on the Phase I results of this project. A doctoral student was accepted to a well-established doctoral-students scholarship system "Young researcher" and granted a three and a half year scholarship to work on this project. In addition, on the basis of the new knowledge gained during this project we have completed the program of a new study course at the Faculty of Mechanical Engineering, entitled Nanotechnologies, which enables a direct transfer of this knowledge to students.

It should be further stressed that we are also closely collaborating with other groups in Europe in the framework of different projects, such as »Foremost« (32 partners from 13 countries, with a human effort larger than 150 person-years, total budget of about 19 M€uro) and »2020 Interface« (9 partners from 6 countries, 36 person-years, total budget of about 7.8 M€uro). As initiators and leaders or main product developers in these projects we have contributed to the recognition of Slovenia and our institutes. Providing knowledge, new findings and ideas based on this project to these international groups we strengthened our recognition and scientific leadership in international community. Thus, several indirect benefits can be expected, including visiting scientists to/from our groups, collaboration in new EU or bilateral projects, international exchange of researchers and new contracts with industrial partners worldwide. In our group, this is already an established activity, since we have performed many research studies with the world's leading companies.



**11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!**  
**Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni**

Cilj		
<b>F.01</b>	<b>Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.02</b>	<b>Pridobitev novih znanstvenih spoznanj</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.03</b>	<b>Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.04</b>	<b>Dvig tehnološke ravni</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.05</b>	<b>Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.06</b>	<b>Razvoj novega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.07</b>	<b>Izboljšanje obstoječega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.08</b>	<b>Razvoj in izdelava prototipa</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

<b>F.09</b>	<b>Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.10</b>	<b>Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.11</b>	<b>Razvoj nove storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.12</b>	<b>Izboljšanje obstoječe storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.13</b>	<b>Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.14</b>	<b>Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.15</b>	<b>Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.16</b>	<b>Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.17</b>	<b>Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>

	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.18</b>	<b>Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.19</b>	<b>Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.20</b>	<b>Ustanovitev novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.21</b>	<b>Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.22</b>	<b>Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.23</b>	<b>Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.24</b>	<b>Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.25</b>	<b>Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.26</b>	<b>Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.27</b>	<b>Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.28</b>	<b>Priprava/organizacija razstave</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.29</b>	<b>Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.30</b>	<b>Strokovna ocena stanja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.31</b>	<b>Razvoj standardov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.32</b>	<b>Mednarodni patent</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.33</b>	<b>Patent v Sloveniji</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.34</b>	<b>Svetovalna dejavnost</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

<b>F.35</b>	<b>Drugo</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

**Komentar**


**12.Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!**  
**Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja**

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
<b>G.01</b>	<b>Razvoj visokošolskega izobraževanja</b>					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.02</b>	<b>Gospodarski razvoj</b>					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.03</b>	<b>Tehnološki razvoj</b>					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.04</b>	<b>Družbeni razvoj</b>					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

	in javne uprave					
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.05.</b>	<b>Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.06.</b>	<b>Varovanje okolja in trajnostni razvoj</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.07</b>	<b>Razvoj družbene infrastrukture</b>					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.08.</b>	<b>Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.09.</b>	<b>Drugo:</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

**Komentar**

--

**13.Pomen raziskovanja za sofinancerje<sup>12</sup>**

	Sofinancer	
1.	Naziv	
	Naslov	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja	Šifra
	1.	
	2.	
	3.	
	4.	
	5.	
Komentar		
Ocena		

**14.Izjemni dosežek v letu 2012<sup>13</sup>****14.1. Izjemni znanstveni dosežek**

Preveleke iz diamantu-podobnega ogljika (DLC) zagotavljajo nizko trenje in obrabo v najbolj zahtevnih kontaktih. Vendar pa je njihova reaktivnost s klasičnimi aditivi relativno nizka, poleg tega pa je zahtevan postopen umik teh aditivov zaradi njihove škodljivosti za okolje.

Kot prvi smo v Laboratoriju za tribologijo in površinsko nanotehnologijo (TINT) pokazali, da je namesto s klasičnimi kemijsko-aktivnimi aditivi DLC površine (in druge relativno inertne površine) mogoče učinkovito mazati, če olju dodamo MoS<sub>2</sub> nanodelce. Dosedanje navedbe so namreč zatrjevale, da je potrebna večja kemijska aktivnost tudi med površino in nanodelci.

Tak fizikalen princip mazanja je pri DLC prevlekah omogočil znižanje koeficienta trenja tudi za več kot 50 % v primerjavi s samim baznim oljem. Koeficient trenja tako mazanega sistema je bil hkrati tudi za 30 % nižji kot pri jeklenih površinah (mazanih z enakim oljem). Ta fizikalni princip lahko torej omogoči zelene tehnologije mazanja.

#### 14.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

/

### C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

#### Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba  
raziskovalne organizacije:*

in

*vodja raziskovalnega projekta:*

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za  
strojništvo

Mitjan Kalin

#### ŽIG

Kraj in datum:

#### Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2013/65

<sup>1</sup> Opredelite raziskovalno področje po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science). Prevajalna tabela med raziskovalnimi področji po klasifikaciji ARRS ter po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science) s kategorijami WOS (Web of Science) kot podpodročji je dostopna na spletni strani agencije (<http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/preslik-vpp-fos-wos.asp>). [Nazaj](#)

<sup>2</sup> Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

<sup>3</sup> Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>4</sup> Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

<sup>5</sup> V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>6</sup> Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'. [Nazaj](#)

<sup>7</sup> Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

<sup>8</sup> Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 7 in 8 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

<sup>9</sup> Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

<sup>10</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>11</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>12</sup> Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

<sup>13</sup> Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2012 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priložitev/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

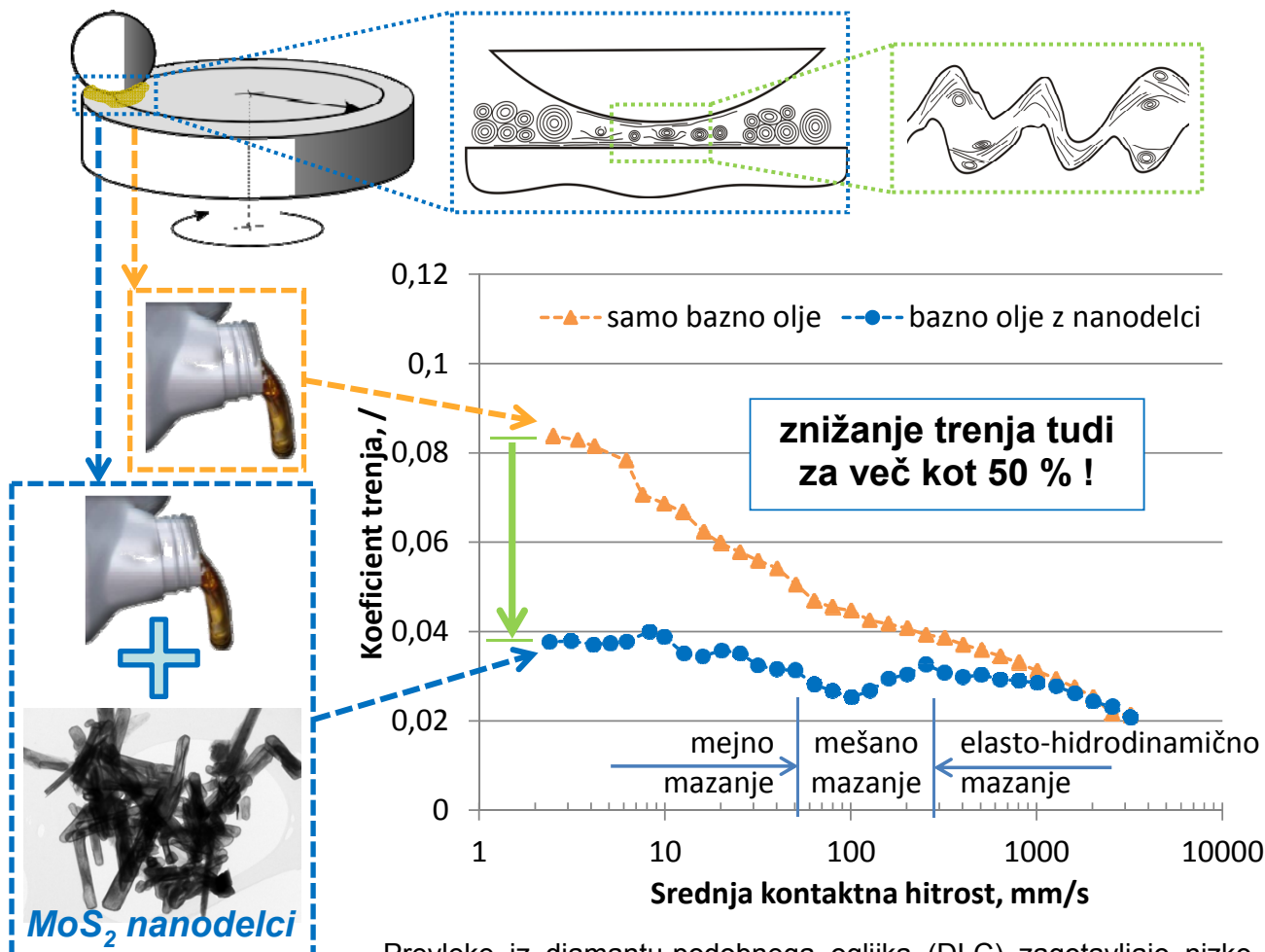
Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2013 v1.00  
39-A3-4E-0A-A9-4D-BE-9F-B2-F1-7D-DF-53-D7-91-1D-E9-0E-57-B5



# TEHNIKA

Področje: 2.11 – Konstruiranje

## Inovativen fizikalni princip mazanja z nanodelci v olju



Prevlake iz diamantu-podobnega ogljika (DLC) zagotavljajo nizko trenje in obrabo v najbolj zahtevnih kontaktih. Vendar pa je njihova reaktivnost s klasičnimi aditivi relativno nizka, poleg tega pa je zahtevan postopen umik teh aditivov zaradi njihove škodljivosti za okolje.

Kot prvi smo v Laboratoriju za tribologijo in površinsko nanotehnologijo (TINT) pokazali, da je namesto s klasičnimi kemijsko-aktivnimi aditivi DLC površine (in druge relativno inertne površine) mogoče učinkovito mazati, če olju dodamo MoS<sub>2</sub> nanodelce. Dosedanje navedbe so namreč zatrjevale, da je potrebna večja kemijska aktivnost tudi med površino in nanodelci.

Tak fizikalni princip mazanja je pri DLC prevlekah omogočil znižanje koeficienta trenja tudi za več kot 50 % v primerjavi s samim baznim oljem. Koeficient trenja tako mazanega sistema je bil hkrati tudi za 30 % nižji kot pri jeklenih površinah (mazanih z enakim oljem). Ta fizikalni princip lahko torej omogoči zelene tehnologije mazanja.

•M. Kalin et al.: Nanoparticles as novel lubricating additives in a green, physically based lubrication technology for DLC coatings. Sprejeto v *Wear* (2013).

•J. Kogovšek et al.: Influence of surface roughness and running-in on the lubrication of steel surfaces with oil containing MoS<sub>2</sub> nanotubes in all lubrication regimes. *Tribol. Int.* 61 (2013) 40-47.

•M. Kalin et al.: Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives. *Wear* 280/281 (2012) 36-35.