

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2010-1/70

ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	J2-9631
Naslov projekta	Mehanizmi in formiranje triboloških nano plasti pri mejnem mazanju DLC prevlek
Vodja projekta	14556 Mitjan Kalin
Tip projekta	J Temeljni projekt
Obseg raziskovalnih ur	2.835
Cenovni razred	D
Trajanje projekta	01.2007 - 12.2009
Nosilna raziskovalna organizacija	782 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Družbeno-ekonomski cilj	13. Splošni napredek znanja - RiR financiran iz drugih virov (ne iz splošnih univerzitetnih fondov - SUF)

2. Sofinancerji¹

1.	Naziv	
	Naslov	
2.	Naziv	
	Naslov	
3.	Naziv	
	Naslov	

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Poročilo o realizaciji programa raziskovalnega projekta²

Tribološke preizkuse smo izvajali pri pogojih mejnega mazanja na različnih modelnih napravah za študij triboloških lastnosti, ki jih imamo v laboratoriju (CSEM, Falex, SRV). Na modelnih testih smo uporabljali kroglice premera 10 in 25 mm, ki drsijo po mirujočem disku debeline 10 mm. Jeklene vzorce smo najprej toplotno obdelali za zagotovitev ustrezne trdote in mehansko obdelali površine za zagotovitev ustreznih hrapavosti. Vzorce smo nato poslali v tujino, kjer so jih oplaščili z amorfnimi hidrogeniranimi DLC prevlekami. V preizkusih smo uporabili tudi

neoplaščene vzorce, ki so nam služili za referenco. Preizkusi so trajali od 20 do 100 m drsne poti, pri hitrostih od 0.0005 do 0.5 m/s. S tem smo zagotovili vzpostavitev različnih režimov mazanja (mejno, mešano in EHD mazanje) in raznolikost rezultatov (selektivnost) ter tudi ponovljivost in zanesljivost. V testih smo uporabili tri vrste baznih olj, polialfaolefinska bazna olja, PAO 4, 6, 8 in 9 ter čiste ogljikovodike z različnimi dolžinami verig: C8, C9, C12, C14 in C 16. Kot aditive smo olju dodajali glicerol monooleat (GMO) in heksadekanol (HDO). Tlake smo variirali med 500 in 1000 MPa, kar ustreza delovnim pogojem pri katerih običajno obratujejo aplikacije z oplaščenimi strojnimi elementi. Za vse pogoje smo izračunali parameter Lambda ter debelino mazalnega filma. Zgoraj je naveden le minimalni nabor pogojev in preizkusov, saj smo tekom raziskave primerjali in ugotavljali še učinke, ki niso neposredno in sistematično vključeni v raziskavo, vendar pojasnjujejo določene pojave iz naših predhodnih izkušenj.

S pomočjo nove merilne opreme za merjenje stičnih kotov (KSV Instruments) smo opravili **analize omočljivosti površin** s pomočjo merjenja kontaktnega kota (tudi določanje površinskih napetosti, površinskih energij). Analize omočljivosti jeklenih in DLC površin smo izvedli z uporabo različnih maziv in tekočin. Z uporabo hitre kamere smo posneli širjenje kapljice tekočine na površini. Širjenje kapljice smo opazovali od točke dotika s površino do točke ustaljenega stanja. Rezultati so potrdili slabšo omočljivost DLC prevlek v primerjavi z jeklom, kot smo tudi predpostavljali na osnovi rezultatov iz triboloških testov.

Adsorpcijo mejnih plasti baznega polialfaolefinskega in alkanskega olja smo v kontaktih DLC/DLC opazovali z izvedbo testov pri statičnih in kvazistatičnih pogojih. Rezultati so pokazali, da je adsorpcija na DLC prevlekah šibkejša in manj učinkovita kot v kontaktih jeklo/jeklo, kar je pričakovano in skladno z dosedanjim razumevanjem. Vendar pa so bile na DLC površinah tudi pri zelo zahtevnih pogojih mejnega mazanja prisotne fizikalno adsorbirane plasti maziva, ki so bile dovolj močne, da so prenesle visoke strižne kontaktne napetosti in s tem preprečile hitro predrtje prevleke ter posledično povečanje koeficienta trenja. Ker pa se čisti alkani lahko na DLC površino adsorbirajo le s šibkimi van der Waalsovimi silami, saj so le-ti izjemno kemijsko čisti, brez polarnih kemijskih spojin in nečistoč, to nedvoumno dokazuje, da zaradi delujočega fizikalnega adsorpcijskega mehanizma na DLC, obstoji na DLC površini mejno mazanje tudi brez dodatnih polarnih funkcionalnih spojih ali aditivov.

Opravili smo tudi številne **teste brez uporabe maziva** zaradi analize temeljnega učinka mazalnih plasti v različnih parih materialov. Ugotovili smo, da prisotnost maziva v DLC kontaktu poveča trenje v primerjavi z nemazanimi pogoji, kar doslej še ni bilo opaženo. Slednje podaja povsem nov vidik mazanja DLC prevlek in uporabe maziv na teh materialih.

(Statične) Površinske analize adsorpcije smo izvajali s pomočjo mikroskopa na atomsko silo (AFM). Za analize smo uporabili enake preizkušance kot za tribološke teste, pri čemer smo na površine nanесли spojine v različnih koncentracijah in spremljali količino adsorbiranih molekul, s čimer smo skušali določiti jakost adsorpcije in površinsko zasedenost. V heksadekan smo dodajali heksadekanol v količinah 2 – 80 mMol/l. Najprej smo morali določiti čas in način čiščenja vzorcev, da smo sploh dobili rezultate v obliki merljivih vrednosti. Z AFM mikroskopom smo morali določiti ustrezne parametre delovanja in velikosti skeniranih površin, da smo dobili primerne in diferencirane vrednosti. Delovali smo v kontaktnem načinu s konstantno silo, analize površin pa so bile od 1x1 do 50x50 μm , odvisno od velikosti opaženih pojavov na površini. Poleg heksadekanola smo uporabljali tudi maščobno kislino. V obeh primerih smo nedvoumno dokazali adsorpcijo molekul alkohola in/ali karboksilne spojine na DLC prevleke, podobno kot je to na jeklu že znano iz preteklosti. To vsekakor pomeni, dokazano na zelo kontroliranem nivoju, da so DLC prevleke sposobne adsorpcije polarnih spojih, torej lahko delujejo na enakih teoretičnih predpostavkah mazanja kot jekla, vendar pa je še vedno vprašljiva jakost teh adsorbiranih plasti.

Rezultati, ki smo jih dobili so izjemni, saj v določeni meri predstavljajo povsem nova odkritja na področju mazanja DLC prevlek, njihovih adsorpcijskih lastnosti in sposobnosti formiranja triboloških nano plasti v tribološkem kontaktu. Na makroskopskem nivoju mazanja EHD kontaktov smo ugotovili, da trenje bistveno zavisi od omočljivosti površine, s čimer lahko zgolj s spreminjanjem fizikalno-kemijskih lastnosti površin vplivamo na trenje v popolnem EHD mazanju – ko ni kontaktov med površinami, ne da bi pri tem spremenili mazivo. Dokazali smo, da

se Stribeckova krivulja zaradi tega spremeni, vendar ne navzdol in levo, kot bi to bilo pričakovati, temveč navzdol in desno – v nasprotju z dosedanjimi predpostavkami, kaj naj bi sicer prevleke povzročile v mehanskih sistemih. Ob tem smo kot prvi doslej tudi izračunali količino zdrsa med tekočino in površino (solid-liquid interface) v treh različnih makro-kontaktih, kar je svetovna novost. Način, kako smo to opravili je nov in inovativen: na konferenci Wear of Materials 2009 (Las Vegas, ZDA), kjer smo prvič predstavili te izsledke, so predavanje v superlativih povzeli najuglednejši tribologi sveta. Članek je bil objavljen v reviji Wear vol. 267 (2009). Na tej osnovi sem imel na Japonskem v septembru vabljen predavanje na konferenci (Forefront of tribology: <http://www.kubo.rift.mech.tohoku.ac.jp/Forefront2009/>), kjer me je organizator povabil (na njegove stroške) predstaviti omenjeno delo, ki se zdi trenutno precej revolucionarno.

4. Ocena stopnje realizacije zastavljenih raziskovalnih ciljev³

Projekt je potekal v skladu s pričakovano realizacijo, oziroma je bila realizacija vsekakor presežena, saj so ugotovitve ter dodatne analize, ki smo jih opravili presegale pričakovanja in predloge v projektu. Glede na to, da želimo na danem področju prodreti in še dodatno utrditi naš položaj, saj smo ena izmed vodilnih skupin, smo osnovni projekt in rezultate podprli z različnimi metodami in dodatnimi preizkusi vplivnih parametrov, s čimer smo tudi okrepili naše razumevanje predstavljene problematike. Rezultati so bili dobri, celo presenetljivi, saj so pokazali povsem nove ugotovitve o mejnem mazanju DLC prevlek in formaciji fizikalno adsorbiranih nano plasti na DLC prevlekah, kar nam je odprlo povsem novo smer v raziskavah mazanja DLC prevlek in razumevanja molekularnih interakcij pri procesu trenja in obrabe.

Projekt je v celoti sledil zastavljenemu terminskemu programu. Program projekta je v prvem letu zajemal detajlno analizo najnovejše strokovne literature s področja mejnega mazanja DLC prevlek, tribokemije in nanotribologije. Na osnovi dobrega pregleda stanja razvoja smo objavili dva SCI članka, ki sta združila dotlej nepovezane izsledke različnih raziskav. V drugem letu je program zajemal izvajanje triboloških meritev z uporabo jeklenih in DLC kontaktov ter primerjalno analizo z rezultati iz prvega dela projekta. V tretjem letu je program dela zajemal izvajanje dodatnih triboloških preizkusov, in sicer pri pogojih kjer smo predhodno opazili zanimiv ali neobičajen odziv. Na izbranih vzorcih so bile izvedene tudi površinske analize. Te analize so bolj obsežne in bolj celovite kot smo predlagali, saj smo dodatno opravljali še študij adhezijske sile ter analize omočljivosti površin s pomočjo merjenja kontaktnega kota (tudi določanje površinskih napetosti, površinskih energij). Slednje smo opravili na lastno dodatno iniciativo v sodelovanju s kolegi na Inštitutu Jožef Stefan (IJS) in Naravoslovno tehnični fakulteti (NTF). Ti rezultati so nam bistveno pomagali pri razumevanju adsorpcijskih procesov na DLC in jeklu, predvsem njunih različnih mehanizmov. Prav tako smo na IJS izvedli še natančne površinske analize z metodo XPS in AES (dr. Kovač), ter z AFM v visokem vakuumu UHV-AFM (dr. Remškar), kjer smo preverjali dejansko stanje površin, ki jih merimo na svojem AFM na zraku in s koti omočljivosti. Poleg tega smo opravili študije adsorpcije na statičnih vzorcih, kjer smo pod kontroliranimi pogoji temeljito in celovito analizirati osnovne procese, ki smo jih predlagali v projektu.

Rezultate smo objavili v 5 SCI člankih v priznanih revijah (Tribology International, Wear, Meccanica) ter imeli kar nekaj konferenčnih objavah, na pomembnih mednarodnih konferencah, kot npr. Leeds-Lyon Symposium 2008 (Leeds, Anglija), Wear of Materials 2009 (Las Vegas, ZDA), Advances in boundary lubrication and boundary surface films 2009 (Sevilla, Španija), Ecotrib 2009 (Pisa, Italija). Objave so imele izrazito pozitiven odmev, kot je razloženo že v prejšnjem poglavju.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta⁴

Ni bilo sprememb programa.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

Znanstveni rezultat			
1.	Naslov	SLO	Analiza aksialne batne črpalke z DLC prevlekami in biološko razgradljivimi mazivi
		ANG	Analysis of an axial piston pump using DLC-coated piston shoes and biodegradable oil.
	Opis	SLO	Članek obravnava lastnosti DLC prevlek v kontaktih z oljem v realnih obratovalnih pogojih. Rezultati ne kažejo na konkretne mehanizme v kontaktih, temveč dokazujejo sposobnost delovanja v daljšem časovnem obdobju pod realnimi pogoji, torej vzpostavlja predpogoj za nadaljnje detaljne študije, saj ima omenjena kombinacija očitno dober potencial za uporabo v praksi.
		ANG	Paper deals with the DLC coatings used on piston shoes under real scale conditions. We do not present mechanisms, but an important practical property: long term performance under real scale and realistic operating conditions. Results indicate a great potential of this system.
	Objavljeno v		J. tribol., 2008, vol. 130, no. 1, 8 str. http://dx.doi.org/10.1115/1.2805442 . JCR IF (2007): 0.945, SE (25/107), engineering, mechanical, x: 0.706
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		10346523
2.	Naslov	SLO	Pregled mehanizmov mejnega mazanja DLC prevlek v mehanskih aplikacijah
		ANG	Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coating used in mechanical applications
	Opis	SLO	V mednarodni SCI reviji smo objavili pregledni znanstveni članek na temo mazanja DLC prevlek, kjer analiziramo dosedanje predlagane mehanizme mejnega mazanja in povdarjamo lastne raziskave.
		ANG	In an international journal we present a review of lubricating mechanisms presented for DLC coatings with oils and additives. We analyse those presented by others and emphasise our own research.
	Objavljeno v		Meccanica, Dec. 2008, vol. 43, no. 6, str. 623-637, ilustr. http://www.springerlink.com/content/5r6j3u60001365t7/?p=ebb580a4cd774668995aed48a1dfd60d&pi=5 . JCR IF (2007): 0.641, SE (71/112), mechanics, x: 1.049
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		10815259
3.	Naslov	SLO	Vpliv viskoznosti na trenje mazanih DLC kontaktov pri različnih drsni hitrostih
		ANG	The influence of viscosity on the friction in lubricated DLC contacts at various sliding velocities
	Opis	SLO	V mednarodni SCI reviji smo objavili rezultate o vplivu viskoznosti olja na tribološki odziv DLC prevlek, pri čemer smo sistematično ovrednotili neobičajno tribološko obnašanje teh površin v primerjavi s konvencionalnimi inženirskimi materiali, npr. jeklom.
		ANG	In an international SCI journal, we published the results of the impact of oil viscosity on tribological response of DLC coatings, and we systematically evaluated the unusual tribological behavior of these surfaces in comparison with conventional engineering materials, eg. steel.
	Objavljeno v		The influence of viscosity on the friction in lubricated DLC contacts at various sliding velocities. Tribol. int.. [Print ed.], Dec. 2009, vol. 42, iss. 11/12, str. 1752-1757.
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		11139611
4.	Naslov	SLO	Stribeckova krivulja in zasnova mazanja nepopolno omočenih površin
		ANG	The Stribeck curve and lubrication design for non-fully wetted surfaces
	Razvili smo splošno veljavne postopke za oceno zdrsa med nepopolno		

	Opis	SLO	omočljivo površino in mazivom, kakršni doslej v literaturi še niso bili predstavljeni. Predstavljen postopek, v povezavi z eksperimentalnimi podatki, omogoča oceno zdrsa med tekočino (mazivom) in površino v makroskopskih, inženirskih kontaktih.
		ANG	We developed generally applicable procedures for the estimation of slip of the lubricant on non-fully wetted surfaces. Such procedures has not yet been presented in the literature. With the use of experimental data, the method provides the rate of slip between the liquid (lubricant) and the surface for macroscopic, engineering contacts.
	Objavljeno v		The Stribeck curve and lubrication design for non-fully wetted surfaces. Wear. [Print ed.], 15. jun. 2009, vol. 267, issues 5-8, str. 1232-1240, ilustr., doi: 10.1016/j.wear.2008.12.072.
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		10955035
5.	Naslov	SLO	Pregled učinkovitosti in mehanizmov trdih prevlek iz diamantu podobnega ogljika (DLC) v stikih z jeklom pri mejnem mazanju
		ANG	The performance and mechanisms of DLC-coated surfaces in contact with steel in boundary-lubrication conditions : a review
	Opis	SLO	Na konferenci smo predstavili dotlej še nepovezane izsledke iz različnih raziskav mehanizmov mejnega mazanja prevlek iz diamantu podobnega ogljika (DLC). Pri tem smo se osredotočili samo na mehanizme mejnega mazanja kontakta DLC/jeklo, pri katerem je obstajalo največ nejasnosti, saj je bilo ravno za to kombinacijo izvedenih največ raziskav, ki pa so podajale tudi kontradiktorne zaključke.
		ANG	At the conference we presented the most important conclusions of various studies of mechanisms for boundary lubrication of diamond like carbon (DLC). We focused only on the mechanisms for DLC/steel contact, where most confusion was present, since in the majority of research this combination was studied, and therefore also contradictory conclusions were given.
	Objavljeno v		Stroj. vestn., 2008, letn. 54, št. 3, str. 189-206.
	Tipologija		1.02 Pregledni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		10523931

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomsko relevantni rezultati projektne skupine⁶

	Družbeno-ekonomsko relevantni rezultat		
1.	Naslov	SLO	Kemijski in fizikalni mehanizmi v kontaktih med DLC prevlekami in mazivi
		ANG	Chemical and Physical Interactions between DLC Coatings and Lubricants
	Opis	SLO	Vabljen predavatelj s strani Komiteje za raziskave tribološke sekcije ASME na mednarodni konferenci ASME/STLE joint tribology conference, Miami (USA) 20.-22. oktober 2008.
		ANG	Invited lecture from the Research committee of the ASME Tribology division at ASME/STLE joint tribology conference, Miami (USA) 20.-22. oktober 2008.
	Šifra		B.04 Vabljen predavatelj
	Objavljeno v		Knjiga povzetkov. Abstract book, ASME/STLE joint conference. Panel : presented at the ASME RCT workshop "Surface engineering - coatings, texturing and beyond" held during the International joint tribology conference in Miami, Florida, October 20-22, 2008. 2008.
	Tipologija		3.16 Vabljen predavatelj na konferenci brez natisa
COBISS.SI-ID		10890267	
2.	Naslov	SLO	Revija o tribologiji
		ANG	Journal of Tribology
	Opis	SLO	Dr. Kalin že od leta 2006 deluje kot pridružen urednik ene najuglednejših in temeljnih SCI revij na področju tribologije, to je Journal of Tribology. Trenutno opravlja že svoj drugi tri-letni mandat. Pri reviji samostojno določa recenzente, vrednoti njihovo delo in vsi posreduje evalvacije člankov, na

			koncu pa samostojno sprejema odločitve o objavi člankov. S tem posredno aktivno usmerja in vrednoti raziskave v svetovnem merilu, programski skupini pa pomaga pri njeni razpoznavnosti in kvaliteti.
		ANG	Since 2006 dr. Kalin works as associate editor one of the main renowned SCI journals in the field of tribology, the Journal of Tribology. Currently he is working his second three-year mandate. For journal he independently defines reviewers, assesses their work and lead procedure of articles evaluation, and finally makes independent decisions on publication of articles. With that he indirectly actively directs and evaluates research in the world, and helps to the program group at its visibility and quality.
	Šifra	C.06 Članstvo v uredniškem odboru	
	Objavljeno v	New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, 1984-. ISSN 0742-4787	
	Tipologija	3.25 Druga izvedena dela	
	COBISS.SI-ID	7267077	
3.	Naslov	SLO	Fizikalna adsorpcija in omočljivost pri mazanem trenju DLC prevlek
		ANG	Physical adsorption and wetting in lubricated friction of DLC coatings
	Opis	SLO	Rezultati, ki smo jih predstavili predstavljajo povsem novo odkritje na nivoju fizisorpcijskih mehanizmov in na nivoju mazanja v elasto-hidrodinamičnem (EHD) režimu mazanja. Ugotovili smo, da trenje bistveno zavisi od omočljivosti površine, pri čemer lahko zgolj s spreminjanjem fizikalno-kemijskih lastnosti površin vplivamo na trenje v popolnem EHD mazanju, ko ni kontaktov med površinami, ne da bi pri tem spremenili mazivo.
		ANG	The results we have presented represent completely new findings on the level of physical adsorption mechanisms and lubrication in the elastic-hydrodynamic (EHD) regime. We discovered that friction significantly depends on the wetting properties of surfaces. Therefore, in the full EHD lubrication regime, where there are no contacts between surfaces, friction can be affected only by altering the physicochemical properties of surfaces, without changing the lubricant.
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	presented at the conference Advances in Boundary Lubrication and Boundary Surface Films, March 29 - April 3, 2009 Seville, Spain. Seville, 2009.	
	Tipologija	3.16 Vabljen predavanje na konferenci brez natisa	
	COBISS.SI-ID	10955803	
4.	Naslov	SLO	Vloga adsorpcije in tribo-fizikalnih parametrov pri mazanju DLC prevlek
		ANG	Role of adsorption and tribophysical parameters in lubrication of DLC
	Opis	SLO	Ugotovili smo, da se v kontaktu DLC pri uporabi baznega PAO olja ali čistih alkanov tvori mejna mazalna plast, katere lastnosti vplivajo na tribološki odziv kontakta. Čisti alkani se lahko na DLC površino adsorbirajo le s šibkimi van der Waalsovimi silami, saj so le-ti izjemno kemijsko čisti. Slednje nedvoumno dokazuje, da je zaradi delujočega fizikalnega adsorpcijskega mehanizma na DLC površini mogoče mejno mazanje tudi brez dodatnih polarnih funkcionalnih spojin ali aditivov.
		ANG	We discovered that in DLC contact boundary layers are formed only with the use of PAO base oil or pure alkanes. These boundary layers influence the tribological properties of the contact. Since they are highly chemically pure, alkanes can absorb on the DLC surface only with the weak van der Waals forces. This clearly shows that due to the functioning of physical adsorption mechanism boundary lubrication is possible on DLC surfaces without the addition of polar groups or additives.
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	[an invited lecture at] World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan, September 6-11, 2009. Kyoto: World Tribology Congress, 6. 9. 2009.	
	Tipologija	3.16 Vabljen predavanje na konferenci brez natisa	
	COBISS.SI-ID	11148315	
5.	Naslov	SLO	Zdrs na stiku trdno-tekoče za nepopolno omočljive površine in posledice za zasnovo mazanja
			The slip at the solid-liquid interface of non-fully wetted surfaces and its

	ANG	consequences on lubrication design
Opis	SLO	Predstavili smo nov koncept zasnove mazanja, kakršen doslej za makro-inženirske kontakte še ni bil izdelan. Pri določevanju fizikalnih lastnosti materialov je namreč potrebno ne le upoštevati stikov na nivoju trdno-trdno, temveč tudi stike med fazama trdno-tekoče, saj imajo lahko le-ti zaradi zdrsa maziva na površini zelo velik vpliv na trenje.
	ANG	We presented a new concept for lubrication design, such that has not yet been made for macro-engineering contacts. Namely, when considering the physical properties of materials it is necessary not only to take into account the solid-solid contacts, but also the solid-liquid contacts, since due to the slip of the lubricant on the surface they can have a very large influence on friction.
Šifra		B.04 Vabljen predavanje
Objavljeno v		Invited talk on Forefront of Tribology, 12th September 2009, Sendai, Japan. 12. 9. 2009; Sendai.
Tipologija		3.16 Vabljen predavanje na konferenci brez natisa
COBISS.SI-ID		11139355

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁷

V sodelovanju z uglednimi evropskimi raziskovalnimi ustanovami in partnerji iz gospodarstva smo na osnovi odmevnega dela letos pričeli z delom na novem evropskem projektu 7 okvirnega programa »2020 Interface«, ki je usmerjen v mazanje DLC prevlek in formacijo mejnih filmov na le-teh. Ravno zaključki iz temeljnega projekta predstavljajo pomemben element našega dela na tem projektu.

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti⁹

SLO

Želja po zmanjšanju porabe materialnih virov in energije ter popolnem obvladovanju procesov in fenomenov, ki pa se odvijajo na zelo temeljnih nivojih, je pripeljala tudi do novega raziskovalnega področja, ki so ga poimenovali nanotehnologija. Pri razvoju tega področja je trenje na atomskem nivoju izrednega pomena, s čimer pa se ukvarja nano-tribologija. V projektu smo se ukvarjali z delom tega področja, in sicer s področjem nanostrukturnih materialov, nano mazalnih filmov in posredno trenju na nano nivoju brez prisotnosti maziva. Ta področja so trenutno med prioritetskimi v svetu in ključna za razvoj veliko naprav in sistemov in so v veliki meri še v zgodnji fazi razvoja.

Drugo področje s katerim smo se ukvarjali v tem projektu je delo na oplaščenih površinah za strojne elemente, ki imajo zahtevno obliko površine. Tu sta dva problema. Prvi je kako izdelati prevleko, ki bo prenašala velike obremenitve in pri teh pogojih delovala zanesljivo in samo regulacijsko (inteligentne prevleke). Drugi problem pa je, da so take prevleke v osnovi inertne. Delovanje strojnih elementov pa zahteva, da so tribološki kontakti mazani. Naloga, ki smo si jo zadali je razvoj zanesljivih prevlek z veliko nosilnostjo in zanesljivostjo ter priprava takih mazalnih snovi, ki bodo ekološko sprejemljiva in obenem omogočala nastanek nano-mikro mazalnega filma v kontaktu. Tu smo v svetu med vodilnimi skupinami. Dokaz za to je konferenca "Advances in boundary lubrication and surface boundary films", katere predsednik je bil vodja tega projekta M. Kalin, ki je potekala v Sevilji v Španiji (28.3.-2.4. 2009) pod okriljem Engineering Conferences International (ECI). Konferenca je visoko specializirana na tem področju, udeležili so se je praktično vsi vodilni znanstveniki s celega sveta.

ANG

Requirements for reduced energy and material resources consumption brought up a new research field called Nano-technology. In the development of this field knowledge about friction on the atomic level is essential. This field is called Nano-tribology. In our research program investigation will be focused on nano-structured materials, nano lubrication films and dry friction on nano level. Based on experts' opinion, these fields are essential for the development of many mechanical components and system, at the same time being still largely unexplored. We expect for our work on these fields to contribute to the knowledge and research development.

The second field proposed is the investigation of coatings for machine elements with complex

geometry. Here we have two points of interest. The first concern is how to manufacture a reliable coating that can carry high loads and be self-regulating (intelligent coatings). The second concern is chemically inertness of these coatings. For normal operation of machine elements lubricants are more or less essential. Therefore, our task is to develop reliable coatings with high load-carrying capacity on one side, and lubricating fluids which are environmentally adapted and capable of forming nano-micro lubricating films in the contact. In this field, we are one of the leading centres in the world. As an example, dr. M. Kalin was a chair of the intl. conference "Advances in boundary lubrication and surface boundary films" held in Seville, Spain, which just finished (28.3.-2.4. 2009) and was organised by the Engineering Conferences International (ECI). This was a top class dedicated conference.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Slovenija je država, ki je zelo odvisna od uvoza energije in surovin za proizvodnjo materialov. Zato je nujno, da skrbi za to, da porabi kar se da malo energije in osnovnih surovin na enoto proizvoda. Po mnenju nekaterih analitikov je neposredni strošek trenja in obrabe industrijsko razvitih državah tudi do 5 % BDP. Ocenjuje se tudi, da je moč doseči prihranek do 1% BDP zgolj z zmanjšanjem trenja z uporabo ustreznih maziv in primernih principov zniževanja trenja in obrabe. V praksi se znanje tribologije uporablja za izboljšanje lastnosti gibajočih se elementov, z namenom znižanja tornih izgub in obrabe ter s tem podaljšanje trajnosti in zanesljivosti delovnih in pogonskih sistemov. Znano je, da so v Nemčiji izgube energije in poškodbe kontaktnih površin, povezanih z obrabo in trenjem, ocenjene na okoli 35 Miliarda €. Jasno je torej, da je pomen in vpliv področja ter omenjenih raziskav izjemen.

Manj znano je dejstvo, da lahko tudi porabo goriva znatno zmanjšamo s spremembo maziva. Tako je možno pri modernem avtomobilu porabo goriva zmanjšati tudi do 5% zgolj z zamenjavo večgradacijskega olja z oljem z nižjo viskoznostjo in aditivom za zniževanje trenja. Raziskava Evropske unije je pokazala, da bi lahko povprečno emisijo CO₂ osebnih avtomobilov do konca leta 2008 zmanjšali z današnjih 200 g/km na manj kot 140 g/km. To pomeni, da bi glede na naše podatke bila lahko v Sloveniji emisija CO₂ samo s tem ukrepom približno več sto tisoč ton na leto manjša. Torej v projektu delujemo tudi v smeri zmanjšanja okoljskih emisij, ki postajajo vse pomembnejše tudi v Sloveniji.

Danes se zavedamo, da je potrebno razvoj doseči na trajnosten in okolju prijazen način, kar zahteva uporabo novih materialov in maziv. Trenje in obrabo lahko zmanjšamo tudi z uporabo nanostrukturnih materialov, oplaščenimi površinami ter nano mazalnimi filmi. Pri tem pa je nujno potrebno znanje o interakcijah med površinami naprednih materialov in maziv na nano skali, saj ima le-to ključno vlogo pri obvladovanju trenja in obrabe materialov. V okviru projekta smo se osredotočili predvsem uporabo baznih olj brez aditivov, saj se svetovni trendi nagibajo k uporabi vedno manjše količine maziv, ki pa morajo biti tudi ekološko neoporečna. S takšnim pristopom smo se osredotočili na mehanizme fizikalne adsorpcije maziva na površino, ki so bili doslej na DLC prevlekah še povsem nepoznani. Dokazali smo, da se pri uporabi baznega polialfaolefinskega olja ali čistih alkanov tvori mejna mazalna plast, katere lastnosti vplivajo na tribološki odziv v odvisnosti od viskoznosti in dolžine molekularne verige. Vse našete ugotovitve predstavljajo za Slovenijo nov izziv tako z znanstvenega kot tudi proizvodnega stališča, saj odpirajo povsem nova, v svetu še neraziskana oziroma slabo poznana področja.

ANG

Slovenia is highly dependent on import of energy and raw materials for material production. Therefore, it is necessary to focus toward the smallest possible consumption of energy and raw materials per product unit. According to some analysts, the direct expense of friction and wear in industrially developed countries is as high as 5% GDP. It is also estimated that it could be possible to achieve savings of up to 1% GDP, only with the reduction of friction obtained by the use of appropriate lubricants. In practice, knowledge of tribology is used to improve different properties of moving elements, with intention to reduce friction and wear losses and consequentially prolong durability and reliability of machines and transmission systems. It is well known that in Germany energy losses and damage of contact surfaces, related to wear and friction, are responsible for costs equal to about 35 billion €. It is clear that this is extremely important field.

Less common observation is that fuel consumption in automotive sector can be substantially reduced, up to 5 %, with proper additives and base fluids. EU research showed that CO₂ emissions could be reduced from 200 below 140 g/km. This would suggest that in Slovenia, we could omit undesired polluting emissions in amount of few hundreds of tons per year.

Therefore, in our project we target also these goals that are becoming more and more important in Slovenia, like other developed countries.

Today we know that we need to achieve the development in a sustainable and environmentally friendly way, which requires the use of new materials and lubricants. Friction can also be reduced through use of nanostructured materials, coated surfaces and nanolubricating films. However, it is essential to understand the interactions between the advanced materials and lubricants on the nano scale, since they do have a key role in controlling friction and wear of materials. Within the project we focused on the use of base oils without additives, because the global trends tend to use smaller quantities of lubricants, which must also be ecologically acceptable. With this approach, we focused on the mechanisms of physical adsorption of the lubricant on the surface, which has been previously completely unknown for DLC coatings. We demonstrated that with use of the base polyalphaolefin oils or pure alkanes boundary lubrication layer is formed in DLC contact, which affects the tribological properties of the contact as a function of viscosity and molecular chain length. All these findings represent a new challenge for Slovenia, both from a scientific as well as the production point of view, as they are opening brand new, still unexplored and/or poorly known areas.

10. Samo za aplikativne projekte!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri aplikativnem projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE

	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljaljskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.35	Drugo	

Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
Rezultat	
Uporaba rezultatov	

Komentar

11. Samo za aplikativne projekte!**Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja**

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visoko-šolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☐	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☐	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☐	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☐	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☐	☐	☐	☐	
G.02.07.	Večji delež izvoza	☐	☐	☐	☐	
G.02.08.	Povečanje dobička	☐	☐	☐	☐	
G.02.09.	Nova delovna mesta	☐	☐	☐	☐	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	☐	☐	☐	☐	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	☐	☐	☐	☐	
G.02.12.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	☐	☐	☐	☐	
G.03.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	☐	☐	☐	☐	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	☐	☐	☐	☐	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	☐	☐	☐	☐	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	☐	☐	☐	☐	

G.04.05.	Razvoj civilne družbe	☐	☐	☐	☐	
G.04.06.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	☐	☐	☐	☐	
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj	☐	☐	☐	☐	
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	☐	☐	☐	☐	
G.09.	Drugo: 	☐	☐	☐	☐	

Komentar

12. Pomen raziskovanja za sofinancerje, navedene v 2. točki¹¹

1.	Sofinancer			
	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				
2.	Sofinancer			
	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			
3.	Sofinancer		
	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			

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, za objavo 6., 7. in 8. točke na spletni strani <http://sicris.izum.si/> 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:

Mitjan Kalin	in	
podpis vodje raziskovalnega projekta		zastopnik oz. pooblaščen oseba RO

Kraj in datum:

Ljubljana

16.4.2010

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2010-1/70

¹ Samo za aplikativne projekte. [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja ter rezultate in učinke raziskovalnega projekta. Največ 18.000 znakov vključno s presledki (približno tri strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁴ Samo v primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ Navedite največ pet najpomembnejših znanstvenih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov v slovenskem in angleškem jeziku (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki) v slovenskem in angleškem jeziku, navedite, kje je objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote.

Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>.

PRIMER (v slovenskem jeziku):

Naslov: Regulacija delovanja beta-2 integrinskih receptorjev s katepsinom X;

Opis: Cisteinske proteaze imajo pomembno vlogo pri nastanku in napredovanju raka. Zadnje študije kažejo njihovo povezanost s procesi celičnega signaliziranja in imunskega odziva. V tem znanstvenem članku smo prvi dokazali... (največ 600 znakov vključno s presledki)

Objavljeno v: OBERMAJER, N., PREMŽL, A., ZAVAŠNIK-BERGANT, T., TURK, B., KOS, J.. Carboxypeptidase cathepsin X mediates $\beta 2$ - integrin dependent adhesion of differentiated U-937 cells. Exp. Cell Res., 2006, 312, 2515-2527, JCR IF (2005): 4.148

Tipologija: 1.01 - Izvirni znanstveni članek

COBISS.SI-ID: 1920113 [Nazaj](#)

⁶ Navedite največ pet najpomembnejših družbeno-ekonomsko relevantnih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki), izberite ustrezen rezultat, ki je v Šifrantu raziskovalnih rezultatov in učinkov (Glej: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/sif-razisk-rezult.asp>), navedite, kje je rezultat objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote.

Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>. [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁸ 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](#)

⁹ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Rubrike izpolnite/prepišite 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](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2010 v1.00a

DD-84-24-6A-3F-92-74-6E-48-4B-FE-2A-3A-1C-A0-C6-B8-A4-D9-36