

# STROJNIŠKI

## VESTNIK 4

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

strani - pages 151 - 190

ISSN 0039-2480 . Stroj V . STJVAX

cena 800 SIT

- 1.** Vpliv kemotermične obdelave podlage na tribološke lastnosti trdih prevlek  
Influence of Substrate Pretreatment on the Tribological Properties of Hard Coatings
- 2.** Obrabna odpornost konstrukcijskega jekla, nitiranega v plazmi  
Wear Resistance of Plasma Nitrided Structural Steel
- 3.** Primerjava triboloških lastnosti mineralnih in repičnih mazalnih olj -  
Rezultati mehansko-dinamičnih analiz (2. del)  
Tribological Properties of Rapeseed Oils Compared to Mineral Oils -  
Results of Mechanical - Dynamic Investigations (part 2)



## Vsebina

### Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering  
letnik - volume 47, (2001), številka - number 4

#### Razprave

Podgornik, B., Vižintin, J.: Vpliv kemotermične  
obdelave podlage na tribološke lastnosti trdih  
prevlek

Podgornik, B., Vižintin, J., Leskovšek, V.: Obrabna  
odpornost konstrukcijskega jekla, nitriranega  
v plazmi

Arnšek, A., Vižintin, J.: Primerjava triboloških  
lastnosti mineralnih in repičnih mazalnih olj  
- Rezultati mehansko-dinamičnih analiz (2.  
del)

#### Strokovna literatura

#### Osebne vesti

#### Navodila avtorjem

#### Papers

Podgornik, B., Vižintin, J.: Influence of Substrate  
Pretreatment on the Tribological Properties of  
Hard Coatings

Podgornik, B., Vižintin, J., Leskovšek, V.: Wear  
Resistance of Plasma Nitrided Structural  
Steel

Arnšek, A., Vižintin, J.: Tribological Properties of  
Rapeseed Oils Compared to Mineral Oils –  
Results of Mechanical - Dynamic Investiga-  
tions (part 2)

#### Professional Literature

#### Personal Events

#### Instructions for Authors

## Vpliv kemotermične obdelave podlage na tribološke lastnosti trdih prevlek

### Influence of Substrate Pretreatment on the Tribological Properties of Hard Coatings

Bojan Podgornik - Jože Vižintin

V raziskavi so bile določene tribološke lastnosti jekla 42CrMo4, nitriranega v plazmi in prekritega z različnimi zaščitnimi prevlekami (TiN, TiAlN in DLC). Pred tribološkimi preskusi smo z elektronsko in optično mikroskopijo, z merjenjem mikrotrdote ter oprijemljivosti prevlek vrednotili dotikalno tehnično površino. Tribološke preskuse smo opravili na napravi "valjček-disk" pri suhem drsenju. Za ugotovitev vpliva nitriranja, njegove globine in spojinske plasti na tribološke lastnosti sestave prevleka-podlaga smo trde zaščitne prevleke nanесли na kaljeno jeklo in na jeklo, nitrirano v plazmi. Samo nitriranje v plazmi je bilo izvedeno v različnih razmerah.

Rezultati kažejo, da v primerjavi s kaljenjem nitriranje jekla 42CrMo4 izboljša protiobrabno odpornost nanesenih trdih zaščitnih prevlek. Poleg tega natančno voden proces nitriranja v plazmi omogoča nastanek homogene spojinske plasti, ki ima pozitiven učinek na protiobrabne lastnosti trde zaščitne prevleke.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: nitriranje plazemsko, prevleke trde, drsenje, obraba)**

In the research, samples made of AISI 4140 steel pre-treated by plasma nitriding and coated with different PVD coatings (TiN, TiAlN and ta-C) were investigated in terms of their microhardness, scratch adhesion and dry sliding wear resistance. Wear tests, in which duplex-treated pins were mated to hardened ball bearing steel discs, were performed with a pin-on-disc machine. To examine the influence of the nitrided zone on the performance of the coating-substrate composite, coatings were deposited on hardened as well as on plasma nitrided samples, prepared under different nitriding conditions.

The results of the investigation showed improved mechanical and tribological properties of the plasma nitrided hard-coated specimens compared to the un-coated and pre-hardened ones. Furthermore, the compound layer was found to act as an intermediate hard layer leading to superior sliding wear properties of the composite.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: plasma nitriding, hard coatings, dry sliding, wear)**

#### 0 UVOD

Zaradi nenehnih zahtev trga po večji produktivnosti, boljši zanesljivosti in obrabni obstojnosti ter seveda donosnosti mehanskih sistemov, so komponente sistemov vedno bolj obremenjene. Svetovne zaloge osnovnih surovin in cene končnih izdelkov zahtevajo od izdelovalcev uporabo cenениh in preprosto dosegljivih materialov, ki jih je nato moč oplemenititi z najrazličnejšimi postopki toplotne obdelave in nanosa trdih zaščitnih prevlek [1]. Je pa uporaba trdih zaščitnih prevlek omejena. V primeru strojnih elementov je glavni problem zmožnost sestave prenašati obremenitev. Ker so

#### 0 INTRODUCTION

Due to market demands for mechanical systems with improved productivity, reliability, durability and wear resistance—as well as profitability—the elements of these mechanical systems are exposed to increasingly harsh mechanical environments. However, economic constraints require that these materials are inexpensive and easily available. In order to enhance the surface properties of today's materials, producers of components are turning to different surface treatments, and in particular to hard protective coatings [1]. What limits the more widespread use of hard thin coatings, especially in the case of

prevleke v večini primerov zelo tanke, debele le nekaj  $\mu\text{m}$  ali celo manj, mora podlaga nositi večji del obremenitve. V primeru, da podlaga tega ne zmore, lahko pride do poškodbe prevleke in s tem strojnega elementa ([2] do [4]).

V zadnjih letih postaja tehnologija oplemenitenja površine "duplex", ki združuje kemotermično izboljšanje podlage ter nanos trde zaščitne prevleke, vedno bolj pomembna [5]. Pri tem se je izkazalo, da je ena od najbolj obetajočih tehnologij prav kombinacija nitriranja podlage ter nanosa trde zaščitne prevleke iz parne faze (NZZP - PVD). Ta kombinacija ne vodi le do boljše nosilne zmožnosti površine temveč tudi do izboljšane odpornosti na utrujanje, temperaturne stabilnosti ter seveda boljših triboloških lastnosti dotikalne površine ([4], [6] do [10]).

Namen predstavljene raziskave je bil poiskati možnosti uporabe trdih zaščitnih prevlek na žilavih konstrukcijskih jeklih. V ta namen smo uporabili kombinacijo kemotermične priprave podlage z nitriranjem v plazmi in vakuumski nanos trde zaščitne prevleke iz parne faze (NZZP). Vpliv kemotermične priprave podlage ter parametrov nitriranja na drsne protiobrabne lastnosti trdih zaščitnih prevlek je bil določen na primeru enoplastne (TiN) in večplastne (TiAlN) keramične prevleke ter prevleke na osnovi trdega ogljika (PTO - DLC).

## 1 PRESKUSI

Za osnovni material smo uporabili običajno konstrukcijsko jeklo 42CrMo4, pri katerem je moč, z uporabo ustreznega postopka izboljšanja, doseči relativno dobro trdoto površine ter žilavo jedro. Pred kemotermičnim izboljšanjem so bili preskušanci kaljeni in popuščani ( $650^\circ\text{C}$ ) na trdoto  $300 \text{HV}_{0,5}$  ter brušeni na stopnjo hrapavosti N5.

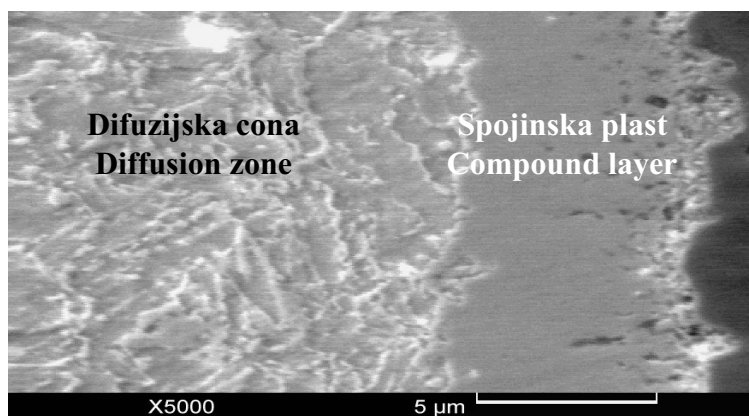
machine elements, is the load-carrying capacity of the coated system. Because the hard coatings are very thin the substrate must carry most of the applied load. If the substrate is not capable of supporting the coating, plastic deformation will occur, leading to premature failure of the coating ([2] to [4]).

The challenge of improving the properties of hard protective coatings with a thermo-chemical pretreatment of the substrate has gained much attention in recent years, and this has led to the development of a new method called duplex treatment [5]. A combination of plasma nitriding and physical-vapour-deposition (PVD) processes has been found to be a very attractive method of duplex treatment, not only for increasing the load-carrying capacity, but also for improving the fatigue and temperature resistance as well as the tribological behaviour of the contact surfaces ([4], [6] to [10]).

The aim of this paper was to investigate the possibilities of using hard protective coatings on structural steels. Therefore, a combination of plasma nitriding of a 42CrMo4 steel substrate and the deposition of a hard thin PVD coating was used. Different nitriding conditions were employed in order to investigate their effect on the sliding-wear properties of monolayer (TiN), multilayer (TiAlN) and a diamond-like carbon (DLC) coating.

## 1 EXPERIMENTAL

The substrate material used was 42CrMo4 structural steel for hardening and nitriding. This material was chosen because it can be nitrided to a high surface hardness without losing its toughness properties, making it suitable for highly loaded machine parts. Samples were quenched and then tempered at  $650^\circ\text{C}$  to a mean hardness of  $300 \text{HV}_{0,5}$  and ground to a surface roughness of N5.



Sl. 1. Mikrostruktura jekla 42CrMo4, nitriranega v plazmi ( $75\% \text{H}_2$ - $25\% \text{N}_2$ )  
Fig.1. Microstructure of plasma nitrided 42CrMo4 steel ( $75\% \text{H}_2$ - $25\% \text{N}_2$ )

Preglednica 1. Uporabljeni kemotermični postopki in njihovi parametri

Table 1: Details of substrate treatment processes

Postopek Treatment	Medij Atmosphere	Temperatura Temperature °C	Čas Time h	Globina Case depth mm	
nitiranje v plazmi + $\gamma'$ plasma nitriding + $\gamma'$	A	75% $H_2$ -25% $N_2$	540	28	0,55
nitiranje v plazmi plasma nitriding	B	99,4% $H_2$ -0,6% $N_2$	540	17	0,3
kaljenje hardening	C	olja oil	870/250	2/1	celoten prerez throughout
kaljenje hardening	D	olja oil	870/650	2/1	celoten prerez throughout

Kemotermična obdelava preskušancev je obsegala tri postopke. Prva skupina preskušancev je bila nitirana v plazmi (75% $H_2$ -25% $N_2$ ) 28 h pri temperaturi 540°C (postopek A), kar je vodilo do nastanka 5  $\mu$ m debele spojinske plasti  $\gamma'$  ter globine nitiranja 0,55 mm (sl. 1). Druga skupina je bila nitirana v plazmi z zelo majhnim deležem dušika (99,4% $H_2$ -0,6% $N_2$ ) 17 h pri temperaturi 540°C (postopek B), s čimer smo preprečili nastanek spojinske plasti [10], [11] ter dosegli globino nitiranja 0,3 mm. Tretja skupina preskušancev je bila kaljena na trdoto 600 HV<sub>0,5</sub> (postopek C) ter skupaj z osnovnim materialom, izboljšanim na trdoto 300 HV<sub>0,5</sub> (postopek D), uporabljena kot primerjava. Detajli postopkov nitiranja in kaljenja, prikazani v preglednici 1, so bolj natančno opisani v literaturi [12].

Kemotermično izboljšani preskušanci so bili nato prekriti s trdo zaščitno prevleko TiN, TiAlN ali trdega ogljika, ki so bile nanese po običajnem postopku PVD. Prevleki TiN in TiAlN, debeline ~ 4  $\mu$ m, sta bili na kemotermično izboljšano podlago nanese s postopkom reaktivnega naparivanja, pri čemer je bila temperatura podlage 400 do 450°C. Prevleka TiN je enoplastna prevleka prve generacije. Prevleka TiAlN, sestavljena iz ponavljajočih se plasti TiN in TiAlN debeline ~ 120 nm, pa je večplastna prevleka druge generacije [13]. Prevleka trdega ogljika (PTO - DLC), poznana tudi kot tetrahedralni amorfn ogljik (ta-C), debeline ~ 0,5  $\mu$ m, je bila s pulznim obločnim naparivanjem nanese na polirano podlago ( $R_a \approx 0,02 \mu$ m) temperature 20 do 80°C. Za zagotovitev ustrezne oprijemljivosti prevlek je bila, pred nanosom trde zaščitne prevleke, na podlago nanese vmesna vezna plast titana debeline 30 nm.

Hrapavost površine pred nanosom in po nanosu trdih prevlek je bila izmerjena s stičnim merilnikom hrapavosti. Trdota prevlek je bila določena z metodo nano vtiskovanja [14]. Podlagi ter sestavi prevleka - podlaga pa smo trdoto izmerili z metodo Vickers pri obremenitvi 50 g. Za določitev oprijemljivosti prevleke na podlago je bil izbran preskus z razenjem [15], medtem ko so bile torne in

Three thermo-chemical processes were selected. The first group was plasma nitrided at 540°C for 28 h in a 75% $H_2$ -25% $N_2$  atmosphere (treatment A), which resulted in a diffusion zone of 0,55 mm and a dense  $\gamma'$  compound layer of about 5  $\mu$ m, as shown in Fig. 1. The second group was bright nitrided (treatment B), realised by activating the surface and using a low nitrogen content in the plasma [11]. In this way a diffusion zone of 0,3 mm was obtained without any compound-layer formation. The third group of specimens was hardened to a surface hardness of ~600 HV<sub>0,5</sub> (treatment C) and together with pre-hardened samples (300 HV<sub>0,5</sub> - treatment D) used as a reference. The details of the nitriding and hardening processes are listed in Table 1 and described in more detail elsewhere [12].

The thermo-chemically treated samples were then coated with TiN, TiAlN or a DLC coating, deposited using commercial PVD processes. The TiN and TiAlN coatings, which were approximately 4- $\mu$ m thick, were deposited using a commercial reactive-arc-evaporation technique at a substrate temperature between 400 and 450°C. Whereas the TiN coating is a single-layer coating, the TiAlN coating can best be described as a second-generation multilayer coating [13] composed of alternate TiN and TiAlN layers with individual layer thicknesses of ~120 nm. A 0,5- $\mu$ m thick DLC coating, also known as tetrahedral amorphous carbon coating (ta-C), was deposited by a pulsed vacuum-arc deposition system at a deposition temperature in the range 20 to 80°C. DLC coatings were deposited on specimens, which were polished after the thermo-chemical treatment to an average surface roughness of approximately 0,02  $\mu$ m. In order to ensure adequately reproducible adhesion of the coatings, all specimens were coated with a thin titanium interlayer (30 nm) prior to deposition of the coatings.

Surface roughness before and after the coating deposition was measured using stylus profilometry. The surface hardness was measured with a Vickers microhardness tester (50 g load) and nanohardness measurements [14]. The scratch test

obrabne lastnosti sestave določene na napravi "valjček-disk". Pri triboloških preskusih je kemotermično izboljššan valjček, prekrit s trdo zaščitno prevleko, pritiskal ob rotirajoči disk iz orodnega jekla (90MnCrV8), izboljššanega na trdoto  $700 \text{ HV}_{0,5}$  in brušenega na  $R_a \approx 0,4 \mu\text{m}$ . Tribološki preskusi so bili izvedeni v razmerah suhega drsenja pri sobni temperaturi ( $20^\circ\text{C}$ ) in relativni vlažnosti zraka 50 %, obremenitvi 60 N in drsni hitrosti 1 m/s.

## 2 REZULTATI IN OBRAVNAVA

### 2.1 Hrapavost in trdota površine

Povprečne vrednosti hrapavosti površine pred nanosom in po nanosu trde zaščitne prevleke so prikazane na sliki 2. Po nitriranju se je, glede na parametre nitiranja, hrapavost podlage povečala, kar je bilo ugotovljeno že v prejšnjih raziskavah ([12] in [16]). Nanos trde zaščitne prevleke na polirano (PTO) ali neobdelano kemotermično izboljššano podlago (TiN, TiAlN) pa ni vplival na izrazito spremembo hrapavosti površine (sl. 2).

V primerjavi s kaljenjem, nitiranje v plazmi poveča trdoto površine jekla 42CrMo4 ([12] in [16]). Po nitiranju v plazmi z zelo majhnim deležem dušika (postopek B, preglednica 1) je bila dosežena trdota površine  $\sim 700 \text{ HV}_{0,5}$ . Povečanje deleža dušika ter podaljšanje časa nitiranja (postopek A, preglednica 1) je vodilo do večje trdote površine ( $\sim 940 \text{ HV}_{0,5}$ ) in tudi do nastanka strnjene spojinske plasti (slika 1), katere trdota, izmerjena z metodo nano vtiskovanja, je bila prek 10,5 GPa. Poliranje površine pred nanosom PTO je povzročilo znižanje trdote nitrirane površine za približno 8 %, kar je razvidno s slike 3.

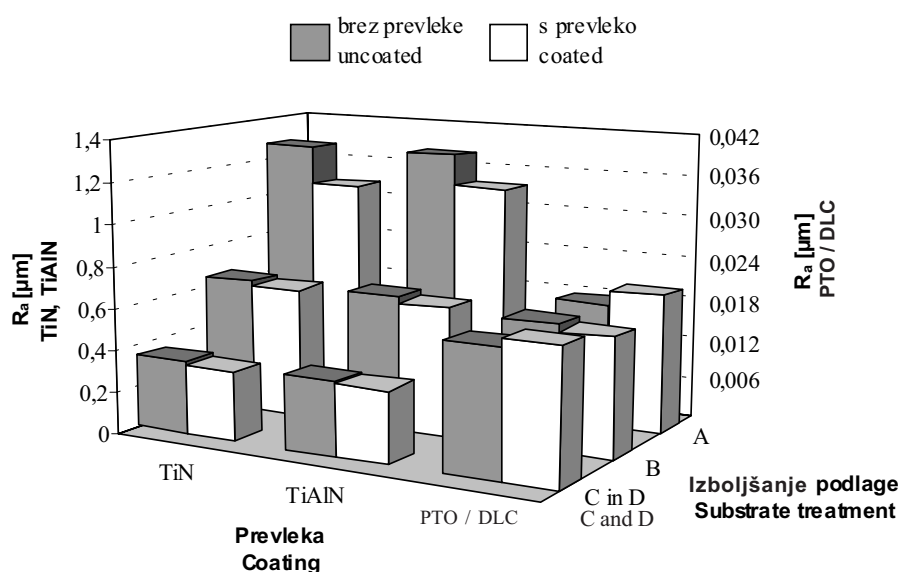
was chosen to evaluate the coating-to-substrate adhesion [15]. The wear resistance of the duplex-treated samples was tested using a pin-on-disc machine where a duplex-treated pin was loaded against an uncoated disc made of 90MnCrV8 steel, hardened to a surface hardness of  $700 \text{ HV}_{0,5}$  and ground to  $R_a \approx 0.4 \mu\text{m}$ . Unlubricated wear tests were carried out at a normal load of 60 N with a sliding speed of 1 m/s at room temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) and a relative humidity of about 50%.

## 2 RESULTS AND DISCUSSION

### 2.1 Surface roughness and hardness

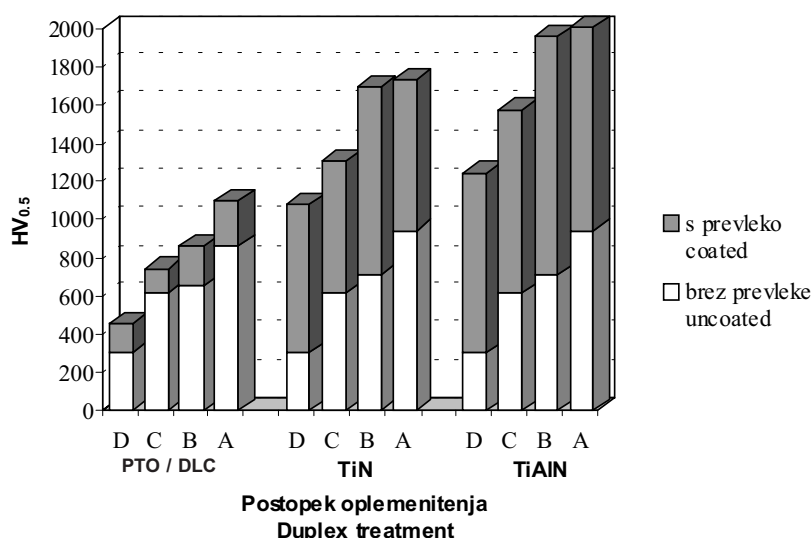
The average surface roughness of the 42CrMo4 steel samples before and after the coating deposition is shown in Fig. 2. Depending on the nitriding conditions, nitriding caused an increase in the surface roughness, as described in previous investigations ([12] and [16]). However, deposition of the PVD coatings on polished (DLC coating) or on "as thermo-chemically treated" substrates (TiN and TiAlN coatings) did not cause any measurable increase in the surface roughness, as shown in Fig. 2.

Compared to hardening, plasma nitriding increased the surface hardness of 42CrMo4 steel ([12] and [16]). In the case of plasma nitriding in a nitrogen-poor atmosphere (treatment B, Table 1) the surface had a peak hardness of  $\sim 700 \text{ HV}_{0,5}$ . Increasing the nitriding time and the nitrogen concentration (treatment A, Table 1) led to a higher surface hardness of  $\sim 940 \text{ HV}_{0,5}$  and to the formation of a dense compound layer (Fig. 1), whose hardness, measured by a nano-indentation method was found to be over 10.5 GPa. Polishing of the substrate prior to the deposition of the DLC coating slightly reduced the surface hardness of the plasma-nitrided specimens, as shown in Fig. 3.



Sl. 2. Hrapavost površine kemotermično izboljššanega jekla 42CrMo4 pred nanosom in po nanosu trde zaščitne prevleke

Fig. 2. Surface roughness of duplex-treated 42CrMo4 steel prior and after coating



Sl. 3. Trdota površine kemotermično izboljšane jekla 42CrMo4, prekritega s trdo zaščitno prevleko  
Fig. 3. Surface microhardness of duplex-treated 42CrMo4 steel

Meritve trdote sestave prevleke - podlaga, izvedene z metodo Vickers, so pokazale, da nitriranje v plazmi poveča trdoto sestave, kar velja za vse tri raziskane prevleke (sl. 3). Najmanjši vpliv kemotermičnega izboljšanja podlage smo opazili v primeru PTO, kar je posledica zelo majhne debeline prevleke in relativno velike obremenitve. S povečanjem trdote podlage, nitriranje v plazmi izboljša nosilno zmožnost podlage ter zagotavlja dobro podporo prevleki [17]. Po drugi strani pa večja trdota podlage vodi do zmanjšanja gradienta trdote na meji med prevleko in podlago in s tem do manjših napetosti v prevleki med obremenitvijo ([10] in [11]).

Trdota in modul elastičnosti samih prevlek sta bila določena z metodo nano vtiskovanja. Za prevleko DLC s trdoto  $70,1 \pm 7,4$  GPa in modulom elastičnosti  $571 \pm 51$  GPa je bilo ugotovljeno, da je precej trša in bolj toga kakor prevleki TiN ( $H = 28,5 \pm 1,8$  GPa,  $E = 386 \pm 26$  GPa) in TiAlN ( $H = 31,4 \pm 2,8$  GPa,  $E = 407 \pm 37$  GPa).

## 2.2 Oprijemljivost prevleke na podlago

Oprijemljivost prevleke na podlago je bila določena z metodo razenja, kjer smo uporabili diamantno konico (Rockwell C) s polmerom  $200 \mu\text{m}$  ter stopnjo obremenjevanja  $10 \text{ N/mm}$ . Slika 4 prikazuje kritično obremenitev  $L_c$  nastanka prvih razpok v prevleki nanoseni na kemotermično izboljšano jeklo 42CrMo4.

V primeru prevlek TiN in TiAlN, nanosenih na jeklo, nitrirano v plazmi (postopek B), so se razpoke, ki so se širile od središča proti robu raze, pojavile pri kritični obremenitvi  $35 \text{ N}$ . S povečevanjem obremenitve se je pričela prevleka ločevati od podlage. Podoben mehanizem

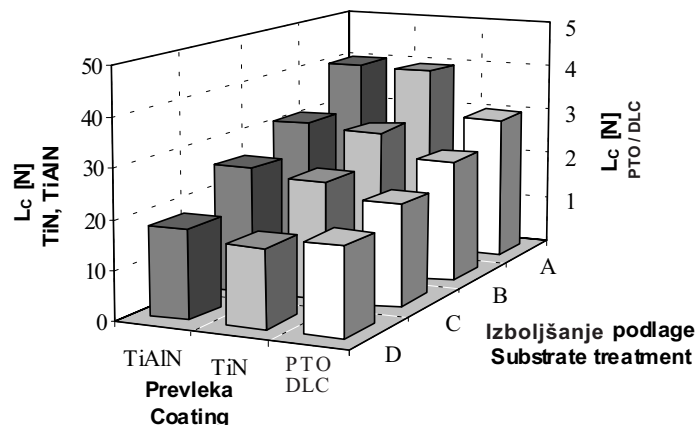
Vickers microhardness measurements performed on coated specimens showed an improved composite hardness as a result of plasma nitriding the substrate: this was observed for all three coatings (Fig. 3). However, due to the low thickness of the DLC coating the substrate had a more pronounced effect on the measured hardness values of the DLC-coated specimens when compared to the TiN- and TiAl-coated specimens. By increasing the hardness of the substrate, plasma nitriding improves the load-carrying capacity of the substrate and provides good support for the coating [17] as well as reducing the large hardness gradient at the coating/substrate interface. Smoother hardness gradients would be expected to reduce stresses in the coating when it is loaded ([10] and [11]).

Nano-indentation analysis was used to determine the hardness and elastic properties of the coatings. The DLC coating with a hardness of  $70.1 \pm 7.4$  GPa and Young's modulus of  $571 \pm 51$  GPa was found to be much harder and stiffer compared to the TiN ( $H = 28.5 \pm 1.8$  GPa,  $E = 386 \pm 26$  GPa) and TiAlN ( $H = 31.4 \pm 2.8$  GPa,  $E = 407 \pm 37$  GPa) coatings.

## 2.2 Adhesion

A scratch tester equipped with a  $200\text{-}\mu\text{m}$  radius Rockwell C diamond stylus and a loading rate of  $10 \text{ N/mm}$  was used to evaluate the coating-to-substrate adhesion. Figure 4 shows the critical load  $L_c$  for the first failure of the coating as a function of the substrate pre-treatment.

In the case of the TiN and TiAlN coatings deposited on a plasma-nitrided substrate (treatment B, Table 1) tensile cracking of the coating propagating from the bottom of the scratch towards the scratch-channel rims was observed at a critical load of approximately  $35 \text{ N}$ . Increasing the load led to coating spallation, observed at the rim of the scratch channel, and finally to complete removal of the coating. A



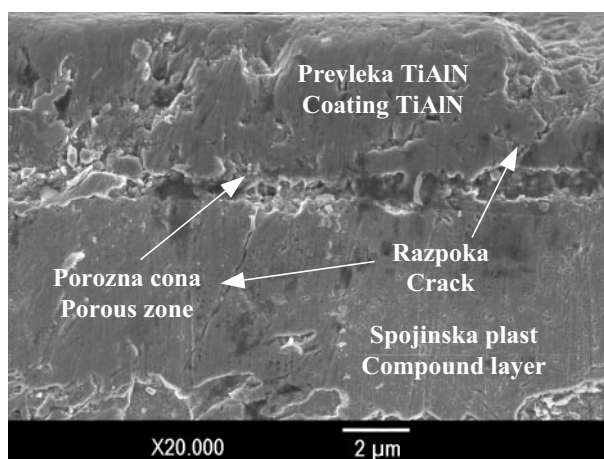
Sl. 4. Kritična obremenitev nastanka prve poškodbe raziskanih prevlek  
Fig. 4. Critical load for first failure of the investigated coatings

poškodbe prevleke smo ugotovili tudi v primeru kaljene podlage (postopek C in D, preglednica 1), kjer pa so se prve razpoke v prevleki pojavile že pri precej manjši obremenitvi (sl. 4). Kritična obremenitev je bila pri PTO precej manjša kakor v primeru prevlek TiN in TiAlN. Nitriranje podlage pa je tudi v primeru PTO močno izboljšalo oprijemljivost prevleke na podlago, kakor prikazuje slika 4.

Spojinska plast, nastala med postopkom nitriranja, običajno povzroča poslabšanje oprijemljivosti prevleke na podlago, kar se pripisuje poroznosti in slabi oprijemljivosti spojinske plasti na difuzijsko cono ([8] do [11], [18] in [19]). Analiza rezultatov preskušanja z razenjem pa je pokazala, da spojinska plast, nastala pri natančno vodenem postopku nitriranja v plazmi, vedno ne vodi do poslabšanja oprijemljivosti prevleke na podlago. Še več, tanka porozna cona spojinske plasti lahko celo zavira neposredno širjenje razpok iz podlage v prevleko, kar je prikazano na sliki 5.

similar coating-failure mechanism was found for coated hardened substrates (treatments C and D, Table 1). Hardening, however, was found to decrease the critical loads when compared to plasma nitriding, as shown in Fig. 4. DLC coating was found lower when compared to the TiN and TiAlN coatings. However, as in the case of the TiN and TiAlN coatings, plasma nitriding of the substrate was found to yield increased critical loads for the DLC-coated specimens when compared to the hardened ones (Fig. 4).

It is normally claimed that the compound layer formed during nitriding reduces coating-to-substrate adhesion, and this is mainly attributed to the compound layer's porosity and its poor adhesion to the steel surface ([8] to [11], [18] and [19]). The results of the scratch-test analysis showed that although the compound layer displayed a small porous zone at the surface this did not necessarily lead to a reduced coating-to-substrate adhesion. Furthermore, it seems that the porous zone of the compound layer prevents any cracks that originate from the defects in the substrate from propagating directly into the coating, as shown in Fig. 5.



Sl. 5. Širjenje razpoke v sestavi difuzijska plast – spojinska plast-trda prevleka  
Fig. 5. Crack propagation in the composite diffusion zone-compound layer-hard coating



### 2.3 Tribološke lastnosti

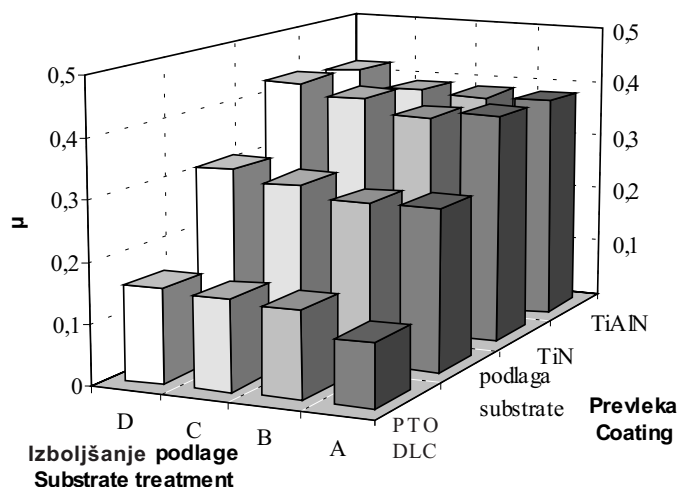
Slika 6 prikazuje povprečne vrednosti koeficienta trenja za kemotermično izboljšano jeklo 42CrMo4, katerega površino smo prekrili s trdo zaščitno prevleko. Za prevleki TiN in TiAlN se je izkazalo, da je koeficient trenja, s povprečno vrednostjo  $\sim 0,4$ , praktično neodvisen od postopka kemotermičnega izboljšanja podlage. Z nanosom PTO je koeficient trenja kemotermično izboljšanega jekla padel na vrednosti med 0,15 in 0,1, pri čemer postopek kemotermičnega izboljšanja podlage, vpliva na torne lastnosti sestave (sl. 6). V primeru kaljene podlage ter podlage nitrirane v plazmi z majhnim deležem dušika (postopek B, preglednica 1) se je koeficient trenja v začetni fazi preskušanja zvečeval, dokler ni dosegel stalne vrednosti 0,15. Najbolj enakomeren potek in najnižja vrednost koeficienta trenja ( $\sim 0,1$ ) sta bila dosežena v primeru PTO nanosene na nitrirano podlago s spojinsko plastjo (postopek A, preglednica 1). Zelo majhne vrednosti koeficienta trenja, dosežene v primeru prevlek DLC, je moč povezati z nastankom grafitnega sloja na dotikalni površini plošče ([20] do [23]), kar je razvidno s slike 7.

Nanos trde zaščitne prevleke je močno zmanjšal drsno obrabo kemotermično izboljšanih valjčkov, ki je odvisna od postopka kemotermičnega izboljšanja podlage (sl. 8). Drsna obrabna odpornost raziskanih prevlek se je s povečevanjem trdote podlage in zamenjavo postopka kaljenja z nitriranjem v plazmi izboljšala. Najboljšo drsno obrabno odpornost raziskanih prevlek pa smo dosegli v primeru nitrirane podlage s spojinsko plastjo (postopek A, preglednica 1). Boljšo obrabno odpornost kompozita, ki smo jo izmerili v primeru

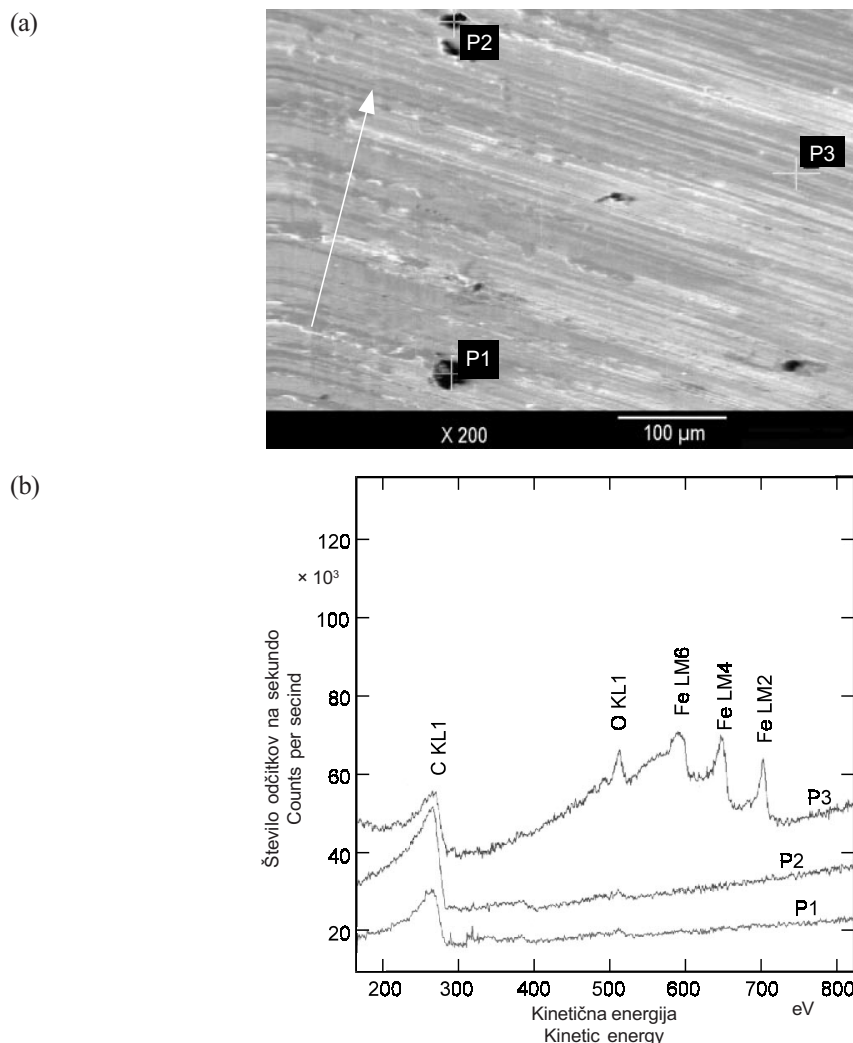
### 2.3 Tribological properties

Average values for the coefficient of friction of the duplex-treated 42CrMo4 steel are shown in Fig. 6. Coating of surface-treated 42CrMo4 steel with TiN or TiAlN coatings increased the steady-state coefficient of friction from  $\sim 0,3$  to  $\sim 0,4$ , which was found to be more-or-less independent of the substrate pretreatment used. On the other hand, deposition of the DLC coating decreased the steady-state coefficient of friction down to values between 0.1 and 0.15 (Fig. 6). In the case of the hardened-and-plasma-nitrided substrate that was nitrided in a nitrogen-poor atmosphere (treatment B, Table 1), the coefficient of friction increased during the early stages of the test before attaining a constant value of  $\sim 0,15$ . However, in the case of the plasma-nitrided substrate with a compound layer (treatment A, Table 1), the coefficient of friction showed a very constant value throughout the entire test with the lowest value ( $\sim 0,1$ ) among the substrate pre-treatments used. These low values of the coefficient of friction can be related to the formation of a carbon transfer film ([20] to [23]), observed on the counter surface of the disc (Fig. 7).

Deposition of the wear protective coating (TiN, TiAlN or DLC) decreased the pin wear rate significantly, as shown in Fig. 8. As in the case of the scratch test, wear of the duplex-treated pins was strongly influenced by the substrate pre-treatment (Fig. 8). The wear of the investigated coatings decreased with increased substrate hardness and a change of the substrate pre-treatment from hardening to plasma nitriding. Compared to the coated-and-hardened substrates, the nitrided-and-coated specimens showed improved sliding-wear resistance, which can be mainly attributed to higher substrate hardness and improved coating-to-substrate adhesion. Some earlier investigations have shown that the



Sl. 6. Povprečne vrednosti koeficienta trenja v odvisnosti od kemotermičnega izboljšanja podlage  
Fig. 6. Average coefficient of friction of duplex-treated steel as a function of substrate treatment



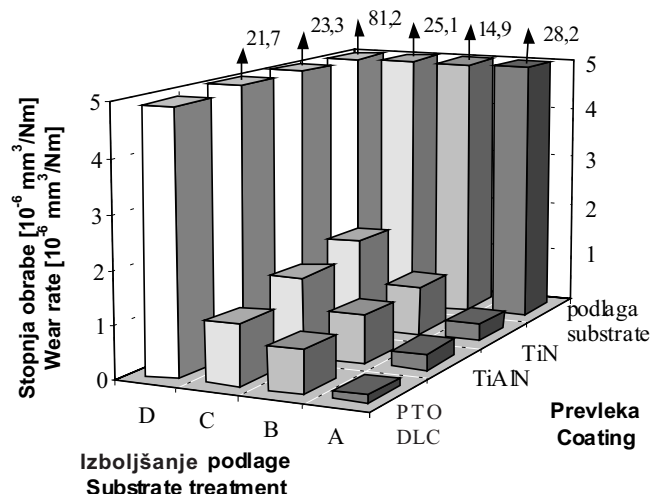
Sl. 7. (a) Obrabljena površina plošče po drsenju s kemotermično izboljšanim valjčkom, prekritim s PTO in (b) analiza površine XPS – točki P1 in P2 znotraj obrabne sledi in P3 na neobrabljeni površini  
 Fig. 7. (a) Wear track on the steel disc running against a DLC coated pin and (b) XPS analysis of the surface (P1 and P2 inside wear track and P3 unworn surface)

nitirane podlage, je moč pripisati večji trdoti podlage ter boljši oprijemljivosti prevleke na podlago. Kljub temu, da so prejšnje raziskave pokazale negativen vpliv spojinske plasti na obrabno odpornost trdih prevlek ([8], [10], [11], [18] in [19]), pa rezultati te raziskave kažejo, da strnjena spojinska plast lahko deluje kot vmesna trda plast, ki močno izboljša drsno obrabno odpornost trdih zaščitnih prevlek (sl. 8).

Pozitiven vpliv nitiranja na drsno obrabno odpornost trdih zaščitnih prevlek je moč razložiti na naslednjih dveh primerjavah. Prvič, spojinska plast na nitirani površini močno izboljša obrabno odpornost raziskovanih trdih prevlek. Razlika v obrabni odpornosti je v skladu z razliko v trdoti podlage ter dejstvom, da trša podlaga zagotavlja boljšo podporo trdi prevleki. Pri prenosu obremenitve večja trdota podlage

compound layer formed during nitriding has a negative effect on the coating-to-substrate adhesion and therefore reduces the durability of the wear protective coating ([8], [10], [11], [18] and [19]). However, results of this investigation have shown that when the compound layer has a relatively dense and uniform structure it can actually act as an intermediate hard layer, leading to a superior sliding-wear resistance of the hard coatings (Fig. 8).

The positive effect of nitriding on the sliding-wear properties of hard coatings can be explained by considering the following two comparisons. First, a change of the nitriding parameters to produce a compound layer significantly improved the coating wear resistance. This difference in tribological behaviour is consistent with the difference in the hardness of the two substrates and the premise that a harder substrate is able to provide a more effective

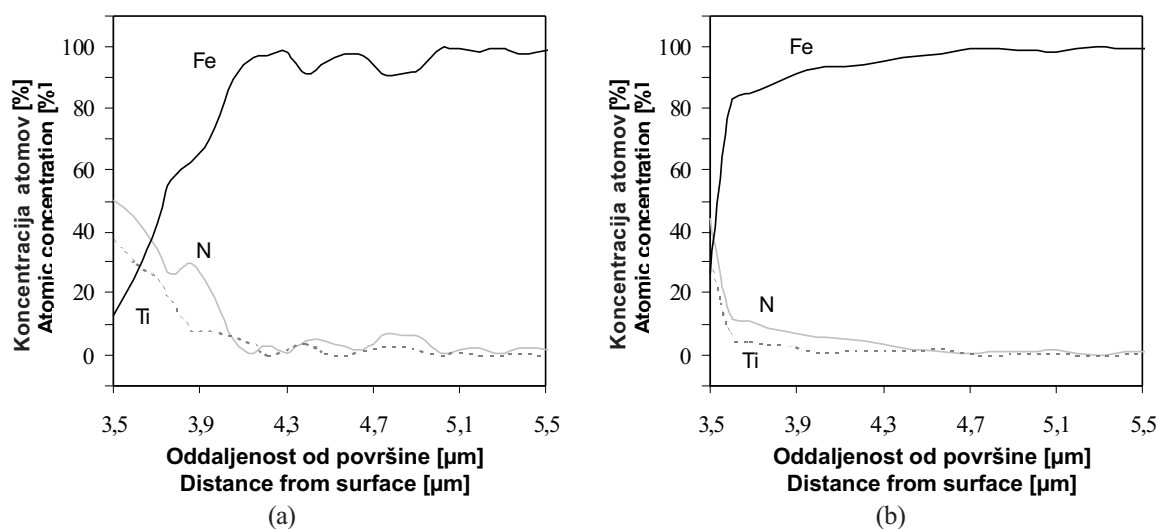


Sl. 8. Stopnja obrabe raziskovanih prevlek v odvisnosti od kemotermičnega izboljšanja podlage (preglednica 1)

Fig. 8. Wear rate of the investigated coatings as a function of substrate treatment (Table 1)

zniža verjetnost njene deformacije, zniža pa tudi gradient trdote in napetosti na meji med prevleko in podlago, kar poveča obstojnost prevleke. Drugič, kljub temu, da je bila s kaljenjem (postopek C, preglednica 1) in nitriranjem v plazmi z majhnim deležem dušika (postopek B, preglednica 1) dosežena približno enaka trdota podlage, pa nitriranje v plazmi zagotavlja boljšo obrabno odpornost trdih prevlek. Ta ugotovitev je v skladu z dejstvom, da poleg trdote podlage oprijemljivost prevleke igra zelo pomembno vlogo. V primeru nitriranega jekla je analiza AES (sl. 9) pokazala postopno zmanjšanje koncentracije N in Ti na meji med prevleko in podlago, medtem ko je pri kaljeni podlagi opažen takojšen padec koncentracije Ti (prevleka DLC) oz. N in Ti (prevleki TiN in TiAlN).

coating support. Substrate hardening reduces sub-surface plastic deformation and a hardness gradient at the coating/substrate interface, thus improving the coating's durability. Second, although hardening (treatment C, Table 1) and plasma nitriding in a nitrogen-poor atmosphere (treatment B, Table 1) give almost the same surface hardness, plasma nitriding of the substrate led to an improved sliding-wear resistance for the investigated coatings. This observation is consistent with the finding that in addition to the hardness of the substrate, the adhesion also plays a very important role. AES analysis (Fig. 9) of hard-coated plasma-nitrided steel showed a gradual decrease in the Ti and N concentrations from the interface into the substrate, while a rapid drop in Ti (DLC) or Ti and N (TiN and TiAlN) at the coating/substrate



Sl. 9. Porazdelitev koncentracije Fe, Ti in N v (a) kaljenem in (b) nitriranem jeklu 42CrMo4 (postopek B), prekritim s trdo zaščitno prevleko TiN

Fig. 9. AES concentration depth profiles of Fe, Ti and N measured from the interface for TiN coated (a) hardened and (b) plasma nitrided substrate (treatment B)

Na podlagi rezultatov analize AES je moč sklepati, da vmesna plast Ti reagira z dušikom v nitrirani podlagi ter na ta način izboljša adhezijo med prevleko in podlago [11].

### 3 SKLEP

Uspešna uporaba trdih zaščitnih prevlek v mehanskih sistemih je odvisna od oprijemljivosti prevleke na podlago ter zmožnosti podlage, da daje prevleki zadostno podporo. Nitriranje v plazmi poveča trdoto podlage, s čimer se zmanjša deformacija podlage pri obremenitvi in izboljša nosilna zmožnost sestave. Prek interdifuzije dušika v nitrirani podlagi in Ti v vmesni plasti pa se izboljša tudi oprijemljivost prevleke na podlago.

Z natančno vodenim procesom nitriranja v plazmi je moč doseči nastanek strnjene spojinske plasti. V primeru površin, prekritih s trdo zaščitno prevleko, lahko strnjena spojinska plast deluje kot vmesna trda prevleka. Ta zniža gradient trdote in napetosti na meji med prevleko in podlago ter s tem privede do bolj ugodnega napetostno-deformacijskega polja. Tako se poleg izboljšane obrabne odpornosti površine izognemo potrebi po dodatni mehanski obdelavi nitrirane površine pred nanosom trde zaščitne prevleke.

interface was observed in the case of the hardened substrate. Results of AES analysis suggest that the Ti interlayer reacts with the nitrogen in the nitrated substrate and therefore improves the adhesion between the coating and the substrate [11].

### 4 CONCLUSION

Satisfactory performance of a coated component depends on the coating-to-substrate adhesion and the ability of the substrate to support the coating. By increasing the hardness of the steel substrate, plasma nitriding improves the load-carrying capacity of the substrate. In addition, plasma nitriding also improves coating-to-substrate adhesion, most probably through the inter-diffusion between the iron nitride at the nitrated surface and the thin Ti interlayer.

A uniform, dense and well-adhered compound layer can be obtained by precise control of the nitriding process. In the case of hard-coated components such a compound layer can act as an intermediate hard layer, which reduces large hardness differences between the coating and the substrate and consequently leads to a favourable strain-stress field and improved sliding-wear properties of the composite. Therefore, with a precisely controlled plasma-nitriding process the need for additional polishing or grinding of the nitrated surface prior to coating deposition can be eliminated.

### 4 LITERATURA

### 4 REFERENCES

- [1] Bhushan, B., B.K. Gupta (1991) Handbook of tribology; materials, coatings and surface treatments, *McGraw-Hill*, New York.
- [2] Matthews, A., K. Holmberg, S. Franklin (1993) A methodology for coating selection. Thin films in tribology, *Tribology Series 25, Elsevier Science*, Amsterdam, 429-439.
- [3] Bell, T., H. Dong, Y. Sun (1998) Realising the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, Volume 31, 127-137.
- [4] Holmberg, K., H. Ronkainen, A. Matthews (1993) Wear mechanisms of coated sliding surfaces. Thin Films in Tribology, *Tribology Series 25, Elsevier Science*, Amsterdam, 399-407.
- [5] Bell, T. (1992) Towards designer surfaces. *Industrial Lubrication and Tribology*, Volume 44, 3-11.
- [6] Bell, T., K. Mao, Y. Sun (1998) Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance. *Surface and Coating Technology*, Volume 108-109, 360-368.
- [7] Kessler, O.H., F.T. Hoffmann, P. Mayr, P. (1998) Combinations of coating and heat treating processes: establishing a system for combined processes and examples. *Surface and Coating Technology*, Volume 108-109, 211-216.
- [8] Höck, K., H.J. Spies, B. Larisch, G. Leonhardt, B. Buecken (1996) Wear resistance of prenitrided hardcoated steels for tools and machine components. *Surface and Coating Technology*, Volume 88, 44-49.
- [9] Meletis, E.I., A. Erdemir, G.R. Fenske (1995) Tribological characteristics of DLC films and duplex plasma nitriding/DLC coating treatments. *Surface and Coating Technology*, Volume 73, 39-45.
- [10] Spies, H.J., B. Larisch, K. Höck, E. Broszeit, H.J. Schröder (1995) Adhesion and wear resistance of nitrated and TiN coated low alloy steels. *Surface and Coating Technology*, Volume 74/75, 178-182.
- [11] Damaschek, R., I.L. Strydom, H.W. Bergmann (1997) Improved adhesion of TiN deposited on prenitrided steels. *Surface Engineering*, Volume 13, 128-132.
- [12] Podgornik, B., J. Vižintin, V. Leskovšek (1999) Wear properties of induction hardened, conventional plasma nitrated and pulse plasma nitrated AISI 4140 steel in dry sliding conditions. *Wear*, Volume 232, 231-242.

- [13] Navinšek, B. (1993) Trde zaščitne prevleke, *Inštitut Jožef Stefan*, Ljubljana.
- [14] Oliver, W.C., G.M. Pharr (1992) An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Material Research*, Volume 7, 1564-1583.
- [15] LSRH-REVETEST (1981) Gebrauchsanleitung zur LSRH Kratz-Test Apparatur, *CSEM Neuchatel*, Suisse.
- [16] Podgornik, B., J. Vižintin, V. Leskovšek (1999) Tribološke lastnosti jekla AISI 4140 nitriranega v plazmi in pulzirajoči plazmi. *Strojniški vestnik*, Volume 45, No. 5, 199-209.
- [17] Bader, M., H.J. Spies, K. Höck, E. Broszeit, H.J. Schröder (1998) Properties of duplex treated (gas-nitriding and PVD-TiN, -Cr<sub>2</sub>N) low alloy steel. *Surface and Coating Technology*, Volume 98, 891-896.
- [18] D'Haen, J., C. Quaeqhaegens, L.M. Stals, M. Van Stappen (1993) An interface study of various PVD TiN coatings on plasma-nitrided austenitic stainless steel AISI 304. *Surface and Coating Technology*, Volume 61, 194-200.
- [19] Baek, W.S., S.C. Kwon, S.R. Lee, J.J. Rha, K.S. Nam, J.Y. Lee (1999) A study of the interfacial structure between the TiN film and the iron nitride layer in a duplex plasma surface treatment. *Surface and Coating Technology*, Volume 114, 94-100.
- [20] Donnet, C., M. Belin, J.C. Auge, J.M. Martin, A. Grill, V. Patel (1994) Tribochemistry of diamond-like carbon coatings in various environments. *Surface and Coating Technology*, Volume 68-69, 626-631.
- [21] Erdemir, A., C. Bindal, G.R. Fenske, C. Zuiker, P. Wilbur (1996) Characterization of transfer layers forming on surfaces sliding against diamond-like carbon. *Surface and Coating Technology*, Volume 86-87, 692-697.
- [22] Liu, Y., A. Erdemir, E.I. Meletis (1996) An investigation of the relationship between graphitization and frictional behaviour of DLC coatings. *Surface and Coating Technology*, Volume 86-87, 564-568.
- [23] Ronkainen, H., S. Varjus, K. Holmberg (1999) Friction and wear performance of a-C:H films in a wide normal load and sliding velocity range. *Tribologia*, Volume 18, 3-13.

Naslov avtorjev: dr. Bojan Podgornik  
prof.dr. Jože Vižintin  
Fakulteta za strojništvo  
Univerza v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Authors' Address: Dr. Bojan Podgornik  
Prof.Dr. Jože Vižintin  
Faculty of Mechanical Eng.  
University of Ljubljana  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 28.11.2000  
Received:

Sprejeto: 27.6.2001  
Accepted:

## Obrabna odpornost konstrukcijskega jekla, nitriranega v plazmi

### Wear Resistance of Plasma Nitrided Structural Steel

Bojan Podgornik · Jože Vižintin · Vojteh Leskovšek

*V raziskavi je bila določena obrabna odpornost konstrukcijskega jekla 42CrMo4, nitriranega v plazmi in pulzirajoči plazmi, pri čemer je bilo kaljenje uporabljeno kot primerjava. Raziskana je bila tako drsna obrabna odpornost kakor tudi odpornost proti jamičenju, in to za pogoje mazanega dotika. Vpliv nitriranja je bil določen z uporabo metalografije, merjenjem mikrotrdote in zaostalih napetosti ter raziskavo topografije površine. Drsna obrabna odpornost je bila določena na napravi "valjček-plošča", medtem ko je bila odpornost proti jamičenju določena na napravi za preskušanje zobnikov.*

*Rezultati raziskave so pokazali, da se obrabna odpornost konstrukcijskega jekla, še posebej odpornost proti jamičenju, po nitriranju v plazmi občutno izboljša. Primerjava obrabne odpornosti raziskovanega jekla, nitriranega v plazmi in nitriranega v pulzirajoči plazmi, pa je pokazala zelo enakovredno obrabno odpornost.*

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: nitriranje plazemsko, nitriranje plazemsko pulzno, jamičenje, drsenje, obraba)**

*In our study wear resistance of plasma and pulse plasma nitrided 42CrMo4 steel was evaluated under lubricated sliding and pitting wear conditions, where hardened samples were used as a reference. The nitrided samples were characterised using metallography, microhardness, residual stress and surface examination techniques. After surface treatment, lubricated sliding wear tests were performed on a pin-on-disc machine in which surface treated pins were loaded against hardened ball bearing steel discs. Pitting wear tests were performed on back-to-back gear test rig.*

*Experimental results indicate, that the wear resistance of 42CrMo4 steel, especially pitting wear resistance can be greatly improved by means of plasma and pulse plasma nitriding. However, plasma and pulse plasma nitrided 42CrMo4 steel showed very similar sliding and pitting wear resistance.*

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: plasma nitriding, pulse plasma nitriding, pitting, sliding, wear)**

#### 0 UVOD

Za izboljšanje obstojnosti zobnikov se uporabljajo različni kemotermični postopki poboljšanja, to so ogličenje, plamensko ali indukcijsko kaljenje ter plinsko nitriranje. Kljub temu, da je ogličenje eden od najpogostejših in tudi najbolj učinkovitih postopkov izboljšanja, ima svoje omejitve pri izboljšanju zobnikov velikih izmer [1]. Na drugi strani kaljenje z visokih temperatur avstenitizacije pogosto privede do nepričakovanih in nezaželenih deformacij zobnikov [2], pri postopku običajnega plinskega nitriranja pa pride do nastajanja večfazne spojinske plasti na površini [3]. Spojinska ali bela plast, nastala med postopkom nitriranja, je krhka in drobljiva, kar lahko privede zaradi zaostalih napetosti do njenega kršenja med samim delovanjem

#### 0 INTRODUCTION

Gear manufacturers have employed techniques such as carburizing, flame hardening, induction hardening, and gas nitriding to increase the strength of gearing components. Although carburizing is one of the most common and effective surface-hardening methods used to improve the load-carrying capacity of gears, its use in the production of large gears has been very problematic [1]. Another method, known as quench hardening, which involves quenching from a high austenitizing temperature, often results in unpredictable levels of tooth deflection, helix angle change, and overall distortion [2]. During conventional gas-and-bath nitriding, a multiphase compound layer is formed on the surface [3]. This compound layer contains high residual stresses, which makes the layer friable and brittle. Such

zobnikov. Zaradi tega je spojinska plast nezaželena in jo je treba pred uporabo elementov odstraniti z delovne površine [4].

Eden od novejših kemotermičnih postopkov, ki se uporablja za izboljšanje lastnosti zobnikov, je nitriranje v plazmi ([5] in [6]). Nitriranje v plazmi je ekološko čist proces, ki omogoča natančno in popolnoma avtomatizirano vodenje postopka difuzije dušika, kar pomeni nitriranje površin brez nastanka "škodljive" spojinske plasti [7]. Poleg tega, zaradi uporabe nižjih temperatur, nitriranje v plazmi ne povzroča deformacij elementov po izboljšanju [8], s čimer odpadejo zahteve po dodatni mehanski obdelavi delovne površine. Tehnološko novejši postopek nitriranja, nitriranje v pulzirajoči plazmi omogoča uporabo plazme zelo majhnih moči, kar zagotavlja bolj enakomerno porazdelitev temperatur, hkrati pa preprečuje pregrevanje površine. Z uporabo nitriranja v pulzirajoči plazmi je prav tako mogoče izboljšati različne vrste jekel [9].

Namen predstavljene raziskave je bil določiti obrabno odpornost jekla 42CrMo4, nitriranega v plazmi ter pulzirajoči plazmi pri drsenju in kotaljenju. Za primer uporabe nitriranja pri zobnikih je bilo treba narediti tribološko in ekonomsko oceno ustreznosti zamenjave postopka indukcijskega kaljenja s postopkom nitriranja v plazmi.

## 1 PRESKUSI

### 1.1 Priprava preskušancev

Preskušance smo izdelali iz jekla za izboljšanje in nitriranje 42CrMo4 (0,5%C, 1,0%Cr, 0,2%Mo), ki je bilo izboljšano na trdoto 300 HV<sub>0,5</sub>. Pred kemotermično obdelavo so bili vsi preskušanci brušeni ( $R_a \approx 0,35 \mu\text{m}$ ) ter razmaščeni.

Kemotermična obdelava preskušancev je obsegala nitriranje v plazmi, nitriranje v pulzirajoči plazmi ter postopek kaljenja (temperatura popuščanja 250 °C), ki smo ga uporabili kot primerjavo. Pogoji nitriranja so prikazani v preglednici 1 [10]. V vseh primerih je bila globina nitriranja 0,3 mm. Sami parametri nitriranja so bili izbrani tako, da je bil preprečen nastanek spojinske plasti na površini preskušanca.

### 1.2 Protiobrabni preskusi

Drsno obrabno odpornost kemotermično izboljšanega jekla 42CrMo4 smo določili na napravi "valjček-plošča". Pri tem sta kemotermično obdelana valjčka pritiskala ob rotirajočo ploščo (sl. 1), narejeno iz orodnega jekla 90MnCrV8, izboljšano na trdoto 700 HV<sub>0,5</sub> in brušeno na  $R_a \approx 0,4 \mu\text{m}$ . Drsne protiobrabne preskuse smo izvedli pri sobni temperaturi (20 °C) in relativni vlažnosti zraka ~ 50%, drsni hitrosti 0,1 in 1 m/s ter obremenitvi 60 in 100 N. Za mazivo smo uporabili neaditivirano reduktorsko olje ISI VG68.

a layer is clearly undesirable and hence it has to be removed from the contact surfaces before the gears can be used [4].

Plasma nitriding is one of a new generation of heat-treatment processes that are being employed to improve the performance characteristics of gears ([5] and [6]). Plasma nitriding permits a fully automated and controlled nitrogen-diffusion process, which makes it possible to perform nitriding without any compound-layer formation [7]. The low temperatures used in plasma nitriding and the absence of any need to quench also ensure the minimum amount of distortion and dimensional variations [8]. Consequently, any subsequent grinding operations can be reduced or even eliminated by using a plasma-nitriding process. More advanced pulsed-plasma technology allows the use of the minimum plasma power for the process, which prevents overheating and ensures a uniform temperature distribution. Furthermore, almost every type of steel can be nitrided using pulsed-plasma technology [9].

The aim of the present investigation was to determine the sliding- and pitting-wear resistance of plasma-nitrided and pulsed-plasma-nitrided 42CrMo4 steel, and to perform a tribological and economic evaluation of the change from induction-hardened to plasma-nitrided gears.

## 1 EXPERIMENTAL

### 1.1 Sample preparation

The material used in this investigation was commercial 42CrMo4 structural steel for hardening and nitriding (0,5%C, 1,0%Cr, 0,2%Mo). Tempered specimens (300 HV<sub>0,5</sub>) were ground ( $R_a \approx 0,35 \mu\text{m}$ ) and degreased before plasma nitriding.

Plasma nitriding in both conventional and pulsed-plasma modes was carried out with a precise control of all the process parameters to form a nitrided case with a depth of 0.3 mm and a surface structure without any compound layer [10] (Table 1). One group of specimens was also hardened (oil quenched and tempered at 250°C) and used as a reference.

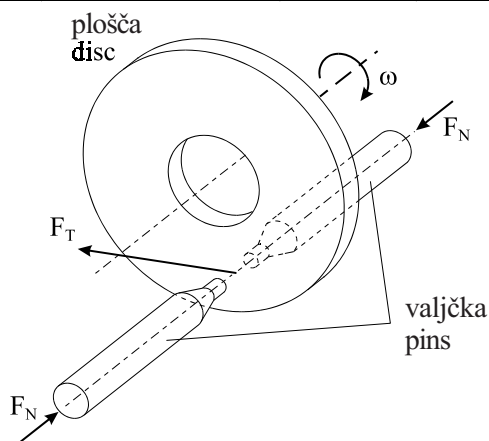
### 1.2 Wear tests

The sliding-wear resistance of the surface-treated 42CrMo4 steel was determined using a pin-on-disc machine. The pins were loaded against a rotating 90MnCrV8 steel disc (Fig. 1), hardened to 700 HV<sub>0,5</sub> and ground to an average roughness value of ~0.4 μm. Lubricated sliding-wear tests (additive-free ISI VG68 oil) were carried out at room temperature (~20°C) and a relative humidity of about 50%, with sliding speeds of 0.1 and 1 m/s and normal loads of 60 and 100 N.

Preglednica 1. Postopki kemotermičnega izboljšanja in njihovi parametri

Table 1. Details of the surface treatment processes

Postopek Process	Plinska mešanica Gas mixture	Temp. °C	Čas Time h	Tlak Pressure kPa	Utrip Pulse s
kaljenje hardening	A kalilno olje quenched oil	870/250	2/1	-	-
nitiranje v plazmi plasma nitriding	B 99,4%H <sub>2</sub> , 0,6%N <sub>2</sub>	540	17	0,254	-
nitiranje v utrip. plazmi pulse plasma nitriding	C 99,4%H <sub>2</sub> , 0,6%N <sub>2</sub>	540	17	0,254	0,48/0,02

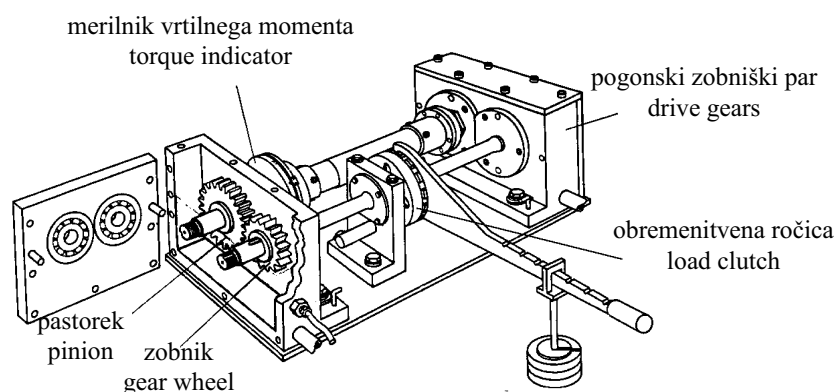


Sl. 1. Shematičen prikaz naprave "valjček-plošča"

Fig. 1. Pin-on-Disc test rig

Odpornost proti jamičenju smo določili na napravi za preskušanje zobnikov NPZ inštituta FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebe), prikazani na sliki 2 [11]. Za preskus smo uporabili reduktorsko olje ISI VG68 ter standardne zobnike tipa C. Pri posameznem preskusu sta bila oba zobnika v paru izboljšana po enakem kemotermičnem postopku (pregl. 1). Preskus za jamičenje je potekal v dveh fazah. Po dvehurnem vtekanju v peti stopnji (navor 94,1 Nm) je sledilo preskušanje v osmi stopnji (navor 239,3 Nm), in to dokler se ni pojavila poškodba jamičenja. Poškodba jamičenja je definirana kot poškodba več kot 4 odstotkov površine enega zobnega boka pastorka.

Pitting-wear tests were performed on back-to-back gear test rig BGTR (Fig. 2), designed by FZG institute (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebe), and using C-type gears [11]. The same surface-treatment process was used for the pinion and the gear wheel (Table 1). The surface-treated gears were lubricated with ISI VG 68 formulated gear oil. The pitting-wear tests were carried out in a two-step process. After a running-in sequence (2 h at 94.1 Nm - stage 5) the test was run at 239.3 Nm torque (stage 8) until pitting failure occurred. The failure criterion was the occurrence of more than 4% of pitted area on one pinion tooth.



Sl. 2. Shematičen prikaz NPZ

Fig. 2. BGTR gear test rig



## 2 REZULTATI

## 2 RESULTS

## 2.1 Lastnosti površine

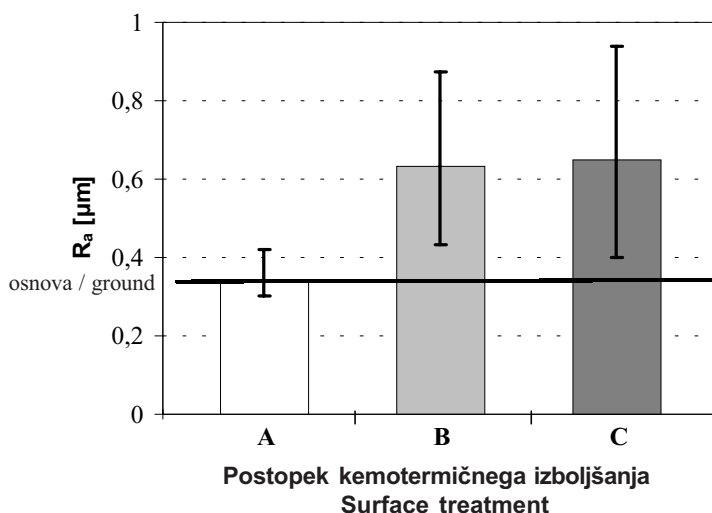
Z nitriranjem sta se povečali tako hrapavost površine kakor tudi mikrotrdota raziskovanega jekla [12]. Spremembo hrapavosti površine smo izmerili z dotikalnim merilnikom hrapavosti. Srednje odstopanje profila površine se je po nitriranju z začetnih  $0,35 \mu\text{m}$  povečalo na  $\sim 0,65 \mu\text{m}$ . Za oba načina nitriranja, nitriranje v plazmi in nitriranje v pulzirajoči plazmi, smo izmerili podobne vrednosti srednjega odstopanja profila (sl. 3).

Rezultati meritev mikrotrdote površine kemotermično izboljšane jekla 42CrMo4 so prikazani na sliki 4. V primerjavi s kaljenim jeklom s trdoto površine  $\sim 600 \text{HV}_{0,5}$ , se mikrotrdota površine po nitriranju v plazmi ali pulzirajoči plazmi poveča na  $\sim 700 \text{HV}_{0,5}$  (sl. 4). Zaostale napetosti kemotermično izboljšane jekla

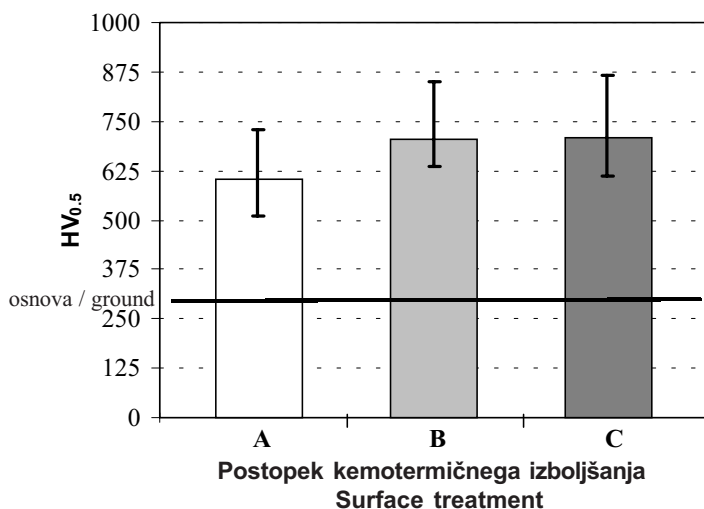
## 2.1 Surface properties

After nitriding, both the average roughness value and the maximum peak-to-valley height increased in comparison with the original ground surface [12]. The average roughness of the original surface changed from  $0,35 \mu\text{m}$  to approximately  $0,65 \mu\text{m}$ , measured for conventional and pulsed-plasma-nitrided specimens (Fig. 3).

The characteristic surface microhardness of surface-treated 42CrMo4 steel is shown in Fig. 4. Compared to hardening with the highest obtainable surface hardness of  $\sim 600 \text{HV}_{0,5}$  and a constant hardness throughout the entire range from the surface to the centre of the specimen, plasma nitriding increased the surface hardness of the investigated steel to approximately  $700 \text{HV}_{0,5}$ . For all the surface-treatment



Sl. 3. Hrapavost površine kemotermično izboljšane jekla 42CrMo4 (razpredelnica 1)  
Fig. 3. Surface roughness of treated 42CrMo4 steel (Table 1)



Sl. 4. Trdota površine kemotermično izboljšane jekla 42CrMo4 (razpredelnica 1)  
Fig. 4. Surface microhardness of treated 42CrMo4 steel (Table 1)

42CrMo4 smo izmerili z metodo vrtnanja luknjice [13]. Rezultati meritev zaostalih napetosti so pokazali, da vsi raziskovani postopki kemotermičnega izboljšanja površine povzročijo nastanek tlačnih zaostalih napetosti v materialu. S kaljenjem jekla smo dosegli enakomerno porazdelitev zaostalih napetosti z globino, z največjo vrednostjo ~ 50 MPa. Po nitriranju v plazmi oz. pulzirajoči plazmi pa smo dosegli precej večje vrednosti zaostalih napetosti, katerih največja vrednost (~ 220 MPa) je bila izmerjena 120 do 150  $\mu\text{m}$  pod površino, kar prikazuje slika 5.

## 2.2 Protiobrabna odpornost

### 2.2.1 Drсни preskus

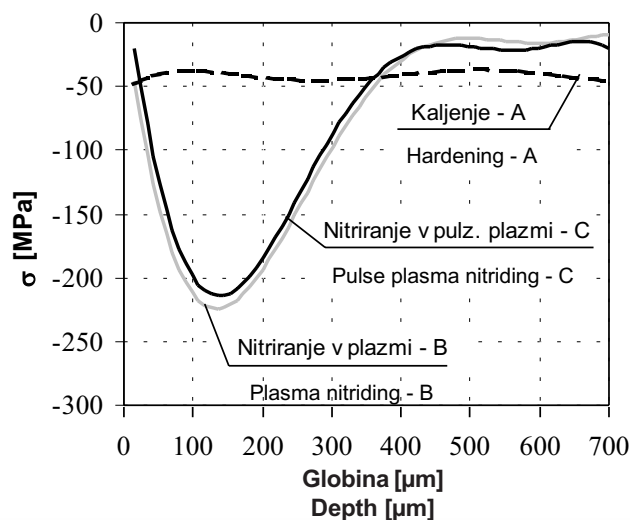
Rezultati preskušanja na napravi "valjček-plošča" kažejo, da je koeficient trenja raziskovanega jekla praktično neodvisen od uporabljenega postopka kemotermičnega izboljšanja (sl. 6). Pri obremenitvi 60 N je bila povprečna vrednost koeficienta trenja  $\sim 0,1$ . S povečanjem obremenitve

processes used the residual stresses, measured by the hole-drilling method [13], were found to be compressive. In the case of hardening, a uniform stress field was observed with a maximum residual stress of approximately 50 MPa. Nitriding gives much higher residual stresses with a maximum of ~220 MPa observed approximately 120  $\mu\text{m}$  below the surface (Fig. 5). As in the case of surface roughness and surface microhardness, very similar residual stress distributions were caused by conventional and pulsed-plasma nitriding, as shown in Fig. 5.

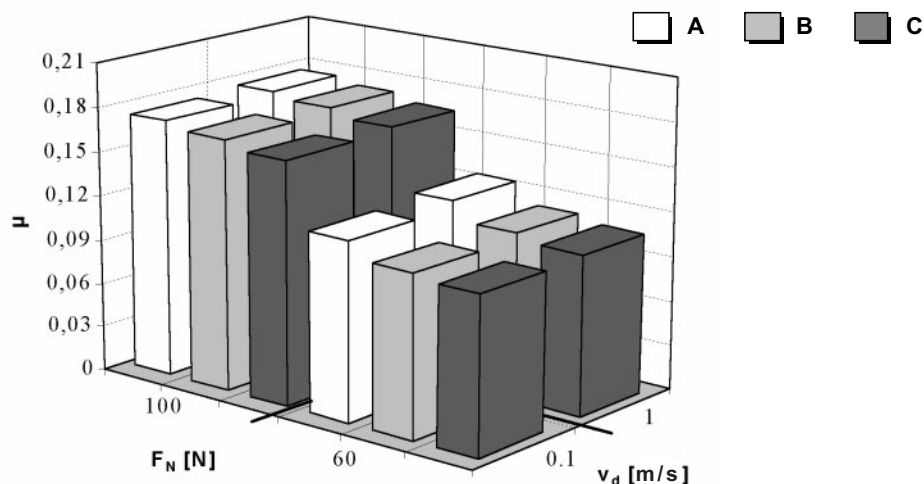
## 2.2 Wear properties

### 2.2.1 Sliding-wear test

From the pin-on-disc tests it was found that under all the test conditions the coefficient of friction was largely independent of the differences among the surface treatments used in this study, as shown in Fig. 6. For the case of the low load (60N) the steady-state coefficient of friction, measured at the end of the test, was



Sl. 5. Porazdelitev zaostalih napetosti za različne postopke kemotermične obdelave (preglednica 1)  
Fig. 5. Residual stress distribution as a function of surface treatment (Table 1)



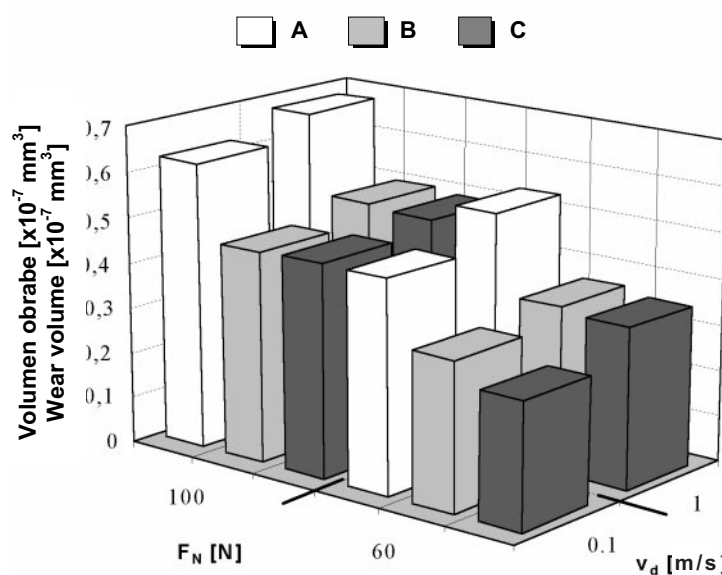
Sl. 6. Povprečna vrednost koeficienta trenja v odvisnosti od drsne hitrosti in obremenitve  
Fig. 6. Average coefficient of friction as a function of sliding speed and load

na 100 N se je tudi koeficient trenja povečal na 0,17, kar je moč pripisati povečanemu številu kovinskih dotikov. Primerjava rezultatov preskušanja pri drsni hitrosti 0,1 in 1 m/s pa ni pokazala nikakršnih razlik v koeficientu trenja, kar je razvidno s slike 6.

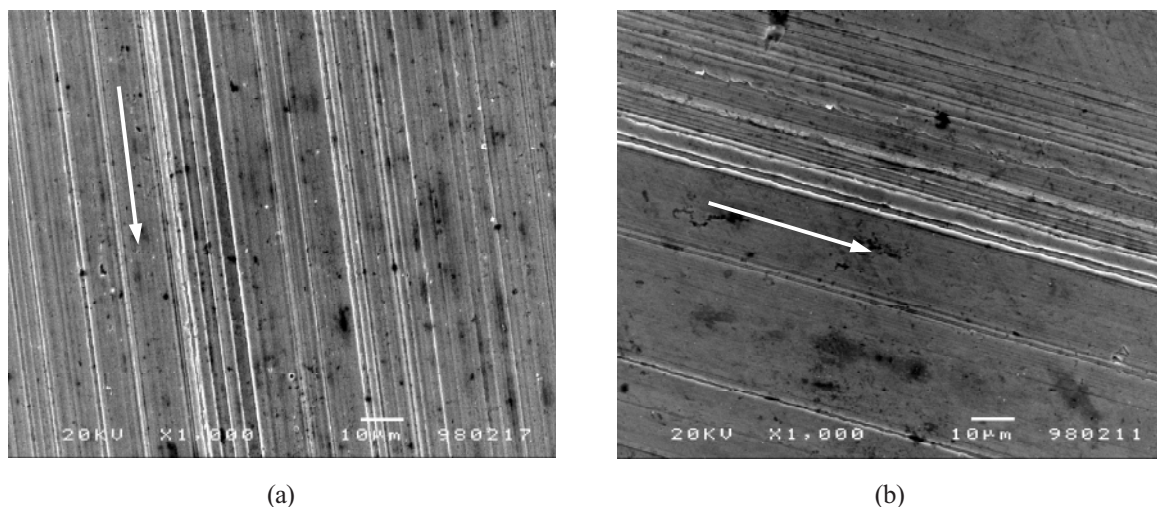
Na sliki 7 je prikazana prostornina obrabe kemotermično izboljšanih valjčkov po 2000 m drsenja. V primerjavi s kaljenjem, nitriranje v plazmi ali pulzirajoči plazmi izboljša drsno obrabno odpornost jekla 42CrMo4 ([12], [14] in [15]), ki se je, glede na razmere pri preskušanju, izboljšala celo do 40 odstotkov. Primerjava nitriranja v plazmi ter nitriranja v pulzirajoči plazmi ni pokazala nikakršne razlike v obrabni odpornosti raziskovanega jekla (sl. 7).

~0.1. Increasing the load (100N) led to a higher coefficient of friction (~0.17), which can be attributed to an increased number of steel-steel contacts. However, no difference in the coefficient of friction could be observed between the two sliding speeds of 0.1 and 1 m/s used (Fig. 6).

Figure 7 shows the wear volume of surface-treated pins as a function of surface treatment, test load and sliding speed after 2000m of lubricated sliding. Depending on the testing conditions, plasma and pulsed-plasma nitriding were found to improve the sliding-wear resistance of 42CrMo4 steel by up to 40% when compared to hardening, which is in agreement with earlier results ([12], [14] and [15]). However, a comparison of plasma and pulsed-plasma nitriding showed no noticeable difference in the wear of the conventional and pulsed-plasma-nitrided pins, as shown in Fig. 7.



Sl. 7. Prostornina obrabe v odvisnosti od drsne hitrosti in obremenitve  
Fig. 7. Wear volume of surface-treated pins as a function of sliding speed and normal load



Sl. 8. Obrabljena površina (a) kaljenega valjčka in (b) valjčka, nitriranega v plazmi po drsnem preskusu pri  $v_d = 1$  m/s,  $F_N = 60$  N, drsna pot 2000m

Fig. 8. Worn surface of (a) hardened and (b) plasma-nitrided pin after a lubricated sliding-wear test ( $v_s = 1$  m/s,  $F_N = 60$  N, sliding distance of 2000m)

Mikroskopija obrabljenih površin je pokazala, da je bil, ne glede na razmere pri preizkušanju in kemotermično obdelavo površine, prevladujoč obrabni mehanizem, abrazija površine (sl. 8a in 8b).

## 2.2.2 Preskus jamičenja

Dotikalne napetosti preskušanih zobnikov (točka kotaljenja C) smo izračunali z uporabo Hertzove teorije homogenih elastičnih teles [16], pri čemer smo upoštevali dejanski koeficient trenja, izmerjen na napravi "valjček-plošča" (drsna hitrost 1 m/s in obremenitev 60 N), realno porazdelitev zaostalih napetosti ter dejanski obremenitveni sestav. Ker Hertzova porazdelitev napetosti velja le za homogeno elastično telo, ki ne vsebuje nikakršnih zaostalih napetosti, je pri napetostnem izračunu dejanskih elementov treba upoštevati tudi polje zaostalih napetosti. Pri tem se predpostavlja, da so zaostale napetosti v vzdolžni in obodni smeri enake ( $\sigma_{rx} = \sigma_{ry}$ ), pravokotno na površino pa minimalne, zaradi česar jih lahko zanemarimo ( $\sigma_{rz} \approx 0$ ) [17]. Dejanska porazdelitev dotikalnih napetosti, prikazana na sliki 9, je bila izračunana s superpozicijo zaostalih ter koordinatnih napetosti.

Pri nitriranih zobnikih ležijo največje strižne napetosti, vrednosti  $0,439 \cdot p_H$ , približno 0,12 mm pod površino, torej znotraj nitrirane plasti (sl. 9). Seveda bi bilo treba v primeru močno obremenjenih zobnikov uporabiti daljše čase nitriranja, s čimer bi dosegli večje globine nitriranja ter ustrezno odpornost materiala ([5] in [18]).

Rezultati preskušanja jamičenja so prikazani na sliki 10. V primerjavi s kaljenimi zobniki

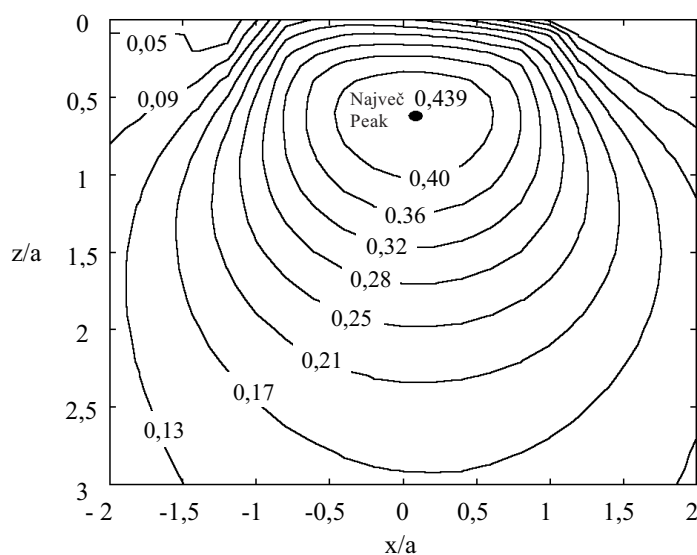
An SEM analysis of the worn surfaces showed that as a result of the boundary lubrication conditions, abrasive wear was the prevailing wear mechanism (Fig. 8a and 8b).

## 2.2.2 Pitting-wear test

The contact stresses of the testing gears (pitch point C) were calculated using Hertz equations [16], taking into account the coefficient of friction measured on the pin-on-disc machine ( $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,  $F_N = 60 \text{ N}$ ), the real distribution of residual stresses as well as the load conditions and the geometry of the testing gears. The Hertz stress distribution of a homogeneous body is only valid when no internal stresses are present in the material, therefore it is absolutely necessary to take into account the residual stresses when calculating the stressing of real machine elements, i.e. gears. Residual stresses in the axial and tangential directions are assumed to be equal ( $\sigma_{rx} = \sigma_{ry}$ ), while the residual stresses normal to the surface are very low when compared to the stresses at the surface, for this reason residual stresses in the  $z$  direction can be neglected ( $\sigma_{rz} = 0$ ) [17]. Actual stress calculations, shown in Fig. 9, were made by the additive superposition of the residual stresses on the associated coordinate stresses.

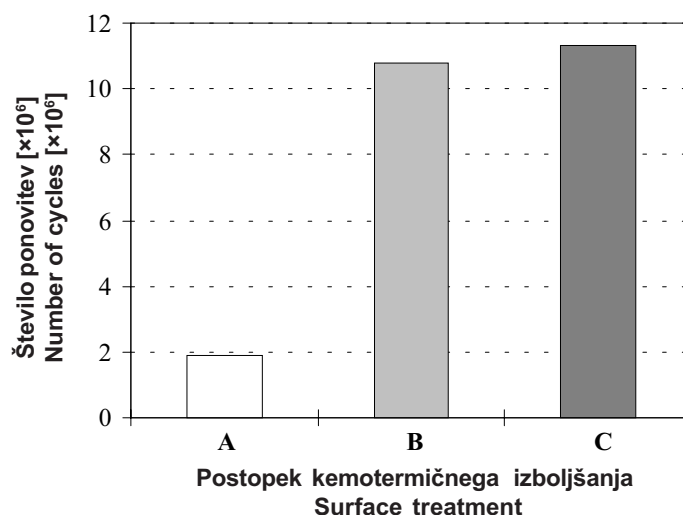
As shown in Fig. 9, the maximum principal shear stresses ( $0,439 \cdot p_H$ ) of plasma-nitrided and pulsed-plasma-nitrided gears are located approx. 0.12 mm below the surface, which is inside the nitrided zone. However, in the case of highly loaded gears longer nitriding times should be used in order to obtain larger nitriding depths and adequate strength of the material ([5] and [18]).

The results of the pitting-wear tests are shown in Fig. 10. Conventional plasma-nitrided and



Sl. 9. Porazdelitev strižnih napetosti ( $\tau/p_H$ ) pri zobnikih nitriranih v plazmi ( $\mu = 0,1$ ,  $T = 239,3 \text{ Nm}$ ,  $a_H = 0,20 \text{ mm}$ ,  $p_H = 1125 \text{ MPa}$ )

Fig. 9. Principal shear stress distribution ( $\tau/p_H$ ) of plasma-nitrided gears ( $\mu = 0,1$ ,  $T = 239,3 \text{ Nm}$ ,  $a_H = 0,20 \text{ mm}$ ,  $p_H = 1125 \text{ MPa}$ )



Sl. 10. Odpornost proti jamičenju kemotermično izboljšanih zobnikov (razpredelnica 1)

Fig. 10. Pitting-wear resistance of surface-treated gears (Table 1)

imajo zobniki, nitrirani v plazmi ali pulzirajoči plazmi močno izboljšano odpornost proti jamičenju. Poškodba jamičenja se je v primeru kaljenih zobnikov pojavila že po ~ dveh milijonih ponovitev, medtem ko je nitriranje izboljšalo odpornost jekla 42CrMo4 za faktor 5. Kakor v primeru drsne obrabne odpornosti, dajeta nitriranje v plazmi in nitriranje v pulzirajoči plazmi zelo enakovredno odpornost raziskovanega jekla proti jamičenju (sl. 10).

pulsed-plasma-nitrided gears show greatly improved pitting-wear resistance when compared to hardened gears. In the case of hardened gears pitting failure occurred after ~2 mio cycles, while nitriding increased the pitting-wear resistance of the 42CrMo4 steel by a factor of 5. As in the case of the sliding-wear tests, plasma nitriding and pulsed-plasma nitriding gives a very similar pitting-wear resistance for the investigated steel, as shown in Fig. 10.

### 3 OBRAVNAVA

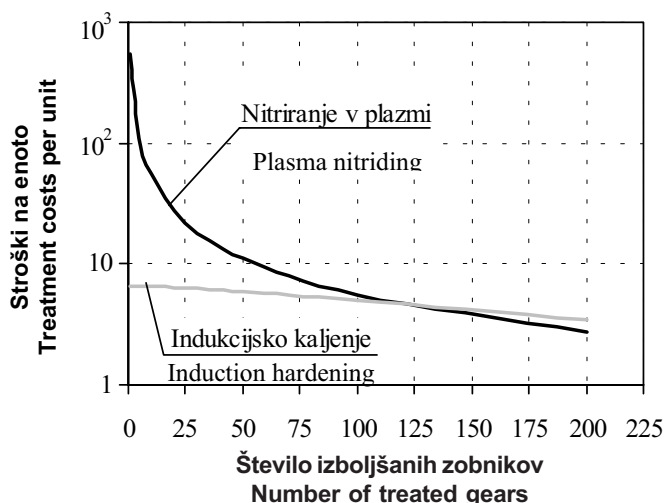
Rezultati preskušanja drsne obrabne odpornosti in odpornosti proti jamičenju kažejo, da nitriranje v plazmi kakor tudi v pulzirajoči plazmi precej izboljšata obrabno odpornost jekla 42CrMo4. V primeru abrazijske obrabe ima trdota površine odločilen vpliv na obrabno odpornost materiala. Za doseganje ustrezne odpornosti proti jamičenju in utrujanju je potrebna primerna kombinacija lastnosti površine in podlage [18]. Izboljšano protiobrabno odpornost jekla 42CrMo4, ki smo jo dosegli z nitriranjem površine, je moč pripisati kombinaciji povečane trdote površine, visokih tlačnih zaostalih napetosti, finostrukture mikrostrukture ter žilavega jedra.

Z namenom narediti celovito primerjavo postopka kaljenja ter nitriranja v plazmi, smo na primeru srednje velikega reduktorja (zunanji premer zobnika 100 mm in širina zob 20 mm), naredili tudi ekonomski izračun oziroma oceno izdelave in zamenjave poškodovanih zobnikov. Slika 11 prikazuje stroške kemotermičnega poboljšanja zobnikov v odvisnosti od uporabljenega postopka in števila izboljšanih zobnikov. Tako v primeru nitriranja kakor tudi indukcijskega kaljenja se stroški izboljšanja zmanjšujejo s številom izboljšanih zobnikov, kar je pričakovano. Pri zelo majhnih serijah so stroški indukcijskega kaljenja precej nižji od stroškov nitriranja v plazmi. S povečevanjem števila izboljšanih zobnikov (>100) pa

### 3 DISCUSSION

Sliding- and pitting-wear test results show that plasma nitriding and pulsed-plasma nitriding improve the wear resistance of 42CrMo4 steel. In abrasive wear mechanisms, the surface hardness plays a major role, however, an appropriate combination of surface and subsurface properties are necessary to obtain an appropriate fatigue resistance for the contact surfaces [18]. Therefore, the greatly improved pitting-wear resistance of the nitrided steel can be attributed to a combination of a high surface hardness, a fine surface microstructure, a tough core and high surface compressive stresses.

In order to make a complete comparison between hardened and plasma-nitrided gears, a calculation of the production and replacement costs was carried out on an example of a medium-sized gearbox (gear outer diameter 100 mm and tooth width 20 mm). Figure 11 shows the treatment costs per unit for induction-hardened and plasma-nitrided gears as a function of the number of treated gears. In both cases the treatment costs per unit decrease with the number of treated gears, however, by increasing the number of treated gears to more than 100, plasma nitriding becomes more profitable in comparison with induction hardening (Fig. 11). Another very important cost-saving advantage of the plasma-nitriding pro-



Sl. 11. Stroški kemotermečnega poboljšanja v odvisnosti od uporabljenega postopka in števila izboljšanih zobnikov

Fig. 11. Surface-treatment costs per unit as a function of surface treatment and the number of gears to be treated

postaja nitiranje v plazmi vedno bolj gospodarno upravičeno (sl. 10). Druga, tudi zelo pomembna lastnost nitiranja v plazmi, ki prav tako pomeni prihranek, je dejstvo, da je z uporabo tehnologije nitiranja v plazmi moč hkrati izboljšati zobnike različnih izmer ([1] in [5]).

Ekonomska primerjava procesa indukcijskega kaljenja in nitiranja v plazmi je temeljila na predpostavki, da je treba zaradi poškodbe jamičenja kaljene zobnike zamenjati vsaj enkrat med dobo trajanja reduktorja. Z upoštevanjem rezultatov preskušanja na napravah "valjček-plošča" in "NPZ" ter stroškov izdelave, izboljšanja in zamenjave zobnikov lahko naredimo naslednjo oceno:

- Pri majhnih serijah (<10 zobnikov) zamenjava postopka indukcijskega kaljenja z nitiranjem v plazmi ekonomsko ne bi bila upravičena. Ker pa so zobniki majhnih serij navadno posebni zobniki, pri katerih pomeni glavni strošek sama izdelava, postane izboljšanje obrabne odpornosti oziroma podaljšanje dobe trajanja zobnika glavni kriterij za izbiro postopka izboljšanja površine.
- V primeru velikih serij (>100 zobnikov) pa pomeni zamenjava indukcijskega kaljenja z nitiranjem v plazmi znižanje stroškov tudi do 100 odstotkov. Prihranek je lahko v primeru močno obremenjenih zobnikov še večji, saj imajo zobniki, nitirani v plazmi tudi do 5-krat boljšo odpornost proti jamičenju (sl. 10).

#### 4 SKLEPI

- Primerjava jekla 42CrMo4, nitiranega v plazmi in pulzirajoči plazmi, je pokazala zelo podobne vrednosti hrapavosti in mikrotrdote površine po nitiranju ter primerljivo obrabno odpornost.
- Kombinacija velike trdote površine, velikih tlačnih zaostalnih napetosti, finostrukture in

cess is the fact that gears of different sizes and shapes can be treated at the same time ([1] and [5]).

The economic comparison of the induction-hardening and plasma-nitriding processes was based on an assumption that due to pitting failure hardened gears have to be replaced at least once during the lifetime of the gearbox. In addition, an analysis of maintenance procedures in Slovenian companies revealed that in the case of a medium-sized gearbox, the replacement of a gear pair takes approximately 6 hours. By taking into account the results of the pin-on-disc and BGTR tests as well as production and replacement costs, the following evaluation can be made:

- In the case of special, small-series gears (<10) changing from induction-hardened to plasma-nitrided gears may not be profitable. However, in the case of specialised gears, the production of gears represents the main part of the overall costs and therefore the prevention of gear failure represents the main criterion for surface-treatment selection.
- In the case of larger series (>100), a change from induction-hardened to plasma-nitrided gears represents a cost reduction of up to 100%. For highly loaded gears this reduction can be even higher, since plasma nitriding gives up to 5-times better pitting-wear resistance when compared with hardened gears (Fig. 10).

#### 4 CONCLUSIONS

- A comparison of plasma-nitrided and pulsed-plasma-nitrided 42CrMo4 steel shows nearly the same surface roughness and surface microhardness values as well as very similar sliding- and pitting-wear resistance.
- A combination of a high surface hardness, a fine surface microstructure, a tough core and high

žilavega jedra, dobljena z nitriranjem, vodi do ugodnih triboloških lastnosti raziskanega jekla. Rezultati na napravi "valjček-disk" in "NPZ" kažejo, da v primerjavi s kaljenjem, nitriranje v plazmi ter v pulzirajoči plazmi močno izboljša obrabno odpornost jekla 42CrMo4.

- Pri majhnih serijah zobnikov, ki jih je treba izboljšati, je lahko nitriranje v plazmi relativno drag postopek. Kljub vsemu pa zamenjava indukcijskega kaljenja z nitriranjem v plazmi zmanjša verjetnost poškodbe jamičenja, kar vodi do znižanja celotnih stroškov, ki so povezani z zamenjavo zobnikov ter zastojem proizvodnje.

surface compressive stresses, obtained with plasma nitriding, lead to favourable tribological properties of the nitrided steel. Wear-test results show that compared to hardening, plasma nitriding and pulsed-plasma nitriding greatly improve the sliding-wear, and especially the pitting-wear, resistance of 42CrMo4 steel.

- In the case of small series production, the plasma-nitriding process can be rather expensive. However, changing from hardened to plasma-nitrided gears reduces the probability of gear pitting failure and therefore leads to a reduction of the overall costs related to gear replacement and the halting of production.

## 5 LITERATURA 5 REFERENCES

- [1] Albertin, L., R.L. Frohlich, H. Winter, B.-R. Höhn, K. Michaelis, K. (1994) Load carrying capacity of nitrided steel gears. *American Gear Manufacturers Association*, Technical paper 94FTM4.
- [2] Fronius, S. (1971) *Maschinenelemente*, VEB Verlag Technik, Berlin.
- [3] Karamis, M.B. (1991) Tribological behaviour of plasma nitrided 722M24 material under dry sliding conditions. *Wear*, volume 147, 385-399.
- [4] Arques, J.L., J.M. Prado (1985) The dry wear resistance of a carbonitrided steel. *Wear*, volume 100, 321-332.
- [5] Roelandt, A., J. Elwart, W. Rembges (1985) Plasma nitriding of gear wheels in mass production. *Surface Engineering*, Volume 1, 187-191.
- [6] Bell, T. (1992) Towards designer surfaces. *Industrial Lubrication and Tribology*, Volume 44, 3-11.
- [7] Lampe, T., S. Eisenberg, G. Lauden (1993) Compound layer formation during plasma nitriding and plasma nitrocarburising. *Surface Engineering*, Volume 9, 69-76.
- [8] Karamis, M.B. (1991) Friction and wear behaviour of plasma-nitrided layers on 3% Cr-Mo steel. *Thin Solid Films*, Volume 203, 49-60.
- [9] Huchel, U., J. Crummenauer, S. Stramke, S. Dressler (1995) Pulsed plasma nitriding and combined processes. *Heat Treatment & Surface Engineering*, Isfahan, Iran, 329-335.
- [10] Sun, Y., T. Bell (1995) Modelling of the plasma nitriding of low alloy steels. *Developments in the nitriding of iron and titanium based alloys*, Royal Society London, 1-4.
- [11] Winter, H., K. Michaelis (1985) FZG gear test rig – Description and test possibilities. *2nd Int. Symposium of performance evaluation of automotive fuels and lubricants*, Wolfsburg, Germany.
- [12] Podgornik, B., J. Vižintin, V. Leskovšek (1999) Tribološke lastnosti jekla AISI 4140 nitiranega v plazmi in pulzirajoči plazmi. *Strojniški vestnik*, Volume 45, No. 5, 199-209.
- [13] ASTM E 837 (1995) Test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage methods. *American Society for Testing & Materials*, USA.
- [14] Podgornik, B., J. Vižintin, V. Leskovšek (1999) Wear properties of induction hardened, conventional plasma nitrided and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel in dry sliding conditions. *Wear*, Volume 232, 231-242.
- [15] Podgornik, B., J. Vižintin, V. Leskovšek (1999) Sliding wear characteristics of induction hardened, conventional plasma nitrided and pulse plasma nitrided structural steels. *2nd COST 516 Tribology Symposium*, Antwerpen, Belgium, 171-179.
- [16] Johnson, K.L. (1985) *Contact Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- [17] Broszeit, E., O. Zwirlein (1986) Internal stresses and their influence on material stresses in Hertzian contact - calculations with different stress hypotheses. *Journal of Tribology*, Volume 108, 387-393.
- [18] Karamis, M.B. (1993) Experimental study of the abrasive wear behaviour of plasma-nitrided gearing steel. *Wear*, Volume 161, 199-206.

Naslova avtorjev: dr. Bojan Podgornik  
prof.dr. Jože Vižintin  
Fakulteta za strojništvo  
Univerza v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Vojteh Leskovšek  
Inštitut za kovinske materiale in  
tehnologije  
Lepi pot 11  
1000 Ljubljana

Authors' addresses: dr. Bojan Podgornik  
prof.dr. Jože Vižintin  
Faculty of Mechanical Eng.  
University of Ljubljana  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia

Vojteh Leskovšek  
Institute of metals and  
technology  
Lepi pot 11  
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 28.11.2000  
Received:

Sprejeto: 27.6.2001  
Accepted:



## Primerjava triboloških lastnosti mineralnih in repičnih mazalnih olj - Rezultati mehansko-dinamičnih analiz (2. del)

### Tribological Properties of Rapeseed Oils Compared to Mineral Oils - Results of Mechanical - Dynamic Investigations (part 2)

Aleš Arnšek - Jože Vižintin

*V prispevku so predstavljeni rezultati meritev koeficienta trenja, obrabe, zajedanja, jamičenja in drsne obrabe za olja na osnovi oljne repice (oljne ogrščice) v primerjavi z oljem na mineralni osnovi. Za obravnavo obrabnih kotanj, zajedanja, jamičenja in drsne obrabe smo uporabili rasterski elektronski mikroskop z rentgenskim analizatorjem (SEM-EDXS).*

*Rezultati opravljenih preskusov so pokazali enakovredne oz. celo boljše mazalne lastnosti repičnih mazalnih olj v primerjavi s tržnim mineralnim oljem. Repično olje ima: manjše trenje v mejnem mazalnem področju, primerljivo zmožnost preprečevanja zajedanja, boljšo zmožnost preprečevanja jamičenja in dobre mazalne lastnosti pri velikih obremenitvah - majhnih hitrostih.*

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: olja repična, lasnosti maziv, lastnosti mehanske, SEM-EDXS)**

*In the present work, the coefficient of friction, wear, scuffing-load capacity, pitting resistance and normal sliding wear of rapeseed-based oils were evaluated and the results compared with the corresponding mineral-based oil. The wear scar diameters were examined by using the scanning electron microscope with energy dispers X-ray analyzer (SEM-EDXS).*

*The test results show similar or even better lubrication properties of rapeseed-based oils compared with a commercially available mineral based oil. The rapeseed-based oils exhibit lower coefficient of friction in the boundary lubrication regime, equivalent scuffing wear protection, better pitting resistance and good lubrication properties at high load – slow speed conditions.*

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: rapeseed oil, lubricant properties, mechanical properties, SEM-EDXS)**

#### OUVOD

V tem, drugem delu prispevka so predstavljeni, opisani in razloženi rezultati meritev koeficienta trenja, obrabnih kotanj, zajedanja, jamičenja in drsne obrabe. Naprave in postopki preskušanja ter preskusna olja so opisani v prvem delu prispevka [1].

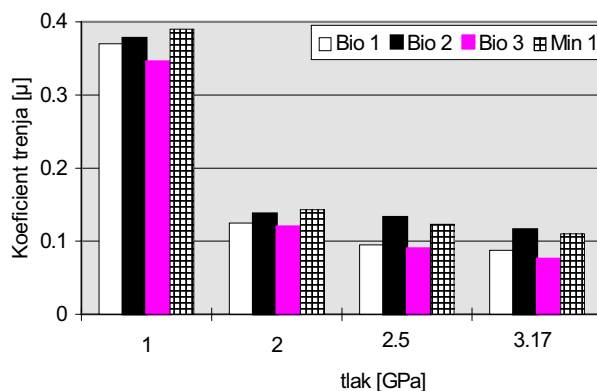
#### 1 PREGLED REZULTATOV MEHANSKO-DINAMIČNIH ANALIZ

##### 1.1 Koeficient trenja in velikosti obrabnih kotanj

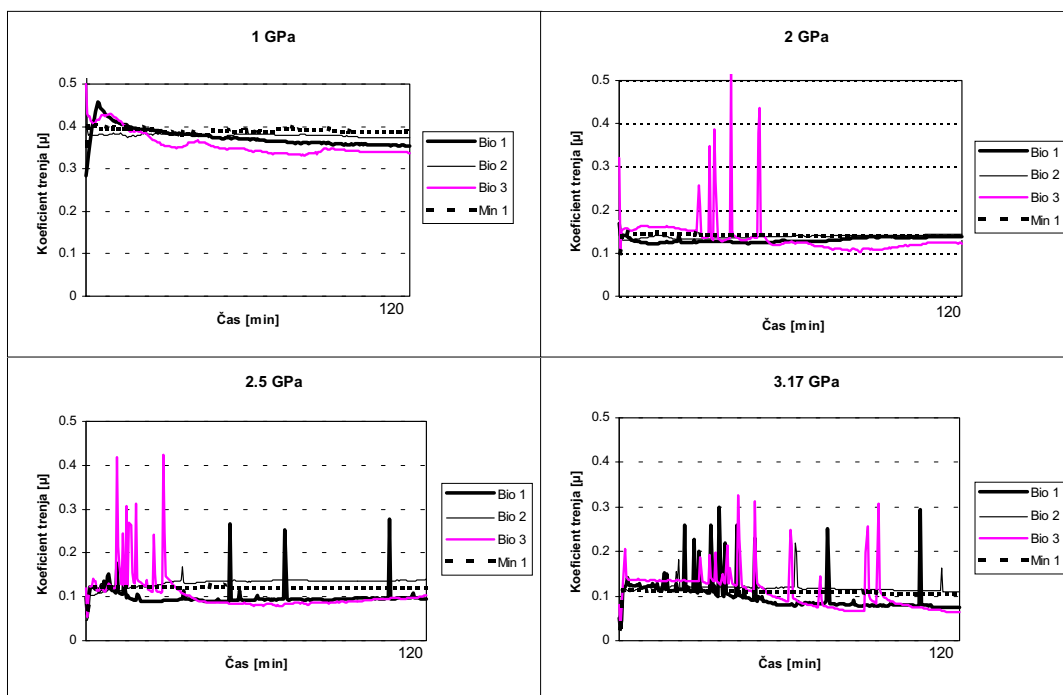
Vrednosti izmerjenih povprečnih koeficientov trenja pri različnih tlakih so prikazani na

sliki 1. S slike je razvidno, da se povprečne vrednosti koeficientov trenja pri vseh oljih močno zmanjšajo pri zvečanju obremenitve od 1 na 2 GPa, nato pa se s povečevanjem obremenitve le malenkostno zmanjšujejo.

Najmanjše vrednosti povprečnega koeficienta trenja smo pri vseh tlakih izmerili pri olju bio 3, sledi olje bio 1, največje povprečne vrednosti pa smo izmerili pri oljih bio 2 in min 1. Pri tlaku 1 GPa je relativna razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo povprečnega koeficienta trenja med oljema min 1 in bio 3 približno 11 odstotkov. Pri tlakih 2; 2,5 in 3,17 GPa so rezultati povprečnih vrednosti koeficienta trenja za olji bio 1 in bio 3 skoraj popolnoma enaki. Podobne, vendar nekoliko večje vrednosti zasledimo tudi pri oljih bio 2 in min 1. Pri tlaku 2 GPa



Sl. 1 Povprečni koeficienti trenja preskušanih olj pri različnih tlakih



Sl. 2. Koeficient trenja v odvisnosti od časa za štiri preskušana olja pri različnih tlakih

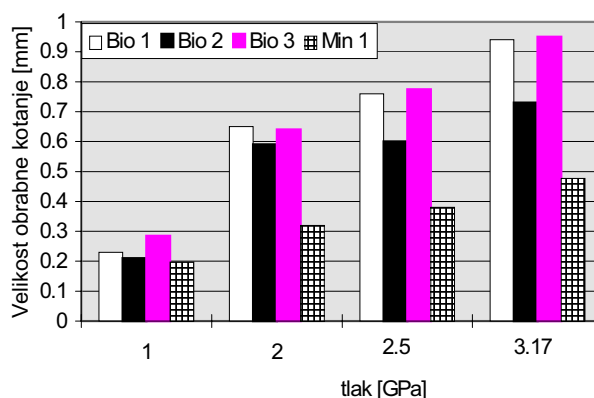
so razlike v koeficientu trenja med oljema bio 1 in bio 3 ( $\mu = 0,12$ ) in oljema bio 2 in min 1 ( $\mu = 0,14$ ) 14 %. Pri tlaku 2,5 GPa je razlika med istimi olji približno 27 %, pri tlaku 3,17 GPa pa je največja relativna razlika celo 34 odstotkov. Z izjemo olja bio 2, smo pri repičnih oljih bio 1 in bio 3 izmerili občutno manjše povprečne koeficiente trenja v primerjavi z mineralnim oljem.

Časovni potek koeficienta trenja za vsa štiri olja, pri vseh preskusnih tlakih prikazuje slika 2. Pri tlaku 1 GPa so poteki koeficienta trenja v odvisnosti od časa za vsa štiri olja gladki, brez konic, pri tlaku 2 GPa se pojavljajo konice pri olju bio 3. Pri tlakih 2,5 in 3,17 GPa se pojavljajo konice v poteku koeficienta trenja pri oljih bio 1 in bio 3, medtem ko jih pri oljih bio 2 in min 1 ni. Konice v poteku koeficienta trenja kažejo preboje mazalnega filma ter adhezivno obrabo kot posledico kovinskega dotika med preskušancema. Zaradi prebojev so tudi obrabne kotanje večje, kljub

v povprečju nižjemu koeficientu trenja za olji bio 1 in bio 3.

## 1.2 Zajedanje

Rezultati preskusov zajedanja na napravi FZG so zbrani v preglednici 1. Z izjemo olja bio 2, so preostala olja dosegla popolnoma enak rezultat. Stopnja zajedanja >12 je najboljši mogoči rezultat, dosežen na napravi FZG po standardu DIN 51 354 in kaže na kakovostno izenačenost preskusnih repičnih olj bio 1 in bio 3 z mineralnim oljem min 1. Nekoliko slabšo lastnost preprečevanja zajedanja ima olje bio 2, kar pa je po drugi strani tipična vrednost za olja UTTO. Olja UTTO ponavadi dosegajo stopnjo zajedanja med 9 do 11 [2]. V preglednici 2 so zbrani tudi rezultati preskušanja zajedanja osnovnega mineralnega in repičnega olja. Mineralno bazno olje je doseglo stopnjo zajedanja 8, repično pa 9.



Sl. 3. Velikosti obrabnih kotalnj, nastalih pri merjenju koeficientov trenja preskušanih olj pri različnih tlakih

#### Preglednica 1. Rezultati preskusov zajedanja

Vzorec	Stopnja zajedanja	Temperatura zajedanja
	DIN 51 354	$\varrho_{int S}$ ISO 6336-4 °C
bio 1	>12	374
bio 2	10	268
bio 3	>12	361
min 1	>12	383
Osnova min	8	206
Osnova bio	9	232

Preglednica 1 prikazuje tudi, na podlagi dobljenih rezultatov meritve stopnje zajedanja, izračunane temperature zajedanja za vsa štiri preskusna olja. Ker pri oljih bio 1, bio 3 in min 1 niti v dvanajsti obremenitveni stopnji ni prišlo do zajedanja, smo za izračun temperature zajedanja teh olj upoštevali razmere FZG trinajste stopnje obremenitve ( $T_1=629,7\text{ Nm}$ ,  $F_N=18644\text{ N}$ ).

Temperatura zajedanja znaša  $268\text{ °C}$  za olje bio 2, ki je doseglo najnižjo stopnjo zajedanja, za preostala tri olja pa znaša  $374\text{ °C}$ ,  $361\text{ °C}$  in  $383\text{ °C}$  (bio 1, bio 3, min 1), preglednica 1. Te temperature je mogoče uporabiti za preračun zobniških gonil na zajedanje v primeru uporabe teh olj. Določene razlike pri oljih, ki so dosegla enako stopnjo zajedanja, so posledica temperaturnih razlik oljnih kopeli ob koncu preskusa.

Pri preskusih zajedanja smo hkrati merili tudi temperaturo oljne kopeli v preskusnem gonilu po vsaki obremenitveni stopnji (sl. 4). S slike je razvidno, da se od šeste stopnje obremenitve dalje temperatura oljne kopeli pri olju min 1 zelo zviša v primerjavi z repičnimi olji. Razlike v absolutni temperaturi so v povprečju za približno  $8\text{ °C}$  višje od olja bio 1,  $11\text{ °C}$  od olja bio 2 in približno  $13\text{ °C}$  višje kakor pri olju bio 3.

Izračunane debeline mazalnih filmov kot posledica temperature oljnih kopeli in torej viskoznosti ter stopnje obremenitve so prikazane na

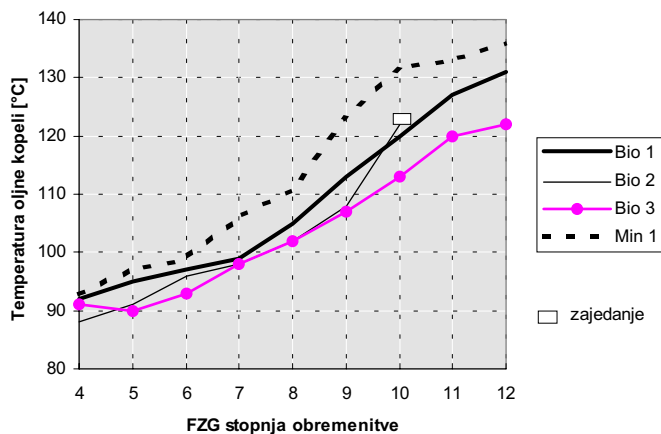
sliki 5. S slike je razvidno, da je bila pri olju min 1 najmanjša debelina mazalnega filma, od vseh preskusnih olj od 6 stopnje obremenitve dalje.

#### 1.2.1 Analize površin po preskusu na zajedanje

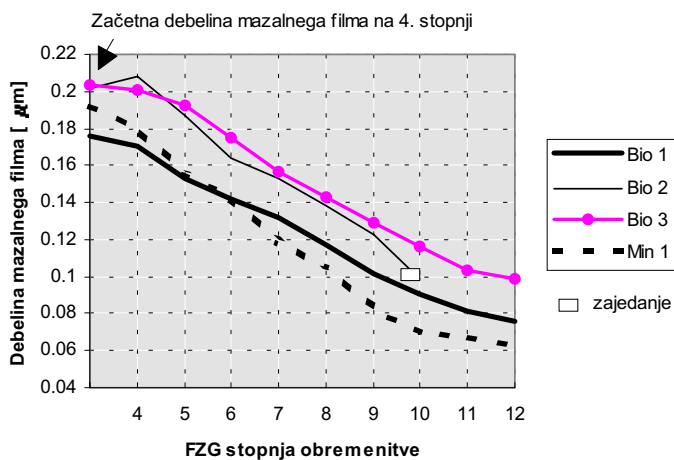
Na sliki 6 so prikazane površine zobnih bokov preskusnih zobnikov tipa A po koncu vsakega preskusa. S fotografij se vidi, da do obrabe pride v področju največjega zdrsa, tj. na vrhu zobnih bokov. Obraba površin zobnih bokov pri olju min 1 po preskusu je zanemarljiva, tako rekoč je ni (sl. 6d). Pri oljih bio 1 (sl. 6a) in bio 3 (sl. 6c) je obraba izrazitejša, vendar so površine še vedno zelo gladke in brez izrazitih pasov zajedanja. V obeh primerih so še vedno opazni sledovi brušenja. Videz obeh površin ne kaže na značilni videz zajedanja, videz površine bolj kaže na obliko drsne obrabe, kar se dobro ujema z dejstvom, da stopnja zajedanja na napravi FZG ni bila dosežena. Čeprav so površine zobnih bokov v primeru olja bio 2 bile prav tako gladke, sam videz poškodbe in nastala obraba dokazujeta zajedanje (sl. 6b).

#### 1.3 Jamičenje

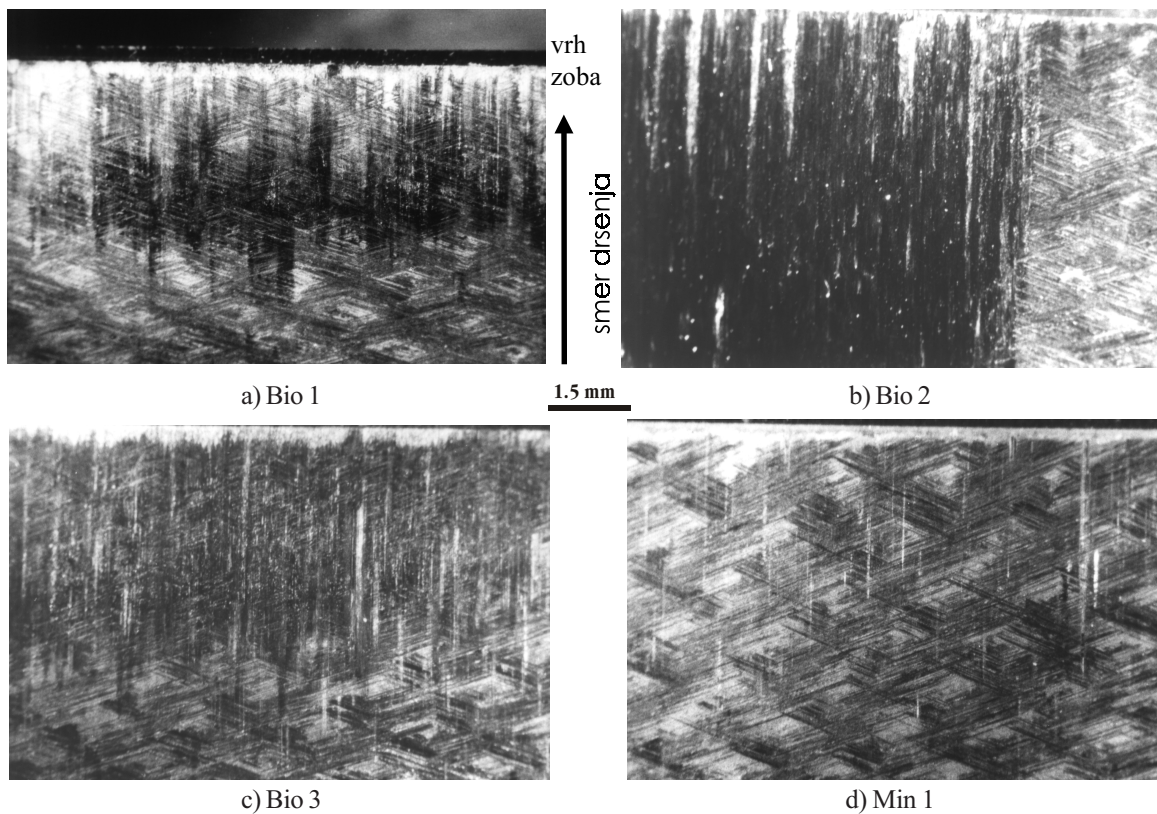
Preskusna olja so bila izbrana tako, da so imela pri temperaturi preskušanja  $90\text{ °C}$ , približno



Sl. 4. Temperatura oljne kopeli ob koncu vsake stopnje obremenitve FZG



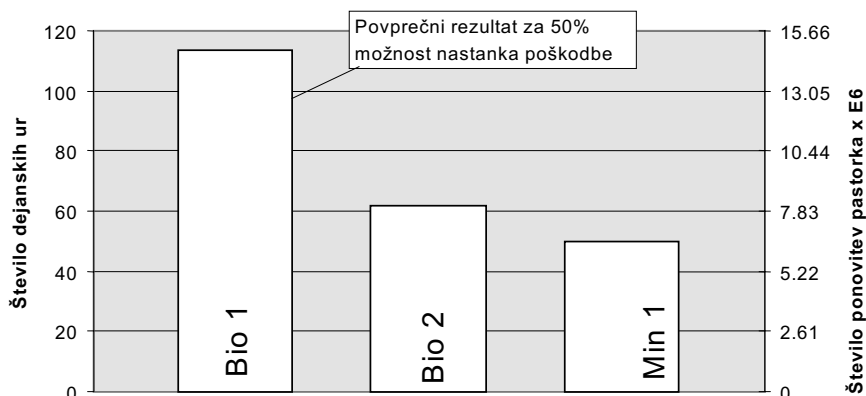
Sl. 5. Debeline mazalnih filmov ob koncu vsake stopnje obremenitve FZG



Sl. 6. Videz poškodovanih zobnih bokov po preskusu zajedanja za vsa štiri preskušana olja

Preglednica 2. Viskoznost in debelina mazalnega filma pri temperaturi preskušanja vpliva olja na jamičenje

Vzorec	Viskoznost pri 90 °C $\nu$ mm <sup>2</sup> /s	Debelina mazalne plasti pri 90 °C $h_{min}$ μm	Specifična debelina mazalne plasti pri 90 °C $\lambda$
bio 1	10,44	0,136	0,61
bio 2	12,66	0,155	0,70
min 1	11,04	0,149	0,67



Sl. 7. Rezultati preskusov jamičenja

enako viskoznost in s tem tudi debelino mazalne plasti (pregl. 2). S tem, ko so viskoznosti in debeline mazalnih plasti za vsa tri olja približno enake, izločimo vpliv viskoznosti pri preskušanju vpliva olja na pojav jamičenja. Znano je namreč, da ima viskoznost pomemben vpliv pri preprečevanju jamičenja [3]. Zaradi majhne specifične debeline mazalnega filma zobniki obratujejo na meji med mejnim in mešanim mazanjem. Ker so bili tudi tlaki pri vseh preskusih enaki, imajo v tem primeru največji vpliv na pojav jamičenja predvsem izbrani dodatki.

Rezultati preskusov na jamičenje so zbrani na sliki 7. Rezultati se nanašajo na 50-odstotno možnost nastanka kritične poškodbe, izračunane iz Weibullove porazdelitve ( $L_{50}$ ) za tri ponovitve pri preskusu posameznega olja. Ker je bil z oljem bio 3 opravljen le en preskus, rezultata ne navajamo.

Preskusi so pokazali boljše zmožnost obeh repičnih olj pri preprečevanju jamičenja glede na mineralno olje. Olje bio 1 je dosegalo približno dvakrat večjo dobo trajanja kakor mineralno olje. Tudi olje bio 2 je doseglo boljši rezultat kakor običajno mineralno olje (sl. 7).

Tipične poškodbe na zobnih bokih, nastale pri preskušanju vpliva maziv na jamičenje, prikazujejo fotografije na sliki 8.

Poškodbe so nastale v bližini notranje enojne ubirne točke, v področju negativnega zdrsa, kjer so tudi dotikalni tlaki največji [4]. Nastale poškodbe so si podobne za vsa tri olja, relativno plitve, z večkratnimi razpokami oz. kosmičenjem na eni strani (sl. 8).

Poškodbe imajo tipični videz, ki nastane pri površinskem načinu jamičenja [5]. Površinski način jamičenja je v dobri povezavi z majhno specifično debelino mazalnega filma (pregl. 2).

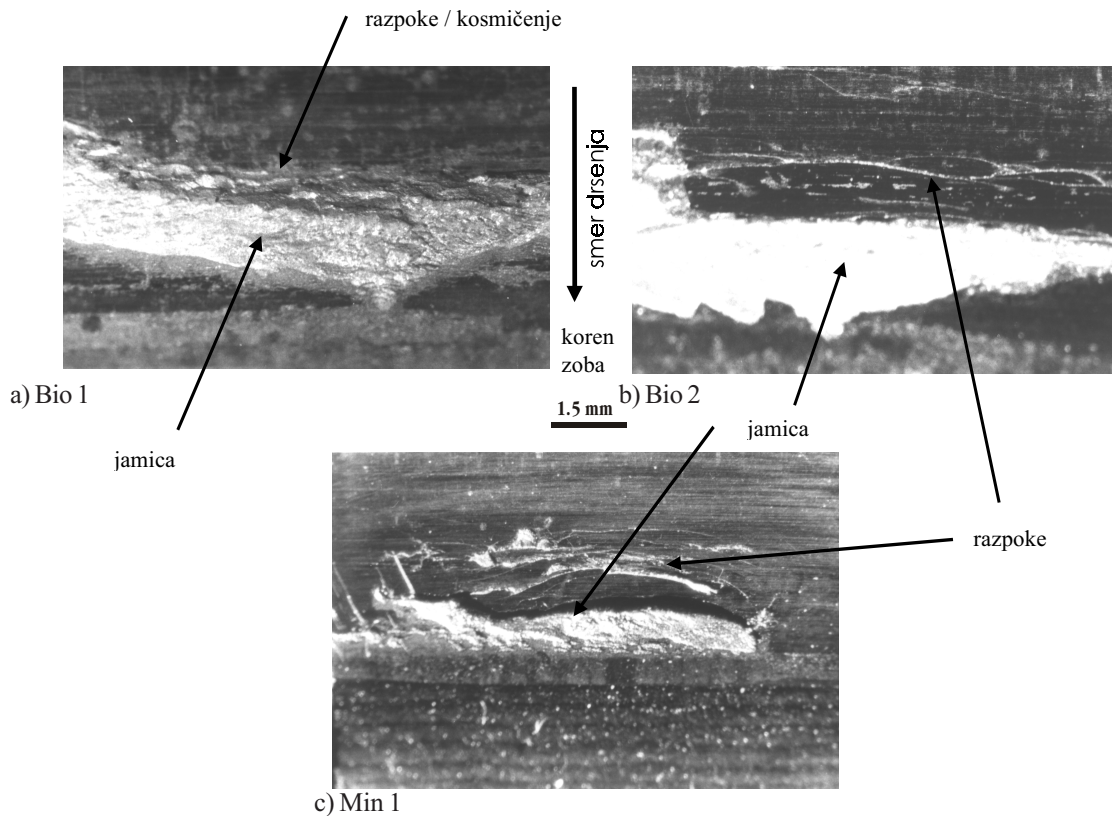
Na sliki 9 so pri 50-kratni povečavi na SEM fotografirane razpoke na zobnih bokih, nastale pri preskušanju vseh treh olj. Razpoke so usmerjene pravokotno na smer drsenja, nahajajo pa se pred jamico, gledano od vrha proti korenu zoba. Smer razvoja razpoke je nasprotna smeri sile trenja.

#### 1.4 Drсна obraba

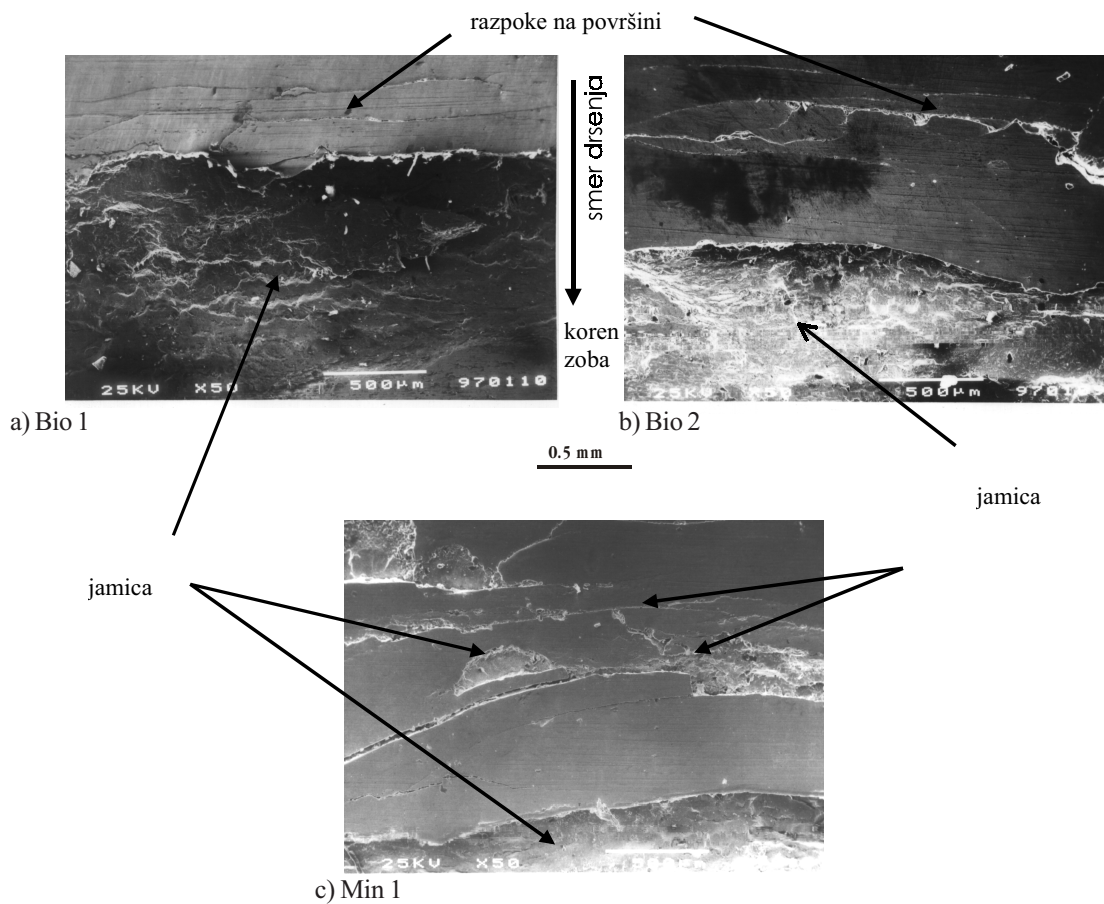
Pri preskušanju vpliva preskusnih olj na preprečevanje drsne obrabe so debeline mazalnih filmov tako majhne, da gre za izrazito mejno področje mazanja (pregl. 3). V tem področju sta aktivni komponenti, ki nadzirata obrabo, le osnovno olje in aditivi.

Rezultati preskusov odpornosti preskusnih olj na drsno obrabo po metodi A so prikazani v preglednici 4.

Z uporabo težnostne metode je bila obraba zobnikov pri uporabi olja bio 1 le 3 mg po 50 urah preskušanja, sledi ji mešanica repičnega in mineralnega olja s 5 mg obrabe, olje bio 3 z 8 mg ter olji bio 2 in min 1 z 30 oz. 39 mg obrabe. Primerjava med posameznimi stopnjami preskušanja pokaže pri oljih bio 1, bio 3 in BM izredno majhno obrabo v obeh stopnjah, obraba pri preostalih dveh oljih pa je v prvi stopnji veliko večja kakor v drugi.



Sl. 8. Videz poškodb jamičenja na zobnih bokih v optičnem mikroskopu



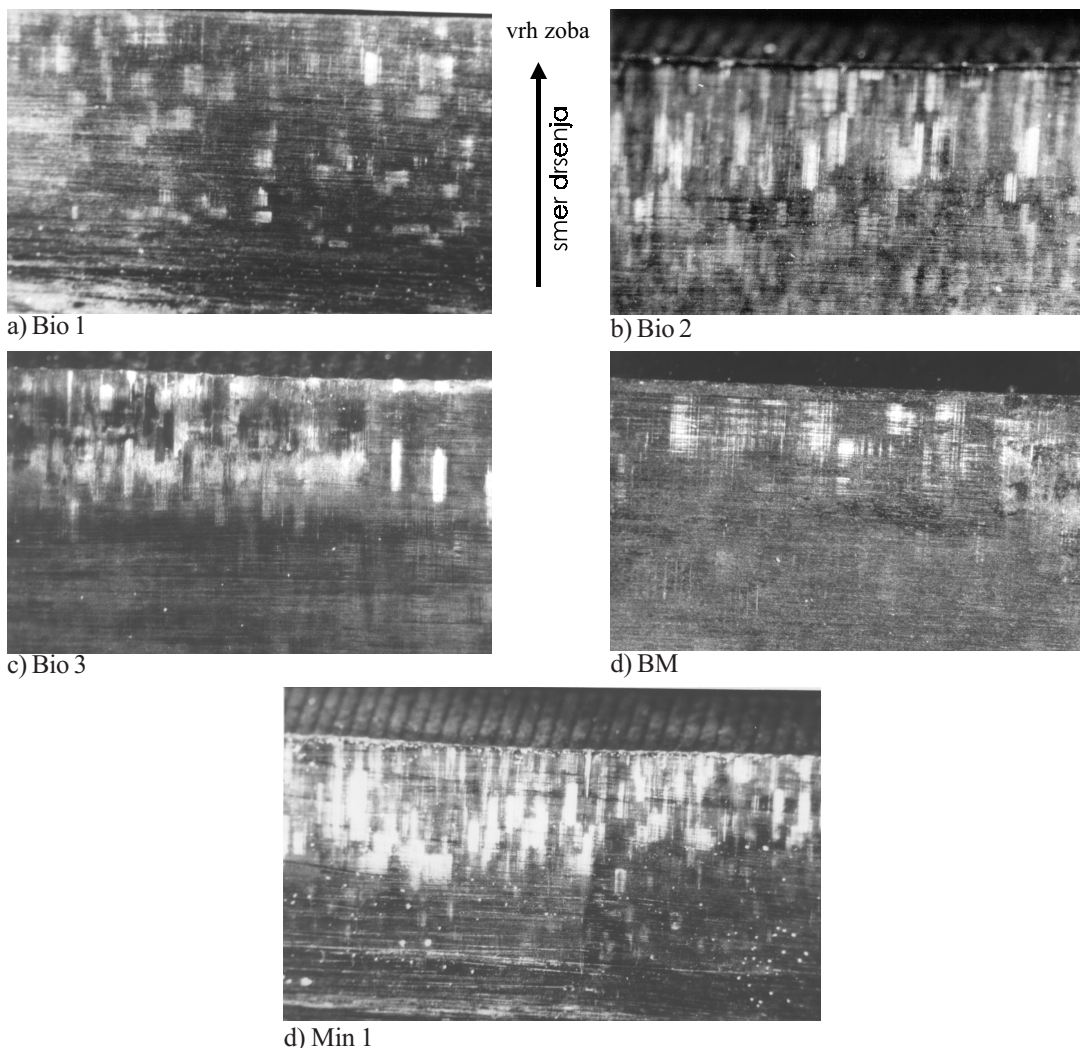
Sl. 9. Videz poškodb jamičenja na zobnih bokih v mikroskopu (SEM)

Preglednica 3. Viskoznosti in ustrezne debeline mazalnih filmov pri preskušanju obrabe

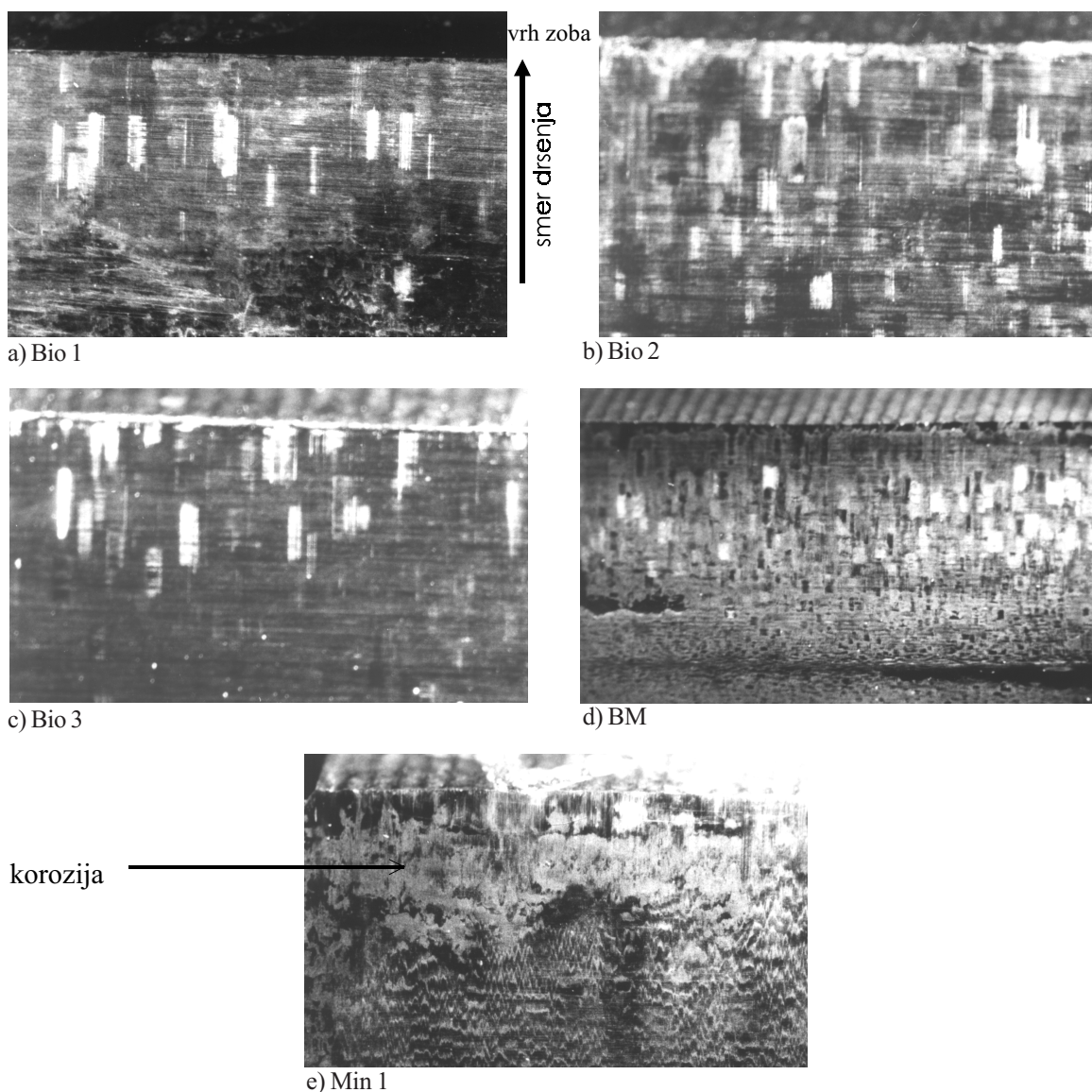
Vzorec	Metoda A (120 °C)			Metoda B (80 °C)		
	v <sub>120</sub> mm <sup>2</sup> /s	h <sub>min</sub>		v <sub>80</sub> mm <sup>2</sup> /s	h <sub>min</sub>	
		1 stopnja μm	2 stopnja μm		1 stopnja μm	2 stopnja μm
bio 1	6,16	0,0095	0,0063	12,86	0,017	0,0115
bio 2	7,31	0,0106	0,0071	15,74	0,0199	0,0133
bio 3	7,59	0,0111	0,0074	15,57	0,0198	0,0133
min 1	5,51	0,0088	0,0059	14,68	0,0203	0,0136

Preglednica 4. Rezultati preskusov drsne obrabe - metoda A

	Obraba zobnih bokov			Specifična obraba		
	mg			mg/kWh		
	1 stopnja	2 stopnja	skupaj	1 stopnja	2 stopnja	skupaj
bio 1	2	1	3	0,03	0,02	0,02
bio 2	25	5	30	0,34	0,08	0,22
bio 3	5	3	8	0,07	0,05	0,06
min 1	32	7	39	0,44	0,11	0,29
BM	1	4	5	0,02	0,06	0,04



Sl. 10. Fotografije zobnih bokov pastorka po preskusu drsne obrabe - metoda A



Sl. 11. Fotografije zobnih bokov pastorka po preskusu drsne obrabe - metoda B

Fotografije stanja zobnih bokov pastorka po preskusu drsne obrabne metode A s preskusnimi olji so zbrane na sliki 10. Fotografije zobnih bokov prikazujejo gladke površine, to pomeni, da se je v vseh primerih pojavila zmerna drsna obraba.

#### 1.4.1 Vpliv vode kot primesi

V traktorskih pogonskih sistemih in nekaterih drugih pogonih se pojavlja tudi do 1 odstotek vode v olju. Voda je primes, ki zelo poostri delovne razmere, v katerih mora olje delovati. Da bi ugotovili vplive vode na preprečevanje drsne obrabe, smo uporabili metodo B (pregl. 3). Pred vsakim preskusom smo v vzorce olj dodali 1 % v/v vode. Mešanico smo pred preskusom nekajkrat močno pretresli, da smo dobili homogeno zmes olja in vode. Med preskusom nismo več dodajali vode.

Rezultati preskusov drsne obrabe po metodi B so zbrani v preglednici 5, slike zobnih bokov

pastorka po preskusu z olji bio 1, bio 2, bio 3, min 1 in BM pa na sliki 11.

Z izjemo olja bio 2 je pri vseh preskusih opazno povečanje obrabe v primerjavi s čistim oljem (pregl. 4). Razlike med vzorci olj so velike. Obraba je najmanjša pri olju bio 2, pri preostalih oljih pa se zvečuje po istem razporedu kakor pri metodi A (pregl. 4). Iz primerjave obeh metod je tudi razvidno, da se obraba pri mešanici BM z dodano vodo izredno poveča, glede na olje bio 1, čeprav sta po metodi A obe olji imeli skoraj popolnoma enak rezultat. Očitno je, da voda bolj škoduje mazalnim lastnostim mineralnih olj, kakor repičnih, saj v tem primeru že 10-odstotna mešanica repičnega olja z mineralnim oljem, ob navzočnosti vode, izredno izgubi svojo mazalnost. Zanimivo je obnašanje olja bio 2, ki ima, glede na rezultate, približno enako protiobrabno zaščito pri razmerah preskušanja z vodo ali brez nje. Takšen rezultat je vsekakor presenetljiv.



Preglednica 5. Rezultati preskusov normalne drsne obrabe - metoda B

	Obraba zobnih bokov			Specifična obraba		
	mg			mg/kWh		
	1 stopnja	2 stopnja	skupaj	1 stopnja	2 stopnja	skupaj
bio 1	25	49	74	0,35	0,79	0,55
bio 2	24	8	32	0,33	0,13	0,24
bio 3	55	34	89	0,76	0,55	0,66
min 1	48	288	336	0,66	4,63	2,49
BM	71	114	185	0,98	1,83	1,37

S slike 11 je razvidno, da je pri vseh treh bio oljih prišlo do približno enakega obrabnega mehanizma. Obrabna površina zobnega boka po preskusu mešanice BM kaže sledove močnejše drsne obrabe (sl. 11d), pri mineralnem olju min 1 pa lahko opazimo tudi sledove korozije na zobnih bokih (sl. 11e). Korozija, nastala na zobnih bokih, nakazuje na nezadostno zaščito kovinskih površin, prispeva pa tudi k večji obrabi.

## 2 RAZPRAVA

Repična mazalna olja imajo izredno dobre mazalne lastnosti. Majhni povprečni koeficienti trenja repičnih olj (z izjemo olja bio 2) so pričakovani, ker ta olja sestavljajo dolge polarne organske molekule (maščobne kisline). Te molekule se s svojim polarnim koncem prilepijo na kovinsko površino in zmanjšujejo torni koeficient. Mazalni učinek se ustvari s fizikalno oz. kemijsko adsorpcijo maziva na površino, tj. z nastankom nizkostrizne plasti polarnih molekul med dotikalnima površinama ([2], [6] in [7]). V tem primeru so majhni povprečni koeficienti trenja funkcija baznega olja. Visok koeficient trenja repičnega olja bio 2 lahko pripišemo lastnostim, ki jih morajo imeti olja UTTO. Trenje v teh oljih mora biti dovolj veliko, s čimer se zagotovi učinkovito delovanje mokrih zavor in sistema "Power Take Off" v traktorjih. Po drugi strani pa smo z meritvami ugotovili slabe protiobrabne lastnosti repičnih olj, ki se kažejo v prebojih mazalne plasti. To pa je neposredno funkcija aditivov AW/EP v baznih oljih (sl. 3).

Raziskava je potrdila, da je zmožnost preprečevanja zajedanja repičnih olj enakovredna zmožnostim mineralnega olja. Vseeno pa so bile izmerjene temperature oljnih kopeli nižje po vsaki obremenitveni stopnji pri preskušanju repičnih olj. Za približno isti odvod toplote preskusnih zobnikov, in ker so tudi toplotne lastnosti preskusnih olj približno enake, je temperatura oljne kopeli odvisna le od začetne temperature olja (90 °C od 4 stopnje dalje) in od torne toplote, nastale v dotiku. Nižje temperature oljnih kopeli so bile izmerjene za olja z majhnim koeficientom trenja (sl. 4). Z izjemo olja bio 2 se izmerjene temperature oljnih kopeli ujemajo z

razmerjem izmerjenih koeficientov trenja pri tlakih 1 in 2 GPa na napravi SRV (FZG obratuje med 0,14 in 1,84 GPa). Prav tako pa so nižje temperature oljnih kopeli po vsaki stopnji posledica večje debeline mazalne plasti in s tem boljšega ločevanja površin v primeru vseh treh repičnih olj (sl. 5). Čeprav je bila viskoznost vseh preskusnih olj na začetku vsake stopnje približno enaka, je bil padec viskoznosti med preskusom manjši pri repičnih oljih zaradi njihove manjše odvisnosti viskoznosti od temperature (IV ~220 - indeks viskoznosti) v primerjavi z mineralnim oljem (IV 89). Zaradi manjšega padca viskoznosti je debelina filma večja, ločevanje površin boljše, dotiki med vršički so preprečeni z debelejšo mazalno plastjo, površine se zaradi tega manj segrevajo, zato so tudi temperature olja nižje.

Viskoznost olja, vrsta olja in njegova temperatura imajo zelo velik vpliv na pojav jamičenja, medtem ko imata vrsta dodatkov in njihova koncentracija le omejen vpliv na jamičenje. Pri delovni temperaturi preizkušanja so imela vsa olja približno enako viskoznost in s tem tudi debelino mazalne plasti (pregl. 2). Ker so bili tudi dotikalni tlaki enaki pri vseh preskusih, imajo največji vpliv na pojav jamičenja torne lastnosti osnovnega olja ([8] do [11]). Videz poškodb jamičenja potrjuje površinski način jamičenja pri vseh preskušanih oljih, kar se tudi dobro ujema z majhno specifično debelino mazalnih plasti. To pa še dodatno potrjuje, da imajo v našem primeru torne lastnosti posameznih preskušanih olj odločujoč vpliv na pojav jamičenja. Dotikalni tlaki pri preskušanju jamičenja na napravi FZG ustrezajo vrednosti 1,65 GPa na kinematskem krogu. Za neposredno primerjavo koeficientov trenja lahko vzamemo vrednosti, izmerjene na napravi SRV v območju 1 in 2 GPa. Iz primerjave slik 1 in 7 vidimo, da se razmerja koeficientov trenja in razmerja dobljenih rezultatov preskusa jamičenja popolnoma ujemajo. Torej je posledica boljšega preprečevanja jamičenja repičnih olj manjše drsno trenje v dotiku. To vodi k manjšim strižnim napetostim na površini, kar učinkovito preprečuje dotikalno utrujanje, povezano s površinskim nastankom utrujenostnih razpok.

V primeru preskusa odpornosti preizkusnih olj na drsno obrabo pri velikih obremenitvah in

majhnih hitrostih se bolje izkažejo repična olja ter tudi mešanica v primerjavi s čistim mineralnim oljem. Zaradi majhnih drsnih hitrosti je segrevanje dotikalnih površin malenkostno, zato aditivi AW/EP, ki začno delovati šele pri visokih temperaturah, v teh preskusnih razmerah še ne delujejo. Izračun temperature za preskus drsne obrabe je za vseh pet olj  $\sim 153$  °C. V primerjavi s temperaturo zajedanja osnovnih olj (pregl. 1) pomeni, da niti pri repičnih oljih niti pri mineralnem olju zaradi prenizke temperature aditivi AW/EP ne delujejo. V tem področju delovanja so zato v izraziti prednosti repična olja zaradi visoke polarnosti osnove in s tem povezane fizikalne oz. kemijske adsorpcije maščobnih kislin na kontaktno površino, zaradi tega je obraba manjša (pregl. 4). Mazalni mehanizem fizikalne oz. kemijske adsorpcije maščobnih kislin je učinkovit prav v področju nizkih kontaktnih temperatur in velikih obremenitev.

Voda na poslabšanje mazalnih lastnosti vpliva na dva načina. Prvič je voda zelo polarna molekula, ki se hitreje veže na kovinsko površino kakor aditivi AW/EP v olju. Ker voda sama po sebi nima nikakršnih nosilnih lastnosti in ker je delovanje aditivov AW/EP zaradi manjše polarnosti omejeno, je rezultat zelo majhna protiobrabna zaščita z vodo pomešanega olja. To pomeni, da so mineralna olja dejansko bolj izpostavljena vplivu vode na mazalne lastnosti, zaradi nižje polarnosti osnove, v primerjavi z repičnimi olji. Druga možnost je, da voda reagira z aditivi AW/EP ali nekaterimi drugimi komponentami v olju, spremeni njihove kemijske lastnosti, ki so zato manj učinkovite od prvotnih. Voda v repičnih oljih je še posebno problematična. Voda razcepi naravni ester, triglicerid kot osnovni gradnik repičnih olj, v proste organske kisline oz. v mila in alkohole. Mila in alkoholi ustvarjajo smolnate, v olju netopne ostanke, ki v obliki mulja in gošče slabšajo mazalne lastnosti na kovinskih površinah. Proste kisline pa vplivajo na korozijo kovin. Mulja, gošče oz. smolnatih netopnih ostankov pri 50-urni obremenitvi repičnih olj z vodo pri 80 °C nismo opazili, kar pomeni, da je bila delovna temperatura prenizka, čas pa prekratek za začetek kemijskih reakcij.

Za razumevanje kemičnih reakcij aditivov s kovinsko površino in za boljše razumevanje dobljenih rezultatov smo površine zobnih bokov po preskusih zajedanja analizirali z mikroskopom SEM, povezanim z analizatorjem EDS. Površina, obstreljena z elektroni, oddaja žarke X, katerih spekter je značilen za prvine, ki so na površini. Dejanska globina analize je okoli 1 mm. Rezultati so prikazani na sliki 12. Slika prikazuje fotografije SEM površin zobnih bokov tik pod vrhom, na mestu največje drsne hitrosti pri 200-kratni povečavi, skupaj z analizo EDS.

Iz analiz se vidi, da je pri vseh oljih na mestu poškodbe zajedanja prišlo do reakcij dodatka fosforja in/ali žvepla s kovinsko površino. Na poškodovani, zaradi drsenja zglajeni površini brez tipičnih poškodb

zajedanja, reakcij dodatkov pri repičnih oljih nismo opazili. Nasprotno pa je pri mineralnem olju opazna velika konica fosforja in celo sledovi cinka na povsem nepoškodovanem delu zobnega boka, kjer so še vedno vidne raze kot posledica brušenja. Višina konice, relativno glede na šum signala in višino konice železa, je kakovostno merilo količine analizirane prvine na površini. Sledovi aluminija izhajajo iz držala vzorcev.

Dejstvo je, da reakcije aditivov s kovinsko površino pri mineralnem olju zelo hitro stečejo. Glede na videz površine, kjer so še vedno vidni sledovi brušenja, je za reakcijo že dovolj odstranitev oksidnega sloja. Odstranjeni oksidni sloj je tako tanek, da ne spremeni videza površine, temeljito pa spremeni lastnosti kovinske površine. Na sveži površini nastala tanka reakcijska plast aditivov torej varuje površino pred zajedanjem. Pri olju min 1 se je kljub majhni obrabi na površini (sl. 6d) zreagirala relativno največja količina dodatka (sl. 12d). Pri repičnih oljih bio 1, bio 2 in bio 3 so konice zreagiranih prvih žvepla in fosforja relativno majhne, pravzaprav na meji zaznavanja (sl. 12a,b,c), kljub večji obrabi površin zobnih bokov (sl. 6a,b,c). Na zglajenih površinah, ki ne kažejo tipičnih poškodb zajedanja, sploh ni prišlo do reakcij z aditivi. Dejstvo je, da je na teh mestih prišlo do obrabe, ker ni vidnih sledov brušenja, zajedanje pa je preprečevala fizikalna oz. kemijska adsorpcija maščobnih kislin na kovinsko površino.

Iz rezultatov analiz SEM in EDS razberemo, da je delovanje S/P/Zn aditiva (kombinacija žvepla, fosforja in cinka - AW/EP) v mineralnem olju min 1 bolj učinkovito kakor v repičnih oljih bio 1, bio 2 in bio 3 (samo S/P). Po analizah sodeč visoka polarnost repične osnove preprečuje dostop aditivom do kovinske površine, zato je tudi količina zreiranega aditiva, kljub večji obrabi, manjša v primerjavi z mineralnim oljem.

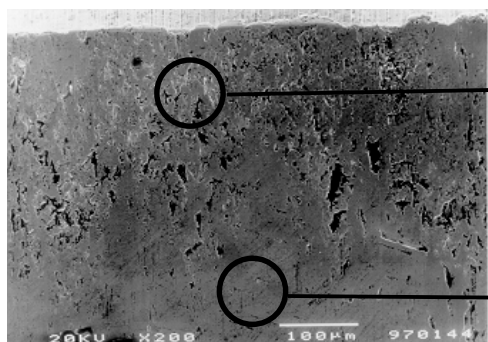
Slabe protiobrabne lastnosti repičnih olj so zato posledica njihove bistveno večje polarnosti v primerjavi z nevtralnimi mineralnimi olji. To pomeni, da je cela vrsta aditivov manj polarna kakor bazno repično olje. Zato so za doseganje enake učinkovitosti na mejni ploskvi kakor pri mineralnih oljih potrebne bistveno večje koncentracije aditiva, tj. do želenega delovanja se pride samo prek večje statične porazdelitve. To se najbolj kaže prav pri protiobrabnih aditivih in aditivih za visoke tlake, pri katerih visoka polarnost osnove preprečuje dostop aditivov AW/EP na osnovno površino. Z večanjem koncentracije teh aditivov se lahko izboljša tudi njihov dostop do osnovne površine in s tem tudi protiobrabne lastnosti repičnih olj pri naših razmerah preskušanja [13].

### 3 SKLEP

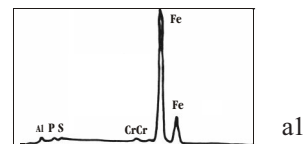
Opravljeni preskusi so pokazali enakovredne oz. celo boljše mazalne lastnosti

repičnih mazalnih olj v primerjavi s tržnim mineralnim oljem. To pomeni: nižje trenje v mejnem mazalnem področju, primerljiva zmožnost preprečevanja zajedanja, boljša zmožnost preprečevanja jamičenja in dobre mazalne lastnosti v razmerah velike obremenitve - majhne hitrosti.

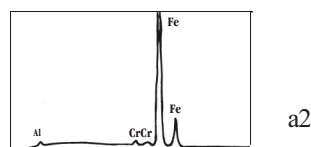
Te mazalne lastnosti so rezultat fizikalne in/ali kemijske adsorpcije maščobnih kislin na kovinsko površino in izredno majhne odvisnosti viskoznosti od temperature. Majhna odvisnost viskoznosti od temperature (visok IV) omogoča tudi uporabo repičnega mazalnega olja viskoznosti ISO 46 tam, kjer se običajno uporabljajo mineralna olja viskoznosti ISO 32-68.



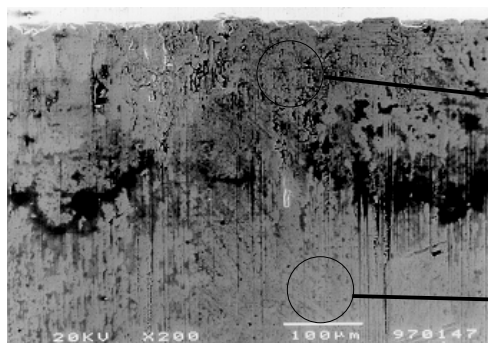
a) Bio 1



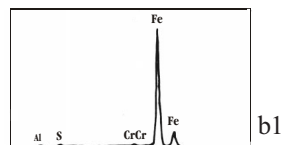
a1



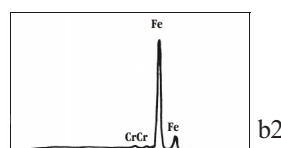
a2



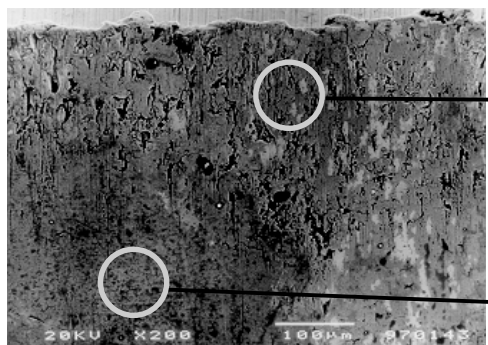
b) Bio 2



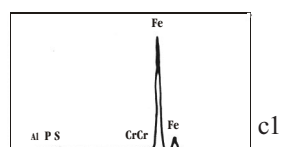
b1



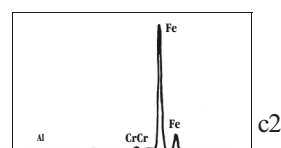
b2



c) Bio 3



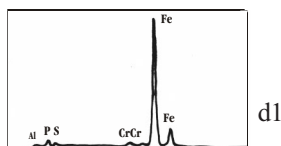
c1



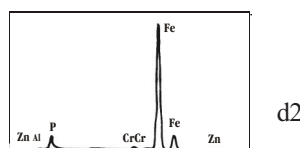
c2



d) Min 1



d1



d2

Sl. 12. Analize na SEM in EDS obrabnih površin zobnih bokov po preskusu zajedanja

Edina pomanjkljivost v mazalnih lastnostih repičnih olj je v nezadostnem delovanju aditivov AW/EP pri velikih obremenitvah in visokih kontaktnih temperaturah.

Mazalni učinek je bil posledica nastale nizkostrizne mejne ploskve med dotikalnima površinama

Kombinacija adsorpcijskega mazalnega mehanizma, povezanega z repičnimi olji ter protiobrabnih dodatkov in dodatkov za visoke tlake v repičnih oljih, je učinkovita tja do 2 GPa.

Majhna obraba v drugi stopnji nakazuje na dobre protiobrabne lastnosti olj, nekoliko večjo obrabo v prvi stopnji pri oljih bio 2, in min 1 pa lahko pripišemo utekavanju zobnikov. Olji bio 1 in bio 3 imata zelo dobre karakteristike pri utekavanju, logična posledica je zato tudi dober rezultat mešanice BM v prvi stopnji, saj je mešanica olj bio 1 in min 1. Pri oljih bio 2 in min 1 so zato kemijske lastnosti, ki nadzirajo utekavanje, nekoliko slabše, kakor pri preostalih treh oljih. Po vzpostavitvi obrabe (druga stopnja) so vsa olja enakovredna.

#### 4 LITERATURA IN VIRI

- [1] Vižintin, J., A. Arnšek (2001) Primerjava triboloških lastnosti mineralnih in repičnih mazalnih olj; Osnove, načini preizkušanja ter izbira preizkusnih olj, *Strojniški vestnik*, Vol. 47, št. 3.
- [2] Hubmann, A. (1994) Chemie pflanzlicher Öle, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [3] Arnšek, A. (1996) Zajedanje in jamičenje, *Drugi seminar, FS Ljubljana*
- [4] Podlesnik, M. (1981) Gonila z valjastimi zobniki, Maribor.
- [5] Stachowiak, G.W., A.W. Batchelor (1993) Engineering tribology, *Elsevier*.
- [6] Kabuya, A., J.L. Bozet (1995) Comparative analysis of the lubricating power between a pure mineral oil and biodegradable oils of the same mean ISO grade, *Lubricants and Lubrication / D. Dowson (Editor), Elsevier*.
- [7] Arnšek, A. (1994) Lastnosti biološko razgradljivih olj, *Prvi seminar, FS Ljubljana*.
- [8] Bartz, W.J., V. Krüger (1975) Influence of lubricants on the pitting fatigue of gears, *Wear*, Vol. 35, No. 2, 184-198.
- [9] Stachowiak, G.W., A.W. Batchelor (1993) Engineering tribology, *Elsevier*.
- [10] Ku, P.M.; Gear failure modes - Importance of lubrication and mechanics, ASLE Preprint No. 75AM-SA-1.
- [11] Bartz, W.J., V. Krüger (1973) Pitting fatigue of gears - Some ideas on appearance, mechanism and lubricant influence, *Tribology International*, 220-224.
- [12] Möller, U.J. (1994) Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe-Einführung in die Problematik, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [13] Vižintin, J., A. Arnšek (1996) Vpliv obremenitve na tribološke lastnosti mazalnih olj pri izmeničnem gibanju, *Zbornik predavanj Slotrib 96*, Gozd Martuljek.

Naslov avtorjev: Aleš Arnšek  
prof.dr. Jože Vižintin  
Fakulteta za strojništvo  
Univerza v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Prejeto:  
Received: 30.1.2001

Sprejeto:  
Accepted: 27.6.2001

## Strokovna literatura

### Professional Literature

#### Ocene knjig

**K.-H. Decker – K. Kabus: Maschinenelemente**  
Funktion, Gestaltung und Berechnung

Zal.: Carl Hanser Verlag, München, Wien, 15. izp.  
izd., 2001.

Obseg: format 16,5 x 23 cm, 706 strani, 791 sl., 325  
pregl., 175 rač. prim., CD – ROM.  
Cena je 69,80 DEM.

Avtorja sta v svoji 15. izdaji podala zelo natančen in razumljiv pregled posameznih strojnih elementov. Poseben poudarek je namenjen upoštevanju novih standardov, ki so bili v zadnjem obdobju prevzeti po ISO in tudi EU. Uvedene so nove oznake za materiale in podani novi postopki za dimenzioniranje in nadzor. Knjiga je dopolnjena še s poglavji o standardih in obdelavi podatkov v konstrukcijskem postopku, ki so vezani na določanje napetostnih stanj. V dodatku je priložena še zgoščenska s programskim okoljem, s katerim lahko računamo različne primere, ki so podani v knjigi ali se pojavijo v praksi.

Celotna snov je podana v sedmih glavnih poglavjih: Osnove, Nerazstavljive zveze, Razstavljive zveze, Gredne zveze, Zobniške dvojice, Prenose moči z jermeni itn. in Cevovodi. Vsako poglavje je razdeljeno na podpoglavja, ki samostojno obravnavajo specifično posameznih strojnih elementov. Podajanje razlage posameznih modelov preračuna in enačb, preglednic in diagramov ter rešenih primerov je dopolnjeno s prilogami, ki jih lahko uporabljamo tudi povsem samostojno.

I. Prebil

**K.-H. Decker – K. Kabus: Maschinenelemente**  
Formeln

Zal.: Carl Hanser Verlag, München, Wien, 15. pred.  
izd., 2000.

Obseg: format 16 x 23 cm, 160 strani, 84 slik.  
Cena je 29,80 DEM.

Vse pomembne enačbe, ki so vezane na dimenzioniranje in nadzor strojnih elementov, so v pregledni obliki zapisane v posebni izdaji. Sistematika zapisa enačb sledi razlagi v knjigi. Natančno so podana pojasnila za oznake posameznih parametrov in njim pripadajoče enote, ki so strogo vezane na ISO sistem. Zapis modelov

dimenzioniranja omogoča tudi povsem samostojno uporabo pri preračunavanju strojnih elementov.

I. Prebil

**K.-H. Decker – K. Kabus: Maschinenelemente**  
Aufgaben

Zal.: Carl Hanser Verlag, München, Wien, 10. pred.  
izd., 2000.

Obseg: format 16 x 23 cm, 339 strani, 430 slik.  
Cena je 49,80 DEM.

Hkrati s knjigo je bila desetič izdana tudi zbirka nalog. V prvem delu knjige so za posamezne strojne elemente skrbno izbrane naloge, podani pa so tudi osnovni parametri in navodila za izbiro modela pri dimenzioniranju in nadzoru.

V drugem delu so podani postopki dimenzioniranja in rešitve. Zbirka nalog je po svoji vsebini in načinu uporabe povsem povezana s knjigo in prilogo z enačbami in preglednicami ter diagrami.

Knjiga s prilogami je namenjena predvsem študentom univerzitetnega in visokega strokovnega študija strojništva ter vsem tistim, ki se v praksi ukvarjajo s konstruiranjem strojnih elementov. Ob postopkih dimenzioniranja so podani tudi vsi standardi, ki so kakorkoli povezani s posameznimi strojnimi elementi in nas vodijo do vseh potrebnih informacij pri postopkih konstruiranja.

I. Prebil

**D. Schlenz in 18 soavtorjev: PKW –**  
**Klimatisierung**

Zal.: Expert-Verlag GmbH, Renningen – Malmshheim  
2000.

Obseg: format 15 x 21 cm, 126 str., 132 sl., 19  
preglednic.  
Cena je 48 DEM.

Klimatizacija je na vseh področjih v velikem razmahu. Deloma je to tudi posledica svetovnega segrevanja ozračja. Eno izmed področij, na katerem se klimatizacija nezadržno širi, je tudi klimatizacija osebnih vozil, saj praktično skoraj ni več vozila srednjega razreda, ki ne bi bilo klimatizirano.

Knjiga podaja pregled aktualnega stanja tehnike in metode razvoja klimatizacije osebnih vozil. Prikazane so nove zamisli na področjih:

- ogrevanje in klimatizacija osebnih vozil z majhno porabo goriva,
- načela krmiljenja za samodejne klimatizacijske naprave,
- moderne simulacijske metode za pospeševanje razvojnih procesov.

Vsebina knjige:

- Zasnove klimatizacije: klimatizacija osebnih vozil z majhno porabo goriva
- Sistematika in določanje porabe goriva
- Dodatno ogrevanje osebnih vozil
- Zasnove krmiljenja
- Razvojne računalniško podprte in optimizacijske metode pri klimatizaciji osebnih vozil
- Izračuni in meritve ugodja v osebnih vozilih

Knjiga je namenjena načrtovalcem in proizvajalcem osebnih vozil s posebnim poudarkom na klimatizaciji, načrtovalcem elementov posebnih klimatizacijskih naprav (krmiljenje, kompresorji), načrtovalcem pogonskih motorjev osebnih vozil (hlajenje, kroženje hladilne tekočine), raziskovalcem in znanstvenim delavcem ter študentom s področja toplotne tehnike, avtomobilske tehnike, hladilne tehnike, hidromehanike in krmilne tehnike.

J. Modic

### Schmierstoff-Tabelle

Zal. Beratungsgesellschaft für Mineralöl-  
Anwendungstechnik mbH,  
6. izdaja 2000.  
Obseg: format 14,5 x 21 cm, 108 strani.  
Cena je 39 DEM.

Pravilna izbira maziva lahko prihrani marsikateri tolar, saj se izognemo nepotrebim okvaram in dragim servisom. Pri vzdrževanju voznega

parka, sestavljenega iz strojev in naprav različnih proizvajalcev in modelov, se pojavijo težave pri poenotenju potrebnih maziv, saj vsi pomembnejši proizvajalci tesno sodelujejo z izbranim proizvajalcem maziv, ki seveda priporoča svoje izdelke. Poenotenje maziv je za uporabnika ugodno z vidika zmanjšanja skupnih stroškov vzdrževanja, zmanjša pa se tudi možnost za zamenjavo posameznih maziv.

Pričujoče delo prinaša izčrpno zbirko preglednic, ki bodo v pomoč pri mazanju gradbenih strojev, mehanizacije za zemeljska dela in gradbenih kompresorjev. Sedemdeset najpomembnejših izdelovalcev tovrstnih strojev in naprav je predstavljenih po abecednem redu, pri vsakem pa je navedena vrsta strojev in posamezni modeli iz njihove ponudbe. V katalogu tako najdemo podatke za stroje in naprave od najrazličnejših nakladalnikov, bagrov, grabilnikov, valjarjev pa vse do gradbenih žerjavov in kompresorjev. V preglednicah so za vsak model stroja ali naprave opredeljena mazalna mesta, ki se delijo na motor in prenose, ta pa nadalje na menjalnik, diferencial, končna gonila, turbinsko sklopko, hidravlični sistem in na elemente, ki se mažejo z mastmi. Za vsako mazalno mesto je navedena količina potrebnega maziva in zahteve po kakovosti in viskoznosti v obliki specifikacij, katerim mora mazivo ustrezati. Zahtevane specifikacije so izbrane iz sistema mednarodnih klasifikacij, ki jih najdemo na embalaži vseh priznanih proizvajalcev maziv.

Zbirka preglednic za mazanje gradbene mehanizacije je koristen pripomoček za vzdrževalce tovrstnih strojev in naprav, saj so na enem mestu zbrani podatki za potrebna maziva glede na zahtevano kakovost in viskoznost, neodvisno od ozkih internih specifikacij posameznih proizvajalcev maziv.

B. Kržan

## Osebnosti vesti

### Personal Events

#### Doktorati, magisteriji, diplome

##### DOKTORATI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je dne 19. aprila 2001 mag. **Boštjan Cerkvnik** z uspehom zagovarjal svojo doktorsko disertacijo z naslovom: "Uporaba korenskega kriterija za dvig učinkovitosti sorpcijskih hladilnih naprav".

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta z uspehom zagovarjala svoji doktorski disertaciji, in sicer:

dne 20. aprila 2001: mag. **Matjaž Šraml**, disertacijo z naslovom: "Modeliranje kontaktnega utrujanja strojnih delov" in

dne 23. aprila 2001: mag. **Janez Kramberger**, disertacijo z naslovom: "Širjenje razpok v zobnikih s tankim vencem".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo doktorja tehničnih znanosti.

##### MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani sta z uspehom zagovarjala svoji magistrski deli, in sicer:

dne 18. aprila 2001: **Vladimir Boštjan Bregar**, delo z naslovom: "Lasersko čiščenje površin kot optodinamski proces";

dne 23. aprila 2001. **Andrej Kostanjevec**, delo z naslovom: "Optimizacija receptur kalandriranih tesnilnih materialov z uporabo nevronske mreže".

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so z uspehom zagovarjali svoja magistrska dela, in sicer:

dne 13. aprila 2001: **Tatjana Fulder**, delo z naslovom: "Integracija načrtovanja izdelkov in proizvodnje v podjetjih" in **Simona Tušek**, delo z naslovom: "Model virtualnega obdelovalnega sistema v orodjarski proizvodnji";

dne 17. aprila 2001: **Boštjan Zafošnik**, delo z naslovom: "Analiza širjenja razpoke v standardnem preizkušancu pri različnih pogojih obremenjevanja";

dne 19. aprila 2001: **Matjaž Milfelner**, delo z naslovom: "Simulacija rezalnih veličin pri procesu odrezovanja".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo magistra tehničnih znanosti.

##### DIPLOMIRANISO

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 2. aprila 2001: Borut NOVŠAK, Alojzij ŠTRAVS, Dane ŠTRKALJ, Primož VRENK;

dne 23. aprila 2001: Radovan DRAŽUMERIČ, Marjan HOSTA, Nenad KEZELE, Aljoša KOS;

dne 25. aprila 2001: Gorazd BERGANT, Stanislav DROBNIČ, Roman HODNIK, Sašo PRIJATELJ.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so pridobili naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 19. aprila 2001: Darko BORŠTNAR, Robert BRAUC, Aleš BREČKO, Bojan LUKMAN, Matjaž LUZNAR, Branko RUDOLF.

\*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 5. aprila 2001: Franko DRAŠČIČ, Pavle BELE, Igor RIHTAR;

dne 6. aprila 2001: Mirko BEVC, Alma ČEKIČ, Miran GOLEŠ, Jugoslav GRBIČ, Franko KALUŽA, Peter PETROVČIČ, Marko RODE.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 19. aprila 2001: Damjan BIZJAK, Marko DREVENŠEK, Borut JENUŠ, Jože ŠINK.

\*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta pridobila naziv inženir strojništva:

dne 19. aprila 2001: Marjan GREGORIN, Stiven VOČANEC.

## Navodila avtorjem

### Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

- naslov, povzetek, besedilo članka in podnaslove slik v slovenskem in angleškem jeziku,
- dvojezične preglednice in slike (diagrami, risbe ali fotografije),
- seznam literature in
- podatke o avtorjih.

Strojniški vestnik izhaja od leta 1992 v dveh jezikih, tj. v slovenščini in angleščini, zato je obvezen prevod v angleščino. Obe besedili morata biti strokovno in jezikovno med seboj usklajeni. Članki naj bodo kratki in naj obsegajo približno 8 tipkanih strani. Izjemoma so strokovni članki, na željo avtorja, lahko tudi samo v slovenščini, vsebovati pa morajo angleški povzetek.

#### Vsebina članka

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

- Naslov, ki primerno opisuje vsebino članka.
- Povzetek, ki naj bo skrajšana oblika članka in naj ne presega 250 besed. Povzetek mora vsebovati osnove, jedro in cilje raziskave, uporabljeno metodologijo dela, povzetek rezultatov in osnovne sklepe.
- Uvod, v katerem naj bo pregled novejšega stanja in zadostne informacije za razumevanje ter pregled rezultatov dela, predstavljenih v članku.
- Teorija.
- Eksperimentalni del, ki naj vsebuje podatke o postavitvi preskusa in metode, uporabljene pri pridobitvi rezultatov.
- Rezultati, ki naj bodo jasno prikazani, po potrebi v obliki slik in preglednic.
- Razprava, v kateri naj bodo prikazane povezave in posplošitve, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejšo bralčevo razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke<sup>1</sup>.

#### Oblika članka

Besedilo naj bo pisano na listih formata A4, z dvojnimi presledkom med vrstami in s 3 cm širokim robom, da je dovolj prostora za popravke lektorjev. Najbolje je, da pripravite besedilo v urejevalniku Microsoft Word. Če uporabljate kakšen drug urejevalnik besedil, prosimo, da besedilo konvertirate v navadno ASCII (tekstovno) obliko. Hkrati dostavite odtis članka na papirju, vključno z vsemi slikami in preglednicami ter identično kopijo v elektronski obliki.

Prosimo, da ne uporabljate urejevalnika LaTeX, saj program, s katerim pripravljamo Strojniški vestnik, ne uporablja njegovega formata. V urejevalniku LaTeX oblikujte grafe, preglednice in enačbe in jih stiskajte na kakovostnem laserskem tiskalniku, da jih bomo lahko presneli.

Enačbe naj bodo v besedilu postavljene v ločene vrstice in na desnem robu označene s tekočo številko v okroglih oklepajih

#### Enote in okrajšave

V besedilu, preglednicah in slikah uporabljajte le standardne označbe in okrajšave SI. Simbole fizikalnih veličin v besedilu pišite poševno (kurzivno), (npr.  $v$ ,  $T$ ,  $n$  itn.). Simbole enot, ki sestojijo iz črk, pa pokončno (npr.  $\text{ms}^{-1}$ , K, min, mm itn.).

Papers submitted for publication should comprise:

- Title, Abstract, Main Body of Text and Figure Captions in Slovene and English,
- Bilingual Tables and Figures (graphs, drawings or photographs),
- List of references and
- Information about the authors.

Since 1992, the Journal of Mechanical Engineering has been published bilingually, in Slovenian and English. The two texts must be compatible both in terms of technical content and language. Papers should be as short as possible and should on average comprise 8 typed pages. In exceptional cases, at the request of the authors, speciality papers may be written only in Slovene, but must include an English abstract.

#### The format of the paper

The paper should be written in the following format:

- A Title, which adequately describes the content of the paper.
- An Abstract, which should be viewed as a miniversion of the paper and should not exceed 250 words. The Abstract should state the principal objectives and the scope of the investigation, the methodology employed, summarize the results and state the principal conclusions.
- An Introduction, which should provide a review of recent literature and sufficient background information to allow the results of the paper to be understood and evaluated.
- A Theory
- An Experimental section, which should provide details of the experimental set-up and the methods used for obtaining the results.
- A Results section, which should clearly and concisely present the data using figures and tables where appropriate.
- A Discussion section, which should describe the relationships and generalisations shown by the results and discuss the significance of the results making comparisons with previously published work. (Because of the nature of some studies it may be appropriate to combine the Results and Discussion sections into a single section to improve the clarity and make it easier for the reader.)
- Conclusions, which should present one or more conclusions that have been drawn from the results and subsequent discussion.
- References, which must be numbered consecutively in the text using square brackets [1] and collected together in a reference list at the end of the paper. Any footnotes should be indicated by the use of a superscript<sup>1</sup>.

#### The layout of the text

Texts should be written in A4 format, with double spacing and margins of 3 cm to provide editors with space to write in their corrections. Microsoft Word for Windows is the preferred format for submission. If you use another word processor, please convert to normal ASCII (text) format. One hard copy, including all figures, tables and illustrations and an identical electronic version of the manuscript must be submitted simultaneously.

Please do not use a LaTeX text editor, since this is not compatible with the publishing procedure of the Journal of Mechanical Engineering. Graphs, tables and equations in LaTeX may be supplied in good quality hard-copy format, so that they can be copied for inclusion in the Journal.

Equations should be on a separate line in the main body of the text and marked on the right-hand side of the page with numbers in round brackets.

#### Units and abbreviations

Only standard SI symbols and abbreviations should be used in the text, tables and figures. Symbols for physical quantities in the text should be written in Italics (e.g.  $v$ ,  $T$ ,  $n$ , etc.). Symbols for units that consist of letters should be in plain text (e.g.  $\text{ms}^{-1}$ , K, min, mm, etc.).



Vse okrajšave naj bodo, ko se prvič pojavijo, napisane v celoti v slovenskem jeziku, npr. časovno spremenljiva geometrija (ČSG).

### Slike

Slike morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot sl. 1, sl. 2 itn. Posnete naj bodo v kateremkoli od razširjenih formatov, npr. BMP, JPG, GIF. Za pripravo diagramov in risb priporočamo CDR format (CorelDraw), saj so slike v njem vektorske in jih lahko pri končni obdelavi preprosto povečujemo ali pomajšujemo.

Pri označevanju osi v diagramih, kadar je le mogoče, uporabite označbe veličin (npr.  $t$ ,  $v$ ,  $m$  itn.), da ni potrebno dvojezično označevanje. V diagramih z več krivuljami, mora biti vsaka krivulja označena. Pomen oznake mora biti pojasnjen v podnapisu slike.

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezične.

Za vse slike po fotografskih posnetkih je treba priložiti izvorne fotografije ali kakovostno narejen posnetek. V izjemnih primerih so lahko slike tudi barvne.

### Preglednice

Preglednice morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot preglednica 1, preglednica 2 itn. V preglednicah ne uporabljajte izpisanih imen veličin, ampak samo ustrezne simbole, da se izognemo dvojezični podvojitvi imen. K fizikalnim veličinam, npr.  $t$  (pisano poševno), pripišite enote (pisano pokončno) v novo vrsto brez oklepajev.

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

### Seznam literature

Vsa literatura mora biti navedena v seznamu na koncu članka v prikazani obliki po vrstni za revije, zbornike in knjige:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

### Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštne naslove, številke telefona in faksa ter naslove elektronske pošte.

### Sprejem člankov in avtorske pravice

Uredništvo Strojniškega vestnika si pridržuje pravico do odločanja o sprejemu članka za objavo, strokovno oceno recenzentov in morebitnem predlogu za krajšanje ali izpopolnitev ter terminološke in jezikovne korekture.

Avtor mora predložiti pisno izjavo, da je besedilo njegovo izvirno delo in ni bilo v dani obliki še nikjer objavljeno. Z objavo preidejo avtorske pravice na Strojniški vestnik. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti SV naveden kot vir.

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

Uredništvo  
STROJNIŠKEGA VESTNIKA  
p.p. 197/IV  
1001 Ljubljana  
Telefon: (01) 4771-757  
Telefaks: (01) 2518-567  
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si

All abbreviations should be spelt out in full on first appearance, e.g., variable time geometry (VTG).

### Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. Figures may be saved in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, the use of CDR format (CorelDraw) is recommended for graphs and line drawings, since vector images can be easily reduced or enlarged during final processing of the paper.

When labelling axes, physical quantities, e.g.  $t$ ,  $v$ ,  $m$ , etc. should be used whenever possible to minimise the need to label the axes in two languages. Multi-curve graphs should have individual curves marked with a symbol, the meaning of the symbol should be explained in the figure caption.

All figure captions must be bilingual.

Good quality black-and-white photographs or scanned images should be supplied for illustrations. In certain circumstances, colour figures may be considered.

### Tables

Tables must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Table 1, Table 2, etc. The use of names for quantities in tables should be avoided if possible: corresponding symbols are preferred to minimise the need to use both Slovenian and English names. In addition to the physical quantity, e.g.  $t$  (in Italics), units (normal text), should be added in new line without brackets.

All table captions must be bilingual.

### The list of references

References should be collected at the end of the paper in the following styles for journals, proceedings and books, respectively:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

### Author information

The following information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal addresses, telephone and fax numbers and E-mail addresses.

### Acceptance of papers and copyright

The Editorial Committee of the Journal of Mechanical Engineering reserves the right to decide whether a paper is acceptable for publication, obtain professional reviews for submitted papers, and if necessary, require changes to the content, length or language.

Authors must also enclose a written statement that the paper is original unpublished work, and not under consideration for publication elsewhere. On publication, copyright for the paper shall pass to the Journal of Mechanical Engineering. The JME must be stated as a source in all later publications.

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

Editorial Board of the  
JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING  
P.O.Box 197/IV  
1001 Ljubljana, Slovenia  
Telephone: +386 (0)1 4771-757  
Fax: +386 (0)1 2518-567  
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si