

tribologija u industriji

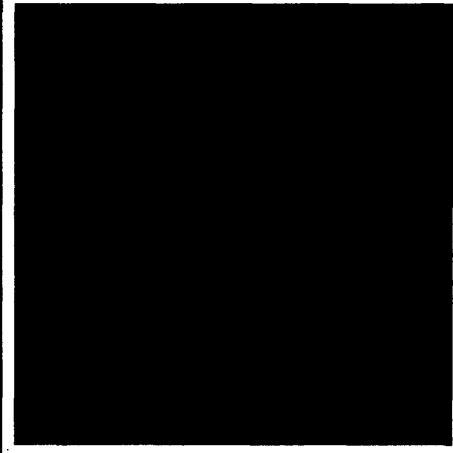
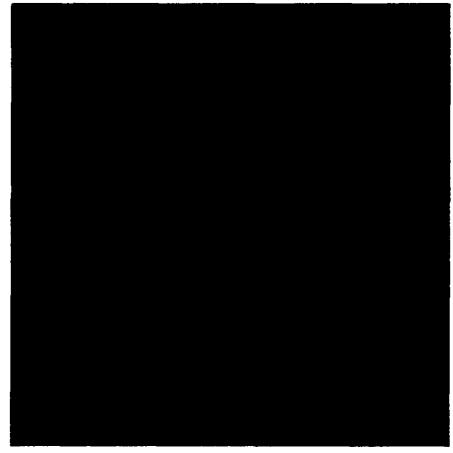
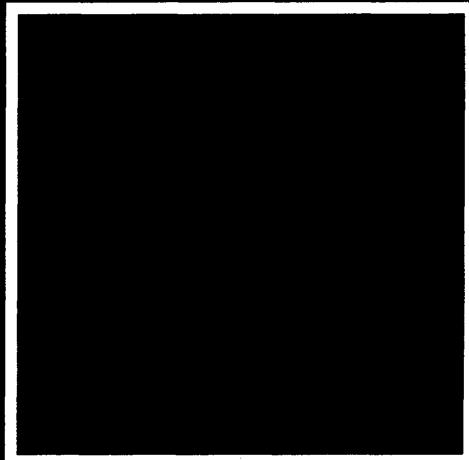
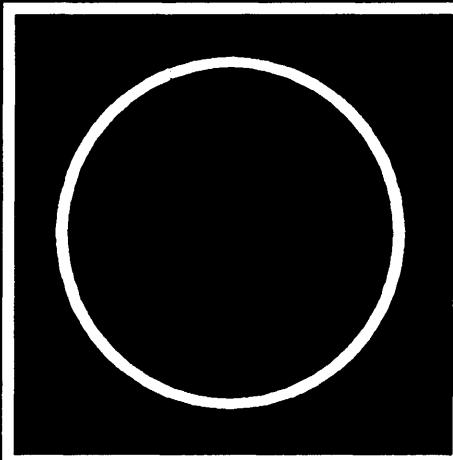
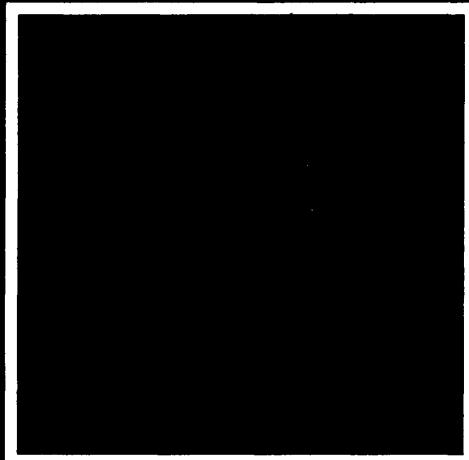
tribology in industry ◇ трибология в промышленности

YU ISSN 03551 - 1642

GODINA XV

MART 1993

1



Nauka i tehnologija o prenosu i rasipanju masa i energije u mehaničkim sistemima



tribologija u industriji

tribology in industry – трибология в промышленности

sadržaj



contents



содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦАISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯZA NEPOSREDNU PRAKSU
FOR DIRECT PRACTICE
ДЛЯ ПРАКТИКИNOVOSTI
NEWS
НОВОСТИKNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫNAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯS. TANASIJEVIĆ: Tribologija i obrazovanje ◊-
Tribology and Education ◊-
Трибология и образование 3E. ASSENOVA, K. DANEV: Fractal-information Approach
in Tribology: Interaction Between Intermediate Fluid Materials
and Solid Contact Surfaces ◊ Fraktalno-informacioni pristup u
tribologiji: interakcije između maziva i kontaktnih površina ◊
Фрактально-информационный подход трибологическим
явлением: взаимодействие смазки и контактирующих поверхностей 7LJ. PAPIĆ: Pouzdanost planiranja reznog alata u proizvodnim
procesima ◊ Reliability Planing of Cutting Tools in Production
Processes ◊ Надежность планирования режущего инструмента
в производственных процессах 13M. BABIĆ, B. JEREMIĆ, N. MILIĆ: Mogućnost primene
PVD prevlaka na konstrukcijskim čelicima ◊ Possibility of Application
of The PVD Coatings on Constructive Steels ◊ Взможность
применения ПВД-покрытий на конструкционных сталях 22M. BABIĆ, N. MILIĆ: TIS - Informacije: Tribološke karakteristike
TiN prevlake 27

Balkanski Komitet za tribologiju 30

. 31

. 32

S. TANASIJEVIĆ

Tribologija i obrazovanje

Trenje-čudnovati fenomen prirode, vernali je pratilac čoveka od davnina. Ono je podarilo čovečanstvu toplotu i vatru, mogućnost zaustavljanja automobila i voza u kratkom vremenu. Trenje je i u zapisu čovečjeg glasa na gramofonskoj ploči, a i omogućava da čujemo zvuk violine. Život bi bio tako siromašan bez trenja.

Ali, potrebno je reći da se oko 1/3 svetskih energetskih resursa troši na trenje. Pri trenju (i samo pri trenju) istovremeno se dešavaju mehanički, električni, toplotni, vibracioni i hemijski procesi. Sa trenjem je neraslidivo vezan i jedan od značajnih problema današnjice-habanje. Trenje košta. Hiljadama milijardi novčanica svih oznaka plaća se danas ovaj fenomen. Rashodi su ogromni i svake godine se uvećavaju.

Uočeni u osviti civilizacije, problemi trena i habanja stoje pred čovekom na celom putu njegove tehničke evolucije. Tribologija kao nauka o trenju, habanju, podmazivanju, ali i o drugim pojavama na površinama koje su u dodiru i relativnom kretanju, u svim svojim etapama razvoja rešavala je ovakve probleme onoliko i onako koliko je mogla i znala. Motika, nož i lopata potiču i dolaze iz duboke hiljadogodišnje istorije i služe nam zajedno sa parnim čekićem, laserom i

buldožerom. I svako od njih je bio originalno tehničko remek delo u svoje vreme: Tribološki problemi lopate nisu bili ništa manje važni od triboloških problema buldožera danas.

Na izmaku ovog veka tribologija se nalazi na veoma značajnoj etapi svoga razvoja na putu za 21. vek. Zastarele predstave još čvrsto zauzimaju svoje pozicije, a novi pogledi i položaji još nisu dovoljno očvrsli i samo postepeno dobijaju priznanja. Očekuje se definisanje novih magistralnih puteva kretanja ove nauke, definisanje neispitanih oblasti, otkrivanje novih rezervi razvoja, preusmeravanje interesa u nove oblasti istraživanja i mnogo drugog.

Moguće je da u skorašnjoj budućnosti tribolozi u saradnji sa drugim specijalistima (fizičarima, hemičarima, metalurzima, ...):

- razrade metode izvlačenja dragocenih metala iz morske vode,
- razviju nove konstrukcione i massive materijale poboljšanih triboloških karakteristika,
- razviju nove tehnološke procese obrade koji isključuju periode uhoodavanja elemenata tribomehaničkih sistema,
- usavrše pouzdane metode proračuna TMS na habanje, pri zadatom veku trajanja mašinskih sistema,

- razrade metode tribološki ispravnog konstruisanja,
- razviju nove prevlake poboljšanih triboloških karakteristika,
- reše i mnoge druge zadatke.

Ovo su samo neki od mogućih pravaca daljeg usmeravanja i razvoja tribologije. Osnovni cilj praktične primene tribologije kao moderne i značajne naučne oblasti je razvoj proizvoda (proizvod kao tehnički i mašinski sistem).

Savremena nastojanja da se u privredovanje konačno uvedu i zažive tržišna pravila, intezivirala su potrebu za razvojem proizvoda koji se sasvim sigurno može pretstaviti trouglom KVALITET-CENA-ROK. Prirodni nesklad zahteva: što viši kvalitet uz što niže cene i kraći rok rešava se danas izuzetnim naporima, prvenstveno odgovarajućim znanjima. Znanje je najsigurniji faktor prepoznavanja razvijeni-nerazvijeni, njime se ne rešavaju samo zahtevi trougla već i širi zahtevi čoveka, društva i prirode. Delovanje znanja usmerava jednoznačno pravac selidbi "čistih" i "prljavih" tehnologija, doprinoseći u izvesnom smislu formiranju novog oblika "kolonijalizma". Razvijeni u svoje proizvode sve više ugrađuju znanje, a nerazvijeni jeftin radi energiju, uz obilno zagadavanje svoje okoline.

Da bi naši proizvodi bili tržišno konkurentni na svetskoj pijaci, neophodno je u njih ugraditi mnogo raznih znanja, pa i znanja iz tribologije. Bez znanja tribologije ne mogu se na kvalitetnom nivou razraditi frikcioni materijali za kočnice, konstruisati motori sa unutrašnjim sagorevanjem, izraditi poljoprivredne mašine, razraditi mazivi materijali za automobile, remontovati strugovi, identifikovati uzroci havarija aviona i dr.

Analiza sprovedenih anketa, razgovori za okruglim stolovima kao i postignuti rezultati u mašinstvu, svedoče o nedovoljnem znanju iz tribologije koje poseduju naši inžinjeri u praksi. Odustvo znanja iz tribologije primetno je kod konstruktora, inžinjera održavanja i remonta, pa čak i kod naučnih radnika susednih (graničnih) specijalnosti. Nepravilni izbor maziva, prevlaka, konstrukcija TMS, tehnologija izrade, uslova eksploatacije i dr.

oblasti u srednjem, višem i visokom obrazovanju.

Ako se obrazovanje ostvaruje procesom planskog rada u školi ili fakultetu i ima za cilj naoružavanja učenika znanjem, umećem i navikom, analize pokazuju da se tribologija kao naučna oblast ne izučava u srednjim školama naše zemlje. U nastavnim programima kojima se predviđa obim znanja i red izlaganja u srednjim školama mašinskog profila, tribologije nema.

Na višim mašinskim školama stanje je isto, tribologije takođe nema.

Analiza nastavnih planova i programa pokazuje da se tribologija kao predmet ne izučava ni na svim mašinskim fakultetima naše zemlje. U tabeli 1 dat je trenutni presek stanja visokoškolskog obrazovanja iz tribologije.

Tribologija se sistematski izučava samo na tri fakulteta u redovnom i po-

metala rezanjem, Eksploracija, Održavanje, ...), ali to nimalo ne poboljšava opšti utisak. Nema sumnje da je tribologija kao mlada ali i značajna naučna oblast nedovoljno prisutna u današnjem sistemu obrazovanja i da je jedinstveni put primene triboloških znanja u praksi - razvoj svih formi tribološkog obrazovanja. Neophodno je uvodenje tribologije u programe srednjeg, višeg i visokog obrazovanja mašinskih profila. Tribološka znanja se moraju ugraditi u sistem obrazovanja svih studenata a ne samo pojedinih smerova, što bi omogućavalo neprekidan razvoj tribologije i povećanje koristi od nje.

Drugi, ali ništa manje važan zadatak u oblasti tribološkog obrazovanja je obezbeđenje nesmetanog protoka informacija. Važno je iznaći i razraditi metode kojima će dobar deo postojećih i budućih informacija naći najkraći put do konstrukcionih biroa i

Tabela 1

MAŠINSKI FAKULTET	Redovna nastava		Poslediplomska nastava	
	Smer	Semestar	Specijalizacija	Magistratura
BEOGRAD	MOTORI I MOTORNA VOZILA	VI	+	+
KRAGUJEVAC	PROIZVODNO MAŠINSTVO	VI	+	+
	MAŠINSKE KONSTRUKCIJE I MEHANIZACIJA	VII	+	+
NOVI SAD	INDUSTRIJSKI SISTEMI	VII	+	+
NIŠ	MAŠINSKE KONSTRUKCIJE I MEHANIZACIJA	-	+	+
KRALJEVO	-	-	-	-
PRIŠTINA	-	-	-	-
TITOGRAD	-	-	-	-

su samo posledice takvog stanja. Ozbiljne posledice i veliki ekonomski gubici su često rezultat nezadovoljavajućih znanja iz tribologije.

Kako se pod pojmom obrazovanja podrazumevaju rezultati nastavnog procesa koji se izražavaju sistemom ZNANJE-UMEĆE-NAVINKA, logično je da se do triboloških znanja fundamentalno i najpre dolazi obrazovanjem. Za podizanje nivoa znanja iz tribologije neophodno je podizanje nivoa obrazovanja iz ove naučne

slediplomskom obrazovanju. Važno je napomenuti da je ona prisutna samo na pojedinim smerovima ovih fakulteta i da osnovna znanja iz tribologije stiče jako mali broj studenata jedne generacije.

Posebno je zabrinjavajuće da se tribologija u redovnoj nastavi ne izučava na fakultetima koji pokrivaju značajne centre mašinske industrije (Niš, Priština). Napomenimo da se neka od poglavlja tribologije delimično izlažu u okviru drugih predmeta (Obrada

pogona. Znanje u "ormanu" je beskorisno i za ekonomiju i za blagostanje ljudi. Nužna su ne samo nova znanja već i putevi da se postojeće informacije blagovremeno i na pravi način iskoriste. Ovo drugo je često teže nego dobijanje i razvijanje novih znanja. Podizanje nivoa triboloških znanja inžinjera u industriji kao i obezbeđivanje nesmetanog protoka informacija se uspešno postiže permanentnim tribološkim obrazovanjem. Određena iskustva koja pojedini fakulteti imaju, pokazuju da

su u tu svrhu najefikasniji seminari permanentnog obrazovanja koji se održavaju u toku 2-3 dana za inžinjere jedne ili više istorodnih organizacija. Na seminaru se izlažu teme i pružaju informacije iz određene oblasti tribologije, značajne za obrazovanje polaznika.

Za podizanje nivoa tribološkog obrazovanja naših inžinjera i studenata važno je i razvijanje publicističke delatnosti iz oblasti tribologije. Podsećamo da u našoj zemlji već više godina uspešno izlazi specijalizovani časopis "Tribologija u industriji" i da postoji više knjiga domaćih autora iz tribologije.

Posmatrano u celini, nije preoštro reći da tribologija u našoj zemlji još nije našla svoje mesto u sistemu obrazovanja. Zato je neophodno iskoristiti uticaj svih dobromernih društava i organizacija da bi se sadašnje stanje

promenilo. Posebno mesto u koncipiranju novog položaja tribologije u obrazovanju na svim nivoima ima Jugoslovensko društvo za tribologiju.

Novoformirano Jugoslovensko društvo za tribologiju će morati u narednom periodu više pažnje posvetiti ovom problemu. Polazeći od značaja tribologije u razvoju novih proizvoda i značaja obrazovanja u podizanju nivoa znanja iz ove interdisciplinarne naučne oblasti, čini nam se da je neophodno izuzetnu aktivnost ovog društva usmeriti ka:

- ▶ uvođenju osnovnih principa tribologije u odgovarajuće predmete srednjeg obrazovanja mašinskog smera,
- ▶ uvođenju nastave tribologije za studente svih smerova viših mašinskih škola i fakulteta,
- ▶ permanentnom obrazovanju iz tribologije inžinjera u privredi, kroz

različite oblike seminara i druge načine razmena informacija,

- ▶ organizovanju konsultacionih triboloških centara,
- ▶ intenzivnjem razvoju publicističke delatnosti (knjige, priručnici, štampane informacije i dr.)
- ▶ daljem podizanju kvaliteta časopisa "Tribologija u industriji"
- ▶ razvoju novih metoda nesmetanog protoka informacija na relaciji naučne ustanove - praksa, i dr.

Ne treba očekivati da će se dosadašnji, nezadovoljavajući položaj tribologije u sistemu obrazovanja tako lako promeniti i za kratko vreme. Ukorenjene navike i već stecene pozicije se teško menjaju i ispravljaju. Ali je obaveza i pravo društva da sve pokuša i učini maksimalno što može.

U ime generacija koje dolaze.

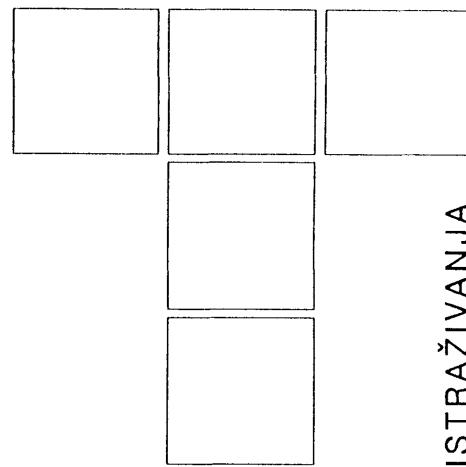
Tribology and Education

Contemporary trends to finally introduce marketing rules in economy have intensified the need for product development. In order for our products (technical or machine systems) to be competitive on the world market it is necessary to implement into them many different knowledges, and also knowledge from tribology. Analysis of conducted surveys, round table discussions, as well as results achieved in mechanical engineering, testify about insufficient knowledge from tribology which possess our practice engineers.

For increasing the level of the knowledge from tribology it is necessary to increase the level of education in this field, in high-schools, higher schools and universities. Increase of tribology knowledge level of industry engineers, as well as ensuring the unimpeded flow of information, can be achieved through permanent tribological education. A special place in the concept of new position of tribology in education at all levels belongs to Yugoslav Society for Tribology.

Трибология и образование

Современное стремление - ввести в производство рыночные законы требует усиленного развития из-делий. Чтобы наши изделия - технические или машиностроительные - были конкурентными на мировом рынке то необходимо встроить в них разнообразные знания по трибологии, которыми обладают инженеры, работающие в промышленности. Для повышения уровня знаний по трибологии необходимо повысить уровень образования по этой научной области в среднем и высшем образовании. Повышение уровня трибологических знаний инженеров в промышленности и обеспечение свободного потока информации осуществляется постоянным трибологическим обучением. Особое место в планировании нового положения трибологии в системе обучения кадров на всех уровнях принадлежит Югославскому обществу по трибологии.



E. ASSENOVA, K. DANEV

ISTRAŽIVANJA

Fractal-information Approach in Tribology: Interaction Between Intermediate Fluid Material and Solid Contact Surfaces

1. BASIC NOTIONS OF CONTACT SYSTEMS

Contact interaction is the most general transfer process and promotes the link between the elements of a system. We agree with the assumption that a system is a combination of elements in a given relationship between each other ensuring the entity of the combination.

The interaction is realized through exchange of the information which is an objective reflection of reality by the subject. Instead of the commonly used idea of energy and matter exchange we introduce the information exchange as basic relation in systems communication.

Further, we consider the tribosystem as a system which behaves essentially determined by the contact. It is a dissipative dynamical system where energy and matter dissipation is realized through contact processes: friction, wear, emanation, etc., it means that entropy production occurs. In fact, entropy is a measure of energy degradation or dissipation. Dissipation provoking processes are irreversible.

The great spread of tribological studies data was generally related to the extreme complexity of tribological phenomena. Now it seems more likely to ascertain that the reason is in the stochastic behavior of tribosystem elements or by the irreversibility of the tribological processes, an obvious illustration being the dissipative nature of the tribosystem.

*Emilia Asenova,
Tribology Centre, Sofia
Krassimir Danev,
Tribology Centre, Sofia*

Two basic characteristics can be revealed in the evolution of contact systems:

- 1) homogenization of the system, i.e. information accumulation or increase of entropy;
- 2) dissipation in the system, i.e. increase of system/environment contact intensity, promoting in such a way opening of the system and exporting of entropy/information.

Both states are due to processes of variation or, more generally said, to motion processes leading to an increase of system entropy/information or of entropy production. Because of its stochastic nature, motion creates or increases information. Every bifurcation yields a system variation that by convention we call memory of the system. New information is generated only in the case of a random choice, but not a selection of the best variant [1]. So, realization of one of multiple-choice possible events yields a result that is kept steady through the implementation of the event of the changes it had caused. Thus, because of the fact that reversible processes do not allow random realization of simultaneously probable events, they do not generate information. The full informational "satiation" of the system corresponds to its complete homogeneity. Being reversible and giving thus no raise of information, determinative variations of the system are not significant for the evolution.

The basic characteristics mentioned above could also be presented as follows:

- tendency towards independent maintenance of the system by means of information accumulation (Inc.. homogenization), and
- export of information out of the system leading to integration with other systems, realized through specialized channels or dissipative structures).

2. AN APPROACH FOR TRIBOSYSTEMS STUDY

A conclusion that contact systems are incognizable cannot be drawn according to the above reasons. In spite of their complex structure and behavior, non linear physical systems are determined by some universal characteristics: attractors, critical size, communication speed, internal time of the system.

To explain irreversible systems behavior we do not need initial conditions but attractors, being occasionally with complicated structure, preventing thus a description of systems behaviour by means of definite laws with possible further prediction. The plausible manner of description appears to be a direct evolution emulation of the system.

Physics studies used to focus the attention on mathematically reducible phenomena, suited to simple description. In real physical systems, however, mathematical compatibility is rather an exception than a rule. Computations related to evolution are not mathematically compatible: an effective way of that solution is the direct evolution imitation. In fact, interaction between two objects is more easily presented by a formula, while the interaction between several objects lends itself better to algorithmization. Turbulent flows seem to be a suitable example for computable unreduceability. Conventionally, tribological properties, like for example the pneumo-hydraulic contact conductance, have also been considered [2] using mathematically reducible methods, i.e. we face the implication of a system-phenomenological approach in tribology. Even though this approach is suited to the study of two-elements interaction, complex systems behavior seems to fit better to an evaluation - algorithmical approach.

A system could be simulated at different levels: from individual particle motion description to differential equations for the basic system states. The existence of computable incompatibility implies the possibility of a higher level, suited to a more abstract model, that hints at the necessity of a direct imitation manner of result searching.

Computer program performance is similar to a physical experiment in many regards. Contrary to the physical object, however, the objects in the computation experiment are not restricted by natural laws, but only obey machine program laws, which of course, shouldn't be contradictory. Mathematical processes that could be described by computer programs are not limited by conventional mathematical operations and functions. Thus, the use of computer makes it possible, both science and mathematics, immanently algorithmic laws, to be determined. It is clear that even though the system elements are simple, the general evolution of the system would be computably incompatible. Such a kind of incompatibility can be inevitably observed when the behavior of the system appears complex or chaotic. Availability of problems that defy

solution in mathematical models of physical systems could be seen as a manifestation of Goedel's theorem of unsolvability in mathematics proved by Goedel in 1931. It points out that in all but the most simple mathematical systems are to be found statements that cannot be proved or rejected through an arbitrarily large but limited mathematical or logical process. The proof of these statements might require an infinite number of logical steps.

The hinge point in science is, however, the introduction of a new way of thinking. Science laws are tending to be regarded as algorithms. Many of them have already been studied by means of computation experiments. Physical systems are considered as computation systems which ensure information processing almost in the same way as a computer. Hence, it becomes possible to study new aspects of natural phenomena that might well lead to a breakthrough in understanding of the tasks we have to discuss with nature.

Another characteristics is the size of a nonlinear physical system. A small system can be completely controlled by the environment; its growth gives rise to new regions of stability. Thus, a fluctuation is not able to embrace the whole system, it has at first to settle in one region. Fluctuations are hushed or, on the contrary, grip the whole system depending on whether the initial region size is smaller or not than a given critical size. The notion of critical size is related to the fact that "the outer world", i.e. the environment of the fluctuating region tends always to weaken the fluctuations. The critical size reveals the ratio between bulk and the contact surface through which interaction is realized [3]. As a consequence it becomes necessary to introduce pseudoparticles in the modelling, that are not smaller than the critical size, taking into account that the behavior of the system, as regards irreversible processes, is independent on subregions as smaller size.

Information transmission in the contact is realized through the formation of specific dynamic structures we shall call information channels. The underlying idea is that the introduction of this term extends the essential meaning of the concept of contact confirming at the same time the importance of using "information" as essential characteristic and enabling consideration of information channels similarly to dissipative structures in irreversible thermodynamics.

3. FRACTAL MODELING OF CONTACT SURFACES

Being a basic structural element solid surfaces play a dominant role in contact body formation. One of their most important properties is surface roughness. Conventionally, surfaces are modelled according to their concrete functions. Quantitative data on contact surfaces are

needed in the solution of some significant problems which could be successfully done developing adequate surface models, i. e. independently on the treated problems with maximal closeness to the real nature of contact. That would be also necessary for the creation of a complex contact model. Another requirement is the independence of the resulting from the model objects on the scale level of modelling, i. e. they should be scale-similar objects.

A number of observations show that surfaces give evidence of scale-invariance which implies the relevance of their fractal modelling. The topography of rough surfaces influences a lot of tribological phenomena such as friction, wear, lubrication [4]. Taking into consideration that the geometric structure of rough surfaces is random, and that the roughness parameters are found at a large number of length scales between the length of a sample and atomic scales, it becomes obvious that to study the mechanism of any tribological phenomenon it is absolutely necessary to characterize multiscale surfaces and to know the structure at all length scales relevant to the phenomenon [4]. It is apparent that fractal geometry would play an important role in the study of surface roughness.

Fractal structures are characterized by the following properties:

1. They are invariant with respect to length scales. Every part of a fractal consists of identical elements on the smaller length scale. Scale invariance appears to be a kind of "symmetry" property for the fractal object. Like round bodies which are symmetric with respect to a rotation axis, so are fractals with respect to the stretch center or the scale variation.
2. Characteristic feature determining fractal behaviour is the fractal dimension D which is noninteger. To evaluate the fractal dimension of an object we have, for example, to calculate the average number N of unit particles closed in a sphere with radius r and a centre lying on the object. The unit number is equal (accurate up to a constant value) to the radius raised to power D , i.e. $N = c \cdot r^D$. In the case of a straight line $D = 1$: tripling sphere radius leads to tripling of the units closed in it. For conventional two-dimensional continua tripling the sphere radius evolves nine times increase of the number of the units in the sphere. In the case of a fractal object with dimension $D=1.46$ tripling of r leads to a five times increase of the number of the units in the sphere. Thus, the number of the units in this case grows faster than for a straight line and slower than for two-dimensional continuum. This is why we declare that fractal objects occupy intermediate position between a straight line and a plane.

Fractal dimension of a physical body is a "universal" property not dependent on the multitude of concrete details. It characterizes the behavior of the structure in a general

way, apparently obscuring through averaging the details. Besides, many contact phenomena are easily embraced by a fractal model of contact, e.g. porosity, lubricate, wear debris particularities, real contact area distribution, etc. [5].

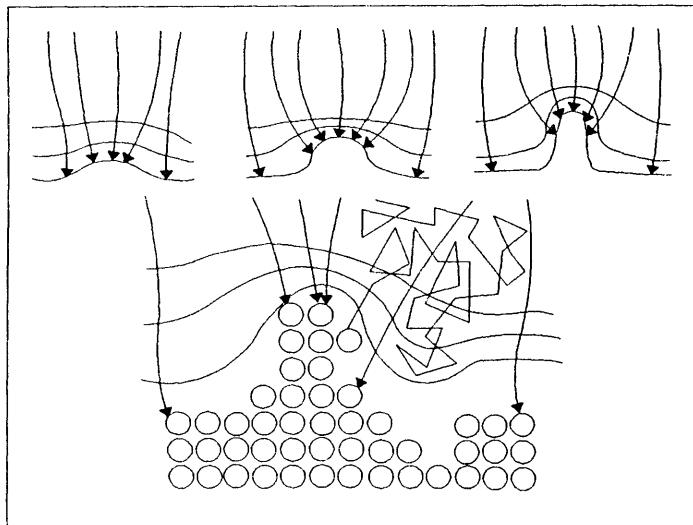
It is clear that fractal properties appear to suit to surface modelling, namely, their length scale invariance, fractional dimension, randomly organized structure. Fractals are defined only by a few characteristic parameters (fractal dimension, spectral power). Several papers appeared recently in the scope of fractal modelling of real surfaces [6, 7]. A variety of methods are also known on this topic, going to great varieties, such as white noise model and cumulative wins at dice, as well as modified Koch curve and fractal Brownian functions [4, 8].

A suitable method of real surfaces modelling seems to be the diffusion-limited-aggregation model (*DLA*-model) proposed by Witten and Sander as fractal objects formation method [9]. This model consists of the following:

Consider an object - a cluster, growing as follows: at times a particle joins the cluster and gets trapped not searching for another position any more. This process shows the aggregation of the object and the lack of rearrangement makes it an example of nonequilibrium growth process. Assume now that the particles are random walkers and diffuse towards the aggregate due to a random motion, i.e. by a sequence of steps with length and direction defined in a random way. The cluster formation begins with the introduction from a fixed distance of a particle towards a straight line. It moves randomly with a gradient to the cluster. When coming within a fixed distance, the interaction radius, (or when coming "in contact" with the cluster) it gets trapped. Introduce another particle which can now get stuck in the neighbourhood of either the first particle or the line. Repeating this process of *DLA* we obtain clusters with fractal properties.

The structure resulting from this process is not previously fixed but forms automatically, hence there is evidence of a kind of self-organization of the obtained object. How does it happen? Due to noise or random statistics the particles motion on the surface is accompanied by small stacks and pits formation [10] (fig.1). The broken line shows the complex way of the particle, the curved lines evidence the curves of constant particle density, and the vertical ones - the lines of the averaged flow. Once formed the stacks grow faster than the pits (above) having in view that a random walker has a high probability of getting trapped at the peak of the stack or in the neighbourhood (the stack being an attractor). Going down the pit the particle has a higher probability of getting fixed to the wall than getting the bottom, thus, the peak grows larger and its slope steeper, and the probability of filling in the pit gets lower.

The benefit in the above model seems to be the possibility of emulation of some physical processes in the generation of real surfaces (by electroplate coatings, electroerosion, etc.)



*Fig.1. Illustration of DLA fractal growth process
Ilustracija DLA fraktalnog procesa rasta
Иллюстрация DLA фрактальных процессов*

Fractals in nature result obviously from *DLA* processes, such as zinc electroplate coatings, "fingers" due to air flow in glycerin, electrical discharge trails called Lichtenberg pictures. However, fractals couldn't describe every natural object with creeping structure, e.g. the structure of electroplated coating transforms from fractal to dendrite (like snow-flakes) when increasing the tension in the electrolyte. Being nearly as complicated as fractals, dendrites show more symmetric structure than *DLA* clusters. Both fractals and dendrites generate obviously following one and the same mechanism, the difference in the structures depending mainly on one or two parameters (e. g. interaction rate, diffusion constant, etc.).

4. EVOLUTION-ALGORITHMICAL APPROACH IN TRIBOLOGICAL PROPERTIES MODELLING

It is suitable to use an algorithmic approach in real surface modelling which makes it possible for more tribological properties of the contact to be embraced and explained: pneumo-hydraulic contact conductance, lubricatibility, etc. [5]. There have been developed a method and a software profile meter - a relatively simple program scanning the fractal surface, by means of a model tracer with a given radius of curvature providing the resolution of the apparatus. The obtained profilogram enables the evaluation of all standardized roughness parameters, ensuring thus a bridge to the comparison between the modelled surface and real surfaces.

In turn the surface deformation can be simulated by cellular automate. They consist of

a multitude of equal components with a complex behavior, even though each of the components develops according to a simple set of rules.

An illustration of this method is presented for the deformation of a fractal modelled surface during the interaction with a smooth and absolutely hard ideal surface. Following stages are to be distinguished:

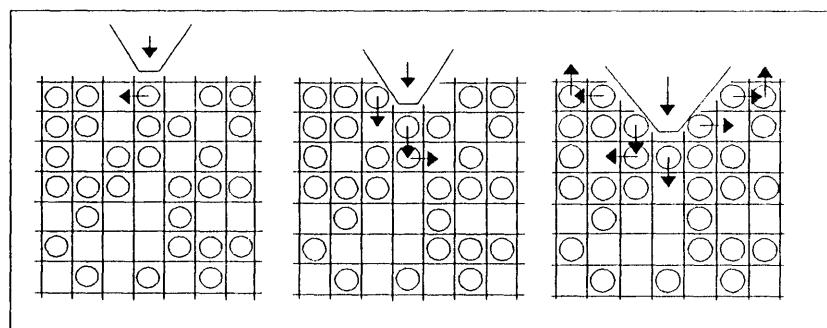
- every step closes with the smooth and the fractal surface striking the distance between them with one array of components;
- if an occupied cell is available in the neighbourhood of the smooth surface (one array distance), the cell should be discharged;
- this discharge is realized by a free-cell checking in the neighbourhood of the occupied cell (one array distance), extending the area of the neighbourhood step by step till a given size.

The ratio of information speed exchange in the fractal and the information interaction rate is given by the size of the checking area. According to the tip of deformation to be emulated we have different kinds of cell checking consequence.

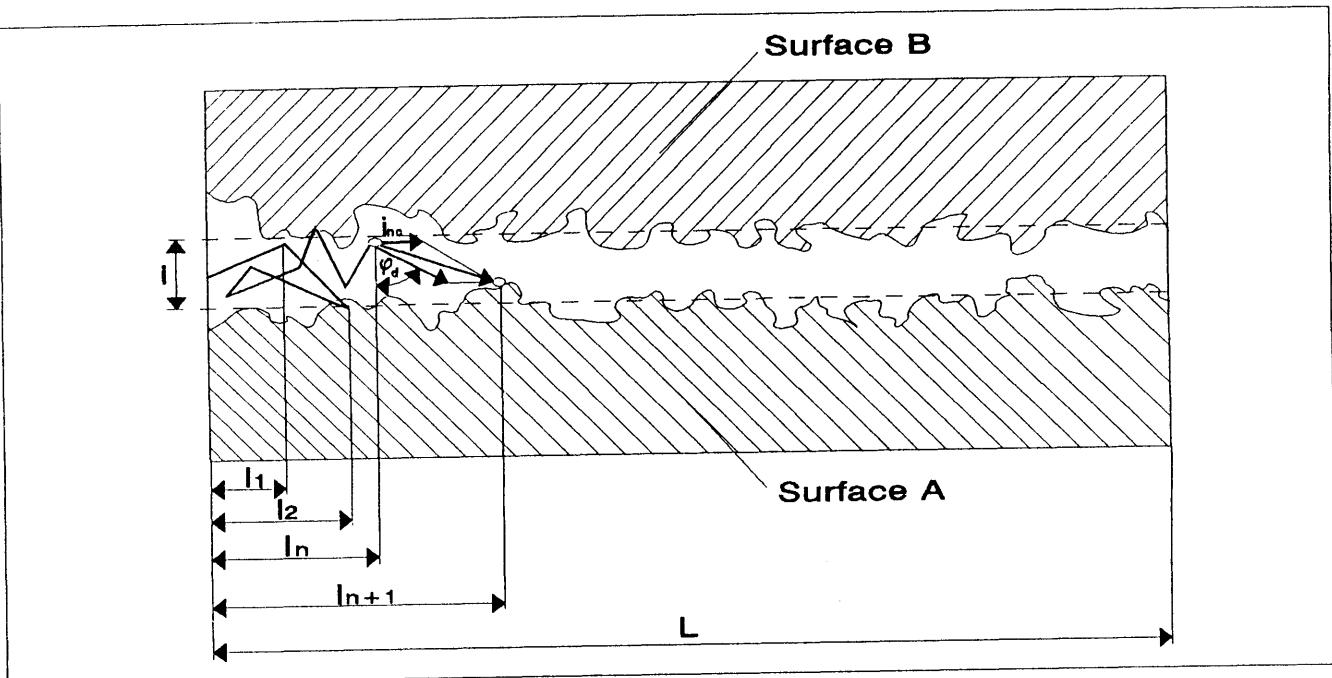
The method developed above deals with contact deformation mechanisms: rearrangement including consolidation and form redistribution of the fractal during the interaction of this with another (smooth or fractal) surface. Similarly, we find the analogous rules when simulating the penetration of an indentor into the fractal surface (fig.2) as in the case of microhardness measurement description.

5. PNEUMO-HYDRAULICAL CONTACT CONDUCTANCE

Another important tribological property, the pneumo-hydraulic contact conductance is studied here again following the information-fractal method as a part of the evolution- algorithmically approach. Once more we use the particle method introducing particles through a model gap formed by fractal surfaces (fig.3) imitating Brownian motion, i. e. random walking with a gradient depending on the simulated fluid pressure. The leakage flow rate is



*Fig. 2. Cellular automata modelling of surface deformation
Modeliranje površinske deformacije
Моделирование поверхностной деформации*



*Fig. 3. Modelling of pneumo-hydraulic contact conductance by random-walker-particles
Modeliranje pneumo-hidrauličnog kontakta
Моделирование пневмогидравлического контакта*

determined by the average time (number of steps) required for the passing of one particle through the model gap, by the free distance d of the particle (and the equivalent contact gap). The leakage flow rate Q varies inversely with the number of steps n , i. e.:

$$Q \approx \frac{d \cdot l}{n},$$

d being related to fluid properties (for example, viscosity). Directed motion increment inc of the particle (potential field) corresponds to fluid pressure. In order to obtain variable pressure along the gap length, the increment shroud depend on the steps number n , realized by the particle. Following iterative relationship can be used in that case:

$$inc_{n+1} = inc_n - k \cdot l_n - inc_n \cdot (l_{n+1} - l_n)$$

calculated at every step of the particle motion. We have written here k for the coefficient, l_n for the momentary horizontal coordinate after the n -th step of the motion.

The methods, proposed above could be considered as a part of a group of algorithmic structure emulation methods used in the fractal - information approach.

REFERENCES

- [1.] EIGEN M., SCHUSTER P., **Hypercycle: Principles of self- organizing of macromolecules**. Moscow, Ed. Mir, 3982 (in Russian).
- [2.] MANOLOV N., **The pneumo-hydraulic method in tribology**. Dr.sc.tech. Diss., Sofia, 1984 (in Bulgarian).
- [3.] PRIGOGINE I., STENGERS I., **La nouvelle alliance. Metamorphose de la science**, Paris, Ed. Gallimard, 1979.
- [4.] MAJUMDAR A., BHUSHAN B., **Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces**. Journal of Tribology, April 1990,, Vol. 112/205.
- [5.] ASSENOVA E., DANEV K., **Adaptive self-regulation in the interaction between lubricant and solid surface**. VII Int. Tribological Conf., Esslingen, 1990.
- [6.] GAGNEPAIN J. J., ROQUES-CARMES C., **Fractal approach to two- and three-dimensional surface roughness**. Wear, 109 (1986) 119-126.
- [7.] LING F. F., **Fractals, engineering surfaces, and tribology**, "EUROTRIB '89", vol. 2, Helsinki.
- [8.] MAJUMDAR A., TIEN G. L., **Fractal Characterization and Simulation of Rough Surfaces**. Wear, 136 (1990) 313-327
- [9.] WITTEN T. A., SANDER L. M., **Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon**. Phys Rev Lett, 47 (1981) 1400.
- [10.] SANDER L., **Fractal growth**. "V mire nauki", March 1987, p.62

Fraktalno-informacioni pristup u tribologiji: interakcije između maziva i kontaktnih površina

Kontaktna površina je bazni strukturni element koji igra dominantnu ulogu u kontaktnim procesima tribosistema. Jedno od njenih najbitnijih svojstava je hrapavost. U analizi površinske hrapavosti poseban značaj se pridaje pristupu fraktalnog modeliranja, pri čemu su fraktalne strukture okarakterisane sledećim svojstvima:

- 1. One su invariantne u odnosu na dužinsku razmeru. Svaki deo frakta se sastoji od identičnih elemenata manjih dimenzija. Dimenzijska invariantnost se pojavljuje kao simetrija osobina za fraktalni objekt.*
- 2. Ponašanje frakta determinisano je dimenzijom frakta D , koja nije celobrojna veličina. Da bi dobili fraktalnu dimenziju objekta, potreban je srednji broj N jediničnih delića koji su zatvoreni u sferi radijusa r , čiji centar leži u objektu.*

Fraktalna dimenzija fizičkog objekta je univerzalno svojstvo koje ne zavisi od mnoštva konkretnih elemenata. Ona karakteriše ponašanje strukture u generalnom smislu koje je vidljivo kao osrednjeno ponašanje realnih elemenata. Osim toga, mnogi kontaktni fenomeni (kao što su poroznost, produkti habanja, distribucija realne površine kontakta i sl.) mogu se lako obuhvatiti fraktalnim modelom kontakta.

Bazirajući se na fraktalnom pristupu u radu se iznose osnove razvojno-algoritamskog sistema za modeliranje triboloških svojstava. Prateći informaciono-fraktalni metod kao deo razvojno-algoritamskog pristupa, posebno se analizira kontaktna hidraulična provodljivost kao bitna tribološka karakteristika tribosistema.

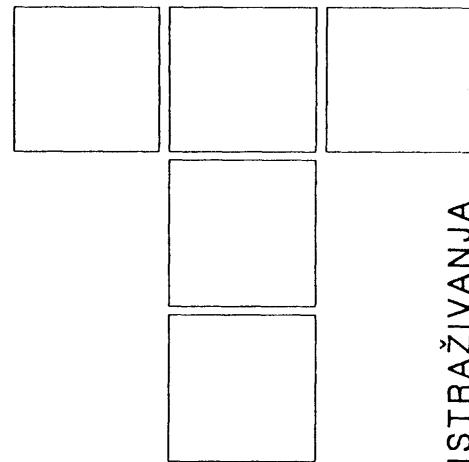
Фрактально-информационный подход трибологическим явлениям: взаимодействие смазки и контактирующих поверхностей

Основным структурным элементом, играющим решающую роль в процессе контактирования трибологических систем, является поверхность контакта, важнейшее свойство которой представляет ее шероховатость. При анализе поверхностной шероховатости особое внимание в настоящее время уделяется фрактальному моделированию, при чем фрактальные структуры характеризуются следующими свойствами:

- 1. Они являются постоянными по отношению к длине. Каждая часть "фрактала" (зоны, фрагмента) состоит из идентичных элементов меньших размеров. Размерная устойчивость является характеристикой фрактального объекта*
- 2. Поведение "фрактала" определяется размером D "фрактала", который не выражается целым числом. Для получения фрактального размера объекта необходимо среднее число N единичных частей, находящихся в сфере радиуса r , центр которого лежит в объекте.*
- 3. Фрактальный размер физического объекта является универсальным свойством независящим от множества конкретных элементов. Он определяет поведение структуры в общем смысле, которое проявляется в виде усредненного поведения реальных элементов. Кроме того многие контактные явления как пористость, продукты изнашивания, распределение реальной поверхности контакта и тп., легко можно выразить фрактальной моделью контакта.*

На основании фрактального подхода в работе изложены основы алгоритм - системы моделирования трибологических свойств. Излагая информационно-фрактальный метод как част развивающегося алгоритм - подхода автор особенно анализирует контактную гидравлическую проводимость, которая является существенной характеристикой трибологической системы.

Pouzdanost planiranja reznog alata u proizvodnim procesima (deo I)



1. POSTAVKA PROBLEMA

Normativi potrebnih količina reznog alata uglavnom se planiraju na osnovu podataka o vremenu U_{RADU} do otkaza alata. Eksploracionim posmatranjima reznog alata uočavaju se dva karakteristična slučaja u pogledu dobijenih rezultata o otkazima:

- ▶ podaci o vremenu U_{RADU} do otkaza su homogeni (malo rasipanje) ili
- ▶ podaci o vremenu U_{RADU} do otkaza su heterogeni (veliko rasipanje).

Kod realnih proizvodnih procesa do otkaza reznog alata ne dolazi samo usled njihovog habanja, već i kao posledica uticaja slučajnog karaktera (iznenadni lom i druga oštećenja), tj. manje kontrolisanih uslova koji prate proizvodne procese (uslovi koji se odnose na obradak, alat, pribor, tehnološki sistem). Na osnovu izloženog može se zaključiti da je proizvodni proces ove vrste tipičan stohastički proces, što zahteva i stohastički pristup planiranju reznog alata.

Pri stohastičkom modeliranju trajnosti i planiranju reznog alata (pri operaciji struganja), u slučaju homogenih podataka o otkazima, do sada je u većini slučajeva korišćena dvoparametarska Weibullova raspodela [1] ili normalna raspodela [2]. Međutim, kada treba planirati minimalni ili maksimalni normativ reznog alata u proizvodnim procesima sa velikim rasipanjem vremena U_{RADU} do otkaza, celishodno je primeniti statistiku ekstremnih vrednosti [3-9], kao što je to učinjeno u radu [10] (za slučaj alata sa jednim sečivom) i u radu [11] (za slučaj višestranih reznih izmenljivih pločica).

Ako je T vreme U_{RADU} do otkaza reznog alata, a t_g glavno vreme obrade radnog predmeta za određenu operaciju, tada se količina radnih predmeta koja se može obraditi jednim sečivom alata utvrđuje kao [10]:

Dr. Ljubiša Papić, docent
Laboratorija za efektivnost sistema - LESI
Tehnički fakultet u Čačku

$$n_{rls} = \frac{T}{t_g} \quad (1)$$

Ako postoji mogućnost oštrenja novog alata i_o puta, tada je količina radnih predmeta koja se može obraditi jednim alatom:

$$n_{rla} = (1+i_o) \cdot n_{rls} = \frac{(1+i_o) \cdot T}{t_g} \quad (2)$$

Potrebna količina reznog alata za obradu n_r radnih predmeta je:

$$N_a = \frac{n_r}{n_{rla}} = \frac{n_r \cdot t_g}{(1+i_o) \cdot T} \quad (3)$$

Ukoliko je rezni alat sa izmenljivim pločicama od TM ili rezne keramike, tada je količina radnih predmeta koja se može obraditi jednom z-stranom pločicom:

$$n_{rlp} = z \cdot n_{rls} = \frac{z \cdot T}{t_g} \quad (4)$$

Potrebna količina pločica za obradu n_r radnih predmeta je:

$$N_p = \frac{n_r}{n_{rlp}} = \frac{n_r \cdot t_g}{z \cdot T} \quad (5)$$

Prognoza potrebne količine reznog alata, na osnovu izraza (3) i (5) sprovodi se na osnovu srednjeg vremena U_{RADU} do otkaza $T = \bar{T}_r$. U slučaju dvoparametarske (β i h) Weibullove raspodele, srednje vreme U_{RADU} reznog alata utvrđuje se posredstvom gama-funkcije:

$$\bar{T}_r = \eta \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (6)$$

Ekstremne vrednosti potrebnih količina alata (N_a) ili pločica (N_p) su:

$$N_{a \max} = \frac{n_r \cdot t_g}{(1+i_o) \cdot \bar{T}_{min}} \quad (7)$$

$$N_{p \max} = \frac{n_r \cdot t_g}{z \cdot \bar{T}_{min}} \quad (8)$$

Redni broj uzorka $i=1, 2, \dots, N$	1	2	\dots	i	\dots	N
Elementi uzorka X_{ki} $(i=1, 2, \dots, N)$	X_{k1} $(k=1, 2, \dots, N)$	X_{k2} $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	X_{ki} $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	X_{kN} $(k=1, 2, \dots, N)$
Minimum uzorka Z_{ni} $(i=1, 2, \dots, N)$	$Z_{n1} = \min X_{k1}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	$Z_{n2} = \min X_{k2}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	$Z_{ni} = \min X_{ki}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	$Z_{nN} = \min X_{kN}$ $(k=1, 2, \dots, N)$
Maksimum uzorka W_{ni} $(i=1, 2, \dots, N)$	$W_{n1} = \max X_{k1}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	$W_{n2} = \max X_{k2}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	$W_{ni} = \max X_{ki}$ $(k=1, 2, \dots, N)$	\dots	$W_{nN} = \max X_{kN}$ $(k=1, 2, \dots, N)$

Sl. 1. Uz razmatranje definicije ekstremnih vrednosti

For considerations of definition of extreme values

К рассмотрению вопроса определения экстремальных значений

odnosno:

$$N_{a \min} = \frac{n_r \cdot t_g}{(1+i_o) \cdot T_{\max}} \quad (9)$$

$$N_{p \min} = \frac{n_r \cdot t_g}{z \cdot T_{\max}} \quad (10)$$

Jedan od mogućih pristupa pri definisanju ekstremnih vrednosti T_{\min} i T_{\max} prikazan je na slici 1, [12-14]. Neka niz x_1, x_2, \dots, x_n predstavlja redosled pojave nezavisnih vrednosti slučajne promenljive x_k ($k=1, 2, \dots, n$) u N uzoraka jednog istog osnovnog skupa. Tada slučajne veličine $Z_n = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$ i $W_n = \max(x_1, x_2, \dots, x_n)$ predstavljaju ekstremume pojedinih uzoraka.

2. PLANOVNI SKRAĆENI ISPITIVANJA ZA OCENU POUZDANOSTI PROIZVODA

Poznata su dva tipa ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda: kontrolna i definiciona, sa suštinskom razlikom u pogledu postavke problema, očekivanih rezultata i metodologija rešavanja.

Osnovni cilj kontrolnih ispitivanja je utvrđivanje odgovora na pitanje zadovoljava li posmatrani proizvod tehničke norme u pogledu pouzdanosti.

Definiciona ispitivanja sprovode se radi utvrđivanja stvarnih parametara pouzdanosti proizvoda, kao i za: otkrivanje nepouzdanih celina, otkrivanje konstrukcijskih propusta, razvoj preporuka za povišenje pouzdanosti, preciziranje režima rada i politike održavanja, utvrđivanje uzroka pojave otkaza, određivanje normi potrošnje rezervnih delova [15-23]. U domaćoj naučnoj literaturi, iz oblasti definicionih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda publikovani su radovi [24-25].

U praksi, u većini slučajeva, nema uslova za organizaciju ispitivanja u cilju dobijanja podataka o pouzdanosti proizvoda, potrebnog oblika i obima. U takvim situacijama pribegava se korišćenju podataka koji su jedino dostupni. Na taj način, problem se obično svodi na ocenu parametara pouzdanosti na osnovu raspoloživog statističkog materijala. Ovakav pristup se može smatrati nekorrektnim jer na karakter statističkog materijala suštinski uticaj ima strategija ispitivanja (ili režim eksplotacije). U tom smislu navode se sledeći uticajni faktori, čije uzi-

manje u obzir omogućuje formiranje naučno zasnovanih planova skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda:

- količina proizvoda koja se podvrgava ispitivanjima,
 - redosled funkcionalne kontrole u procesu ispitivanja proizvoda,
 - redosled obnavljanja (zamene) proizvoda,
 - redosled stupanja proizvoda na ispitivanja.
- U stvarnosti, nabrojani faktori mogu bitno varirati u zavisnosti od konkretnih uslova, kao npr.:
- ispitivanje jednog ili više proizvoda,
 - kontinualna kontrola, periodična kontrola ili kontrola samo pred početak ili po završetku ispitivanja,
 - ispitivanja sa ili bez obnavljanja (zamene) otkazalih proizvoda,
 - istovremena ispitivanja ili ispitivanja u različitim trenucima - svih proizvoda,
 - ispitivanja do otkaza svih proizvoda ili do unapred fiksiranog broja otkaza ili do isteka unapred fiksiranog vremena *URADU*.

Tab. 1 Faktori koji karakterišu planove ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda

Faktor koji karakteriše plan ispitivanja	Simbolička oznaka
Količina ispitivanih proizvoda	Jedan Više od jednog
Mogućnost obnavljanja (zamene) proizvoda pri ispitivanju	Ne obnavljaju se i ne zamjenjuju se Ne obnavljaju se ali se zamjenjuju Obnavljaju se
Kriterijum prekida ispitivanja proizvoda	Vreme u radu Broj otkaza Vreme u radu ili broj otkaza
Redosled stupanja proizvoda na ispitivanja	Istovremeno Nije istovremeno
Režim kontrole funkcionisanja proizvoda pri ispitivanju	Neprekidno Periodično Samo pred početak i po završetku ispitivanja

Pregled nabrojanih faktora koji karakterišu plan ispitivanja, sa simboličkim oznakama, prikazan je u tabeli 1.

Različitim kombinacijama ovih faktora može se formirati više varijanti planova skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda, koji imaju sledeće slovne oznake [15-17]:

- $[NUN]$, $[NUT]$, $[NUr]$, $[NU(r, T)]$;
- $[NRT]$, $[NRr]$, $[NR(r, T)]$;
- $[NMT]$, $[NM_r]$, $[NM(r, T)]$, $[NM_r]$, $[NMT]$, $[NM(r, T)]$.

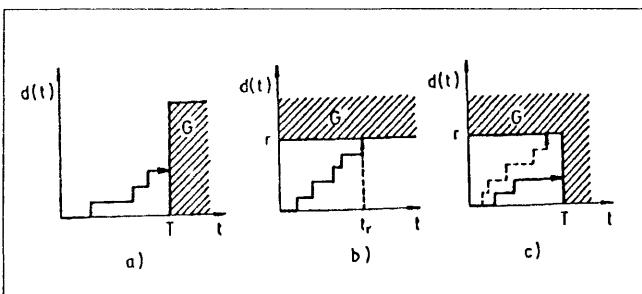
Klasifikacija planova ($[NU\dots]$, $[NR\dots]$, $[NM\dots]$) ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda prema faktoru - kriterijumu prekida ispitivanja (T , r , r ili T) prikazana je u tabeli 2. Opis svih 13 varijanti planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda dat je u tabeli 3.

Tab. 2 Klasifikacija planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti prema kriterijumu prekida ispitivanja i obnovljivosti proizvoda

Kriterijum prekida ispitivanja	Plan ispitivanja na pouzdanost		
	Proizvodi se ne zamenjuju: U	Proizvodi se zamenjuju: R	Proizvodi se obnavljaju: M
T	[NUT]	[NRT]	[NMT]
r	[NUr]	[NRr]	[NM_r]
r ili T	[NU(r,T)]	[NR(r,T)]	[NM(r,T)]

Realizacija (neposredno sprovođenje) plana ispitivanja odvija se prema sledećem modelu [20]. Sa $d(t)$ se označava broj otkaza nastalih do trenutka t . Funkcija $d(t)$ ne može opadati, a u toku ispitivanja sukcesivno uzima vrednosti $0, 1, 2, \dots$. Tačke rasta funkcije $d(t)$ odgovaraju slučajnim vremenskim trenucima t_i . Realna funkcija $d(t)$ dobijena ispitivanjima naziva se realizacijom ili trajektorijom procesa [20], tj. raspodelom broja otkaza [26]. Kada raspodela broja otkaza $d(t)$ dospe u oblast G ravni (sl. 2) ispitivanja se prekidaju.

Kod planova $[NUT]$ i $[NRT]$ oblast G predstavlja poluvravan $t > T$. Prema ovim planovima, ispitivanja se prekidaju u vremenskom trenutku T dospevanja trajektorije $d(t)$ u oblast $G = \{ d(t) : t \geq T \}$ (slika 2.a). U slučaju planova $[NUr]$ i $[NRr]$ ispitivanja se prekidaju u vremenskom trenutku t_r dospevanja trajektorije $d(t)$ u oblast



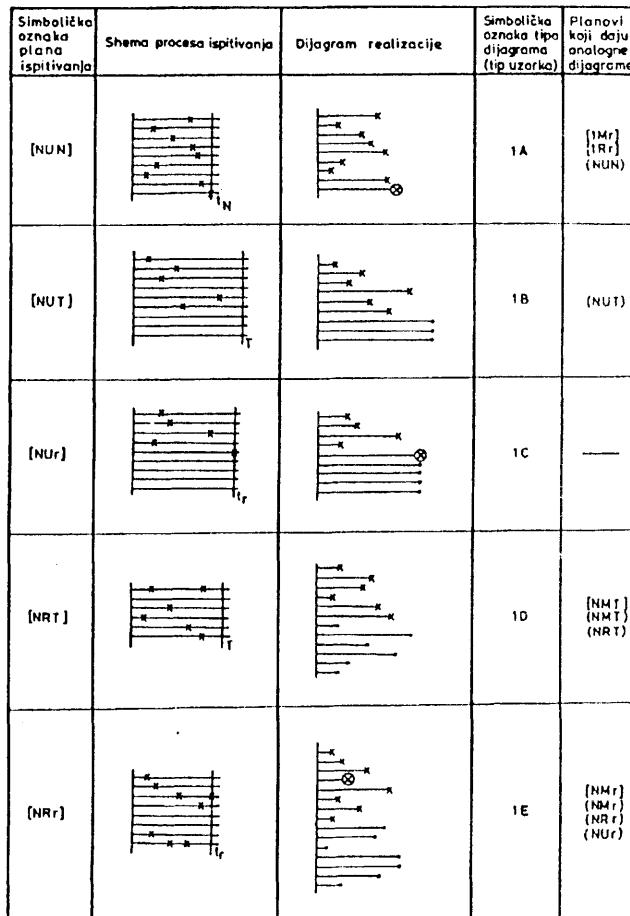
Sl. 2. Trajektorije procesa (raspodele broja otkaza) kod različitih planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti
Process trajectories (number of failures distribution) for different plans of reliability evaluations testings
Траектории процесса распределения числа отказов при различных видах исследования надежности

$G = \{ d(t) : d \geq r \}$ (slika 2.b). Na kraju, kod planova $[NU(r, T)]$ i $[NR(r, T)]$ ispitivanja se prekidaju u trenutku dospevanja trajektorije $d(t)$ u oblast $G = \{ d(t) : \text{ili } d \geq r \text{ ili } t \geq T \}$ (slika 2.c).

Dijagrami realizacija u slučaju ispitivanja sa neprekidnom kontrolom (tip uzorka 1A, 1B,...) za neke tipove planova prikazani su na slici 3, [19].

Kod plana $[NUN]$ rezultati ispitivanja sadrže samo potpune realizacije, pri čemu trenutak poslednjeg otkaza predstavlja trenutak prekida ispitivanja. Ako proizvodi ne dospevaju istovremeno na ispitivanja (nisu istovremeno u eksploataciji) to u konkretnom slučaju nema principijelnog uticaja na karakter dobijene informacije jer se kod ovog plana svaki proizvod dospeo na ispitivanja - ispituje (ili posmatra) do otkaza. Analogni, po karakteru, rezultati (r potpunih realizacija) dobijaju se pri planu $[1Rr]$ - ispitivanja jednog proizvoda sa obnavljanjem do fiksног broja otkaza r .

Kod plana $[NUT]$, ako je npr. N_1 proizvoda otkazalo, tada rezultati ispitivanja sadrže N_1 potpunih realizacija, čije vrednosti ne premašuju trajanje ispitivanja T i $N-N_1$ jednakih nepotpunih realizacija (uzorak tipa 1B).



Sl. 3. Dijagrami realizacije kod različitih planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti
Realization diagrams for different plans of reliability evaluations testings
Эпюры реализации при различных видах исследования надежности

Tab.3 Varijante planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda

Tip plana	Opis plana
[N U N]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se ne zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju kada otkaze svih N proizvoda.
[N U T]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se ne zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju po isteku vremena T.
[N U r]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se ne zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju kada količina otkazalih proizvoda dostigne broj r.
[N U (r,T)]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se ne zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju kada broj otkazalih proizvoda dostigne broj r ili kada istekne vreme T - u zavisnosti od toga šta nastupa ranije.
[N R T]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju po isteku vremena T.
[N R r]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju kada količina otkazalih proizvoda dostigne broj r.
[N R (r,T)]	Proizvodi otkazali za vreme ispitivanja se zamenjuju novim; ispitivanja se prekidaju kada broj otkazalih proizvoda dostigne broj r ili kada istekne vreme T u zavisnosti od toga šta nastupa ranije.
[N M T]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; proizvod se ispituje do vremena U RADU T.
[N M r]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; proizvod se ispituje do pojave r otkaza kod njega.
[N M (r,T)]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; proizvod se ispituje ili do pojave r otkaza, ili do vremena U RADU T - u zavisnosti od toga šta nastupa ranije.
[N M r _Σ]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; ispitivanja se prekidaju pri pojavi ukupnog broja r _Σ otkaza kod svih proizvoda.
[N M T _Σ]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; ispitivanja se prekidaju pri pojavi ukupnog vremena U RADU T _Σ kod svih proizvoda.
[N M (r _Σ ,T _Σ)]	Posle svakog otkaza proizvod se vraća u stanje U RADU; ispitivanja se prekidaju pri pojavi ukupnog broja r _Σ otkaza kod svih proizvoda ili pri dobijanju ukupnog vremena U RADU T _Σ kod svih proizvoda - u zavisnosti od toga šta nastupa ranije.

3. POKAZATELJI TAČNOSTI I VERODO-STOJNOSTI OCENE POUZDANOSTI PROIZVODA

Pokazatelji tačnosti i verodostojnosti ocene pouzdanosti proizvoda definišu se na sledeći način. Verodostojnost ocene pokazatelja pouzdanosti obično se iskazuje vrednošću poverljive verovatnoće γ za neki poverljivi interval ocenjivanog pokazatelja.

Ako ocenjivani pokazatelj pouzdanosti A proizvoda varira u granicama (A_{min}, A_{max}) tada donja granica intervala određuje vrednost A_d intervala (A_d, A_{max}), za koji verovatnoća pokrivanja stvarnog (ali nepoznatog) pokazatelja A nije manja od γ [18]:

$$P \{ A \in (A_d, A_{max}) \} \geq \gamma \quad (11)$$

Analogno, za gornju granicu A_g poverljivog intervala (A_{min}, A_g) i poverljivu verovatnoću γ važi odnos:

$$P \{ A \in (A_{min}, A_g) \} \geq \gamma \quad (12)$$

Kvantitativno, tačnost ocene pokazatelja pouzdanosti može se izraziti na nekoliko načina:

- odstupanjem C ocene \hat{A} pokazatelja A ,
 - relativnim odstupanjem δ_C ,
 - disperzijom ocene ($D(\hat{A})$)
 - apsolutnom poverljivom greškom ΔA i
 - relativnom poverljivom greškom δ_A
- u oceni pokazatelja pouzdanosti proizvoda.

Veličina odstupanja C ocene pokazatelja pouzdanosti je [20]:

$$C = M(\hat{A}) - A \quad (13)$$

gde je $M(\cdot)$ - simbol matematičkog očekivanja.

Relativno odstupanje δ_C se definiše kao:

$$\delta_C = \frac{M(\hat{A}) - A}{A} \quad (14)$$

Pri planiranju ispitivanja ovi pokazatelji nisu prikladni kao karakteristika tačnosti, jer oni nisu povezani sa poverljivom verovatnoćom γ . Iz tog razloga, disperziju ocene tačnosti takođe nije celishodno koristiti kao meru tačnosti ocene pri planiranju ispitivanja za ocenu pouzdanosti.

Kako je širina poverljivog intervala neposredno povezana sa poverljivom verovatnoćom γ , to se tačnost ocene u ovom slučaju može izraziti veličinom poverljive greške, apsolutne ili relativne.

U radovima iz oblasti planiranja ispitivanja za ocenu pouzdanosti predlažu se različite formule za utvrđivanje poverljive greške. U [27] se predlaže da se granična relativna greška posmatra kao:

$$\delta_A = \max \left\{ \frac{\Delta A_d}{\hat{A}}, \frac{\Delta A_g}{\hat{A}} \right\} \quad (15)$$

gde su:

$$\Delta A_d = \hat{A} - A_d \quad i \Delta A_g = A_g - \hat{A}$$

U radu [18] se preporučuje da se apsolutna i relativna greška, pri oceni srednjih i gama-procentnih pokazatelja, utvrđuju prema izrazima:

za gornju granicu:

$$\Delta A_g = A_g - \hat{A} \quad (16)$$

$$\delta_{A_g} = \frac{\Delta A_g}{\hat{A}} = \frac{A_g - \hat{A}}{\hat{A}} \quad (17)$$

za donju granicu:

$$\Delta A_d = \hat{A} - A_d \quad (18)$$

$$\delta_{A_d} = \frac{\Delta A_d}{\hat{A}} = \frac{\hat{A} - A_d}{\hat{A}} \quad (19)$$

pri čemu je za simetrični poverljivi interval:

$$\delta_A = \delta_{A_g} = \delta_{A_d} \quad (20)$$

Izbor pokazatelja tačnosti δ_A ili δ_{A_g} (δ_{A_d}) zavisi od odluka koje treba donositi na bazi rezultata ispitivanja. U slučaju odgovornih odluka, celishodno je korišćenje granične relativne greške. Pri istovremenim definicionim i kontrolnim ispitivanjima primenjuje se relativna greška prema donjoj granici δ_{A_d} , pri oceni tzv. pozitivnih pokazatelja pouzdanosti [18], tipa srednje vreme *URADU* do otkaza, gama-procentno vreme *URADU* do otkaza proizvoda. Relativna greška prema gornjoj granici δ_{A_g} primenjuje se pri oceni tzv. negativnih pokazatelja pouzdanosti [18], tipa intenzitet otkaza proizvoda i slično.

Pri utvrđivanju veličine verovatnoće bezotkaznog rada ili verovatnoće obnavljanja proizvoda, predlaže se [18] korišćenje logaritamske poverljive greške δ_R čija donja granica se nalazi kao:

$$\delta_{R_d} = \left| \frac{\ln R_d - \ln \hat{R}}{\ln \hat{R}} \right| \quad (21)$$

4. IZBOR OPTIMALNOG PLANA SKRAĆENIH ISPITIVANJA ZA OCENU POUZDANOSTI PROIZVODA

Cilj ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda je povezan sa prisustvom neke funkcije cilja W . Ako π predstavlja skup tipova planova ispitivanja za ocenu pouzdanosti: $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$, tada se izbor tipa plana ispitivanja $\pi_i \in \pi$ svodi na rešavanje problema:

$$W(\pi) \rightarrow \text{extr}, \quad (22)$$

pri skupu ograničenja $\Omega(\pi)$ [17].

Smatra se da je plan π_i efikasniji u primeni od plana π_j pri zahtevanim ograničenjima $\Omega(\pi)$ i funkciji cilja $W(\pi)$, ako je:

$$W(\pi_i) > W(\pi_j), \text{ pri } W(\pi) \rightarrow \max \quad (23)$$

ili

$$W(\pi_i) < W(\pi_j), \text{ pri } W(\pi) \rightarrow \min$$

Ako je pri zahtevanim ograničenjima:

$$W(\pi_i) \approx W(\pi_j), \quad (24)$$

tada su planovi π_i i π_j ekvivalentni.

Uvođenjem pokazatelja tačnosti i verodostojnosti, problem (22) se može izraziti:

$$\begin{aligned} W(\pi) &\rightarrow \text{extr}, \\ \delta &\leq \delta_o, \\ \gamma &\geq \gamma_o, \end{aligned} \quad (25)$$

gde su: δ_o, γ_o - zahtevane vrednosti karakteristika tačnosti i verodostojnosti pri oceni pokazatelja pouzdanosti proizvoda.

Kako je skup planova ispitivanja π ograničen, problem (25) se rešava poređenjem vrednosti $W(\pi_i)$ za $\pi_i \in \pi$, $\delta \leq \delta_o$ i $\gamma \geq \gamma_o$. Radi bržeg poređenja, celishodno je broj planova ispitivanja redukovati. Smanjenje skupa π na $\pi^* \in \pi$ postiže se uzimanjem u obzir svojstva pouzdanosti koje se ocenjuje (bezotkaznost, trajnost, pogodnost održavanja proizvoda). Pored toga, izbor plana ispitivanja zavisi od mogućnosti popravljivosti proizvoda. U tabeli 4 daju se preporučeni planovi ispitivanja za ocenu pouzdanosti u zavisnosti od nabrojanih faktora. Korišćenje ovih preporuka omogućuje smanjenje količine mogućih varijanti planova do 5-7 [15, 17, 22].

Izbor plana ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda vrši se putem rešavanja problema (25) za neki skup planova π^* . Kao funkcija cilja $W(\pi)$ može se smatrati srednje trajanje ispitivanja T , koje se minimizira:

$$T(\pi) \rightarrow \min, \quad (26)$$

prema skupu ograničenja $\Omega(\pi)$: $\delta \leq \delta_o, \gamma \geq \gamma_o, \pi_i \in \pi^*$

U radu [27] istraživano je trajanje ispitivanja prema planovima za ocenu srednjeg vremena *URADU* do otkaza.

Komparativna analiza funkcija $W(\pi_i) = T_i$ sprovedena je za skup planova: *[NUN]*, *[NUr]* i *[NUT]*, pri eksponencijalnoj raspodeli vremena *URADU* do otkaza: Na osnovu analize efikasnosti planova u [17] je utvrđeno da pri visokim vrednostima γ_o i malim vrednostima δ_o važi:

$T[NUr] \approx T[NUT]$, tj. planovi su ekvivalentni. Takođe je pokazano da je pri fiksnim vrednostima δ_o i γ_o veličina uzorka N pri planu *[NUN]* jednaka broju otkaza r pri planu *[NUr]*. Tada važi: $T[NUN] > T[NUr]$, tj. plan *[NUr]* je efikasniji u primeni.

U svojstvu funkcije cilja $W(\pi)$ može se posmatrati tačnost ocene pokazatelja pouzdanosti na osnovu rezultata ispitivanja. U ovom slučaju, problem (22) se formuliše minimiziranjem relativne greške ocene pokazatelja pouzdanosti za plan ispitivanja π :

Tab.4 Preporučeni planovi ispitivanja za ocenu pouzdanosti u zavisnosti od popravljivosti (obnovljivosti) proizvoda

Preporučeni planovi ispitivanja na pouzdanost		
Pokazatelji pouzdanosti	Plan ispitivanja	Nopomena
Nepopravljivi proizvodi		
Srednje vreme U RADU do otkaza	[NUN], [NUR], [NUT], [NRr], [NRT], [NU(r ₁ n ₁)(r ₂ n ₂) ... (r _{k-1} n _{k-1})r _k], [NU(T ₁ n ₁) (T ₂ n ₂) ... (T _{k-1} n _{k-1}) T _k] [NUz]	
Gama - procentno vreme u radu do otkaza	[NUR], [NUT] [NRr], [NRT]	--
Verovatnoća bezotkaznog rada	[NU(r ₁ n ₁) (r ₂ n ₂) ... (r _{k-1} n _{k-1})r _k], [NU(T ₁ n ₁) (T ₂ n ₂) ... (T _{k-1} n _{k-1}) T _k] [NUz]	
Popravljivi proizvodi		
Srednje vreme U RADU između otkaza	[N M r], [N M T]	Pri ispitivanjima treba uzeti u obzir vreme U RADU do prvog otkaza
Srednje vreme U RADU između otkaza	[NMr], (NMT)	--
Srednji vek upotrebe	[NUN], [NUR], [NUT], [NU(r ₁ n ₁) (r ₂ n ₂) ... (r _{k-1} n _{k-1})r _k], [NU(T ₁ n ₁) (T ₂ n ₂) ... (T _{k-1} n _{k-1}) T _k] [NUz]	Planovi tretiraju granična stanja
Gama - procentni vek upotrebe	[NUR], [NUT], [NU(r ₁ n ₁) (r ₂ n ₂) ... (r _{k-1} n _{k-1})r _k], [NU(T ₁ n ₁) (T ₂ n ₂) ... (T _{k-1} n _{k-1}) T _k], [NUz]	
Srednje vreme obnavljanja	[NMr], [NMT]	Planovi tretiraju otkazale proizvode sa mogućom transformacijom u plan [rUr]
Koeficijent gotovosti	[NMr], [NMT]	--
Srednje vreme održavanja (gama - procentno vreme održavanja)	[NUT]	Planovi tretiraju nepopravljive i popravljive proizvode

$$\delta(\pi) \rightarrow \min, \quad (27)$$

prema skupu ograničenja: $N \leq N_o$, $r \leq r_o$, $\gamma \geq \gamma_0$

U radu [17] istražen je problem efikasnosti za planove [NUR] i [NUT] pri Weibullovoj raspodeli vremena U RADU do otkaza. Na osnovu rezultata analiza u [17] navode se zaključci:

- ukoliko je veća vrednost stvarnog pokazatelja pouzdanosti tehnološkog sistema, utoliko je veća efikasnost plana [NUT] u odnosu na plan [NUR],
- sa povećanjem vrednosti parametra oblika β proširuje se oblast u kojoj je plan [NUN] efikasniji u primeni.

Kao funkcija cilja $W(\pi)$ mogu se posmatrati troškovi ispitivanja (vrednost ispitivanog proizvoda i troškovi angažovanja opreme na ispitivanju). U ovom slučaju, kriterijum izbora plana se formuliše minimiziranjem troškova za plan ispitivanja π :

$$C(\pi) \rightarrow \min \quad (28)$$

prema skupu ograničenja: $N \leq N_o$, $r \leq r_o$.

U radu [21] je pokazano da troškovi ispitivanja za planove bez obnavljanja i bez zamene, tipa /NU.../ ne premašuju troškove ispitivanja za planove bez obnavljanja ali sa zamenom, tipa /NR.../. Dakle, uzimajući troškove kao kriterijum efikasnosti, planovi tipa /NU.../ su efikasniji u primeni.

Sinteza sva tri analizirana kriterijuma:

- trajanje ispitivanja,
- tačnost ocene pokazatelja pouzdanosti na osnovu rezultata ispitivanja,
- troškovi ispitivanja

pri izboru plana ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda pokazuje da se, u opštem slučaju, prema jednom dobija a prema drugom - gubi. Ovo se lako objašnjava na sledeći način: skraćenje trajanja ispitivanja je obično uslovljeno postavljanjem dopunske količine proizvoda na ispitivanja, što dovodi do poskupljenja ispitivanja. S druge strane, skraćenje trajanja ispitivanja putem umanjenja broja ispitivanih proizvoda pogoršava tačnost ocene pokazatelja pouzdanosti.

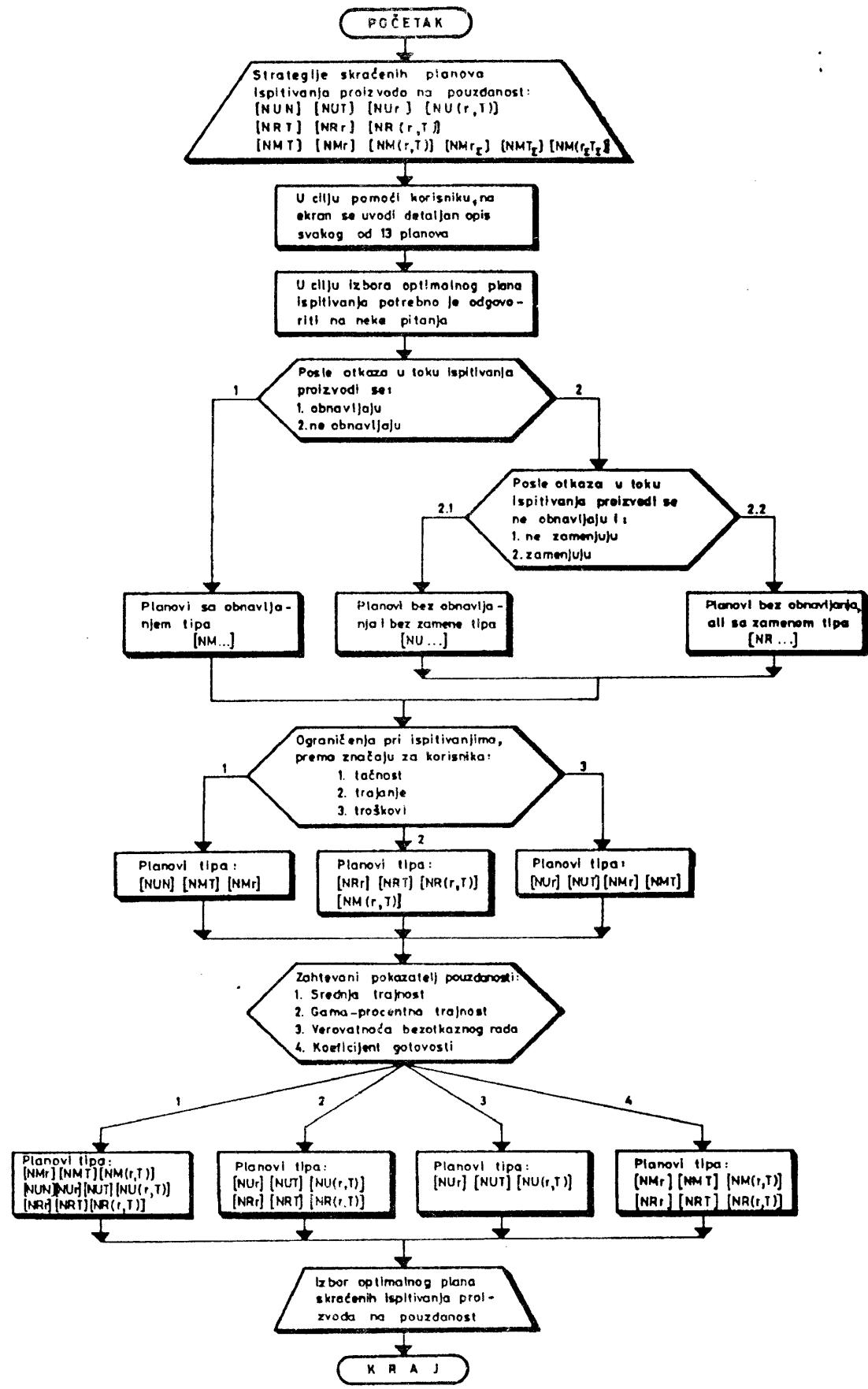
U situaciji kada je plan π_1 prema jednom kriterijumu efikasniji od plana π_2 , dok je prema drugom kriterijumu plan π_2 efikasniji, celishodno je formiranje novih opštih kriterijuma. Npr., za funkcije cilja $W(\pi)$ ($i=1, 2, \dots, m$) novi kriterijumi su:

$$Wi(\pi) \rightarrow \max \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

ili (29)

$$Wi(\pi) \rightarrow \min \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

Usvajajući izloženu koncepciju izbora plana ispitivanja, koja se zasniva na rezultatima opsežnih istraživanja publikovanih u radu [17], formiran je idejni algoritam [11]



Sl. 4. Idejni algoritam izbora optimalnog plana skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda
An idea algorithm for choice of optimal plan of shortened tests for evaluation of the product reliability
Идейный алгоритм выбора оптимального плана сокращенных исследований надежности изделия

Kriterijum izbora optimalnog plana skraćenog ispitivanja

M:Planovi sa obnavljanjem
U:Planovi sa obnavljanjem i bez zamene
R:Planovi bez obnavljanja ali sa zamenom

Obnovljivost proizvoda

Znacaj za korisnika

Zahtevani pokazatelj pouzdanosti

Obnovljivost proizvoda

Znacaj za korisnika

Zahtevani pokazatelj pouzdanosti

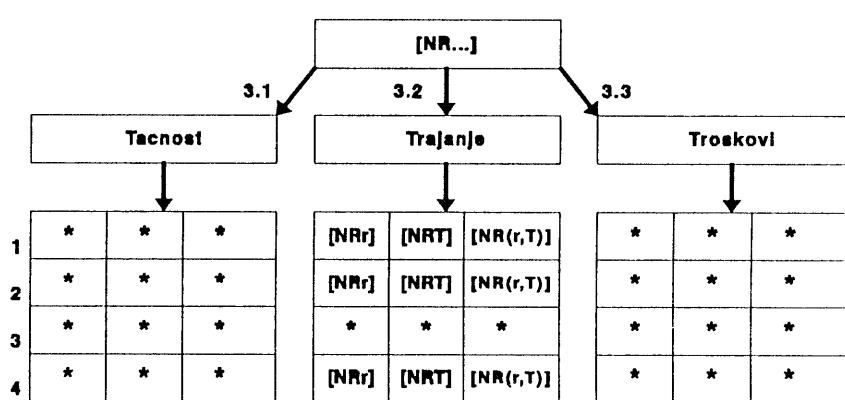
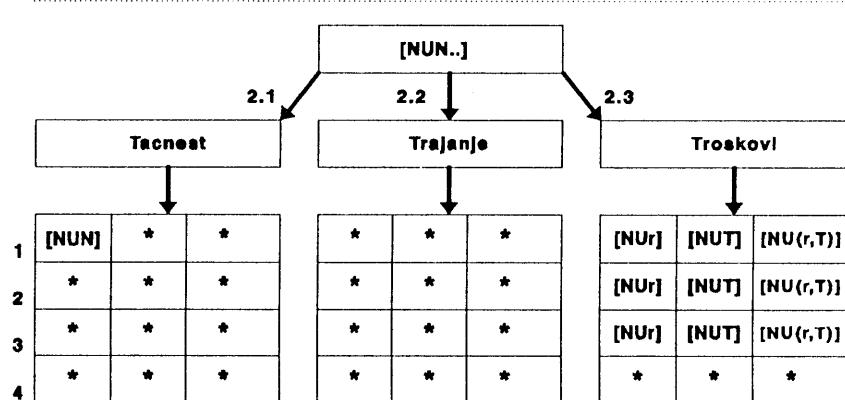
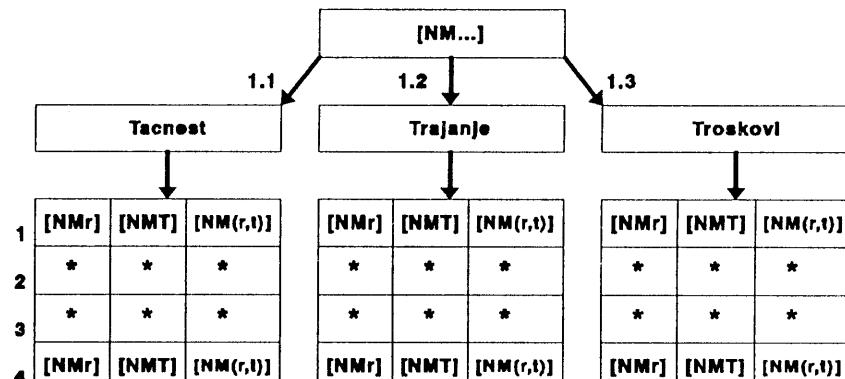
Obnovljivost proizvoda

Znacaj za korisnika

Zahtevani pokazatelj pouzdanosti

Planevi skracenog ispitivanja preizvoda na pouzdanost

1 [NM...]
2 [NU...]
3 [NR...]



1. Srednja trajnost
2. Gama - procentna trajnost
3. Verovatnoća bezotkravnog rada
4. Koeficijent gotovosti

Sl.5. Graf mogućih varijanti optimalnih planova skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda
Graphic of possible versions of optimal plan of shortened tests for evaluation of the product reliability
Граф возможных вариантов оптимальных планов сокращенных исследований надежности изделия

prikazan na slici 4. Prema ovom algoritmu, prva faza izbora optimalnog plana skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda vrši se na osnovu toga da li se proizvodi posle otkaza u toku ispitivanja:

- obnavljaju (planovi tipa [NM...], M - Maintenance) ili
- ne obnavljaju i ne zamenjuju (planovi tipa [NU...], U-Unrepair) ili
- ne obnavljaju ali zamenjuju (planovi tipa [NR...], R - Repair).

Potom se uzimaju u obzir kriterijumi od značaja za korisnika rezultata ispitivanja:

- tačnost ocene pokazatelja pouzdanosti ili
- trajanje ispitivanja ili
- troškovi ispitivanja.

Konačan izbor optimalnog plana skraćenih ispitivanja vrši se prema zahtevanom pokazatelju pouzdanosti proizvoda:

- srednja trajnost ili
- gama-procentna trajnost ili
- verovatnoća bezotkaznog rada ili
- koeficijent gotovosti.

Radni algoritam u vidu grafa mogućih varijanti optimalnih planova skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda prikazan je na slici 5. Na bazi grafa mogućih varijanti planova, razvijen je programski paket za izbor optimalnog plana ispitivanja za ocenu pouzdanosti proizvoda, pod nazivom "PLANNOVI SKRAĆENIH ISPITIVANJA PROIZVODA NA POUZDANOST", na programskom jeziku COBOL MPB [28].

*Usled dužine ovog rada, u ovom broju je predstavljen samo jedan deo rada.
U sledećem broju prikazaće se nastavak rada zajedno sa literaturom.*

Reliability Planing of Cutting Tools in Production Processes (Part I)

In order to increase planing reliability and economy of cutting tools in production processes the procedure of choosing optimal plans to shorten testings of products on reliability is developed. The procedure is realized in three levels: according to renewing/replacing; estimation precision, continuation and testing expenses; and necessary reliability parameter. A new methodology of planing of maximum cutting tools normative for required production is proposed and experimentally confirmed. The methodology is realized in three steps: 1. the plan of shortened testing on reliability; 2. prognosis of minimum durability; 3. determination of maximum normative. The new methodology is economical, scientific and its testing is shortened [NRr] plan and it has statistic elements of extreme (minimum) values.

Надежность планирования режущего инструмента в производственных процессах (Част I)

С целью повышения надежности и экономности планирования режущего инструмента в производственных процессах, разработана процедура выбора оптимальных планов сокращенных испытаний для оценки надежности изделий. Процедура охватывает три уровня: восстановление/смену; точность оценки, продолжение и затраты испытаний; искоемый показатель надежности. Предложена и экспериментально подтверждена новая методология планирования максимального норматива режущего инструмента для выполнения требуемого количества производства. Методология реализуется в трех шагах: 1. план сокращенных испытаний для оценки надежности; 2. прогноз минимальной долговечности; 3. планирование максимального норматива. Новая методология характеризуется экономичностью и научной обоснованностью на плане сокращенных испытаний [NRr] и элементами теории эстремальных (минимальных) значений.

M. BABIĆ, B. JEREMIĆ, N. MILIĆ

Mogućnost primene PVD prevlaka na konstrukcijskim čelicima*

ISTRAŽIVANJA

1. UVOD

Visok nivo temperatura deponovanja prevlaka CVD pa i PVD postupcima predstavlja osnovni uzrok da je ceo spektar čelika koji se primenjuju za izradu najraznovrsnijih elemenata tribomehaničkih sistema bio uglavnom izvan primene ovih postupaka modifikovanja kontaktnih površina.

U poslednje vreme prisutne su dve osnovne tendencije u razvoju i primeni tvrdih triboloških prevlaka: unapredjenje PVD postupaka u cilju smanjenja temperatura deponovanja i razvoj specifičnjih višekomponentnih prevlaka.

Niz rezultata istraživanja saopštenih i publikovanih u poslednje vreme [1, 2, 3, 4, 5, 6] pokazuju na mogućnost veoma uspešnog odvijanja procesa deponovanja prevlaka na temperaturama nivoa 250°C pa i 200°C . Tako se u radu [6] prezentira novorazvijeni "Magnetron sputter ion-plating" sistem kojim se ostvaruju visok stepen i niska temperatura depozicije. Jako bombardovanje uzorka ostvareno pomoću niskog bias napona daje prevlake sa dobrom adhezijom i strukturonom. Radi smanjenja grejanja uzorka tokom depozicije potrebno je samo redukovati snagu magnetrona, koji simultano redukuje jonsko bombardovanje i zračenje toplove. U takvim uslovima uspešno se deponuje TiN prevlaka na temperaturama nižim od 250°C .

Imajući u vidu značaj širenja primene tvrdih prevlaka i na oblast čelika koji imaju nižu temperaturu otpuštanja od brzoreznih čelika i uvodenja višekomponentnih prevlaka u ovom radu se prezentiraju neki rezultati ispitivanja tribološkog ponašanja TiN, TiAlN, TiCN i ZrN prevlaka na poboljšanom i cementiranim konstrukcijskim čelicima.

*Doc. dr Miroslav Babić, dipl. ing.
Mašinski fakultet, Kragujevac
Prof. dr Branislav Jeremić, dipl. ing.
Mašinski fakultet, Kragujevac
Nenad Milić, dipl. ing.
Mašinski fakultet, Kragujevac*

Dobijeni rezultati ukazuju da se PVD postupci deponovanja mogu realizovati i uz neveliki pad tvrdoće osnovnog materijala i da se prevlakama postiže značajno povećanje otpornosti na habanje u odnosu na neprevučene čelike. Osim toga, razlika u tribološkom kvalitetu prevlaka može čak kompenzirati nedostatke poboljšanih prevučenih konstruktivnih čelika u odnosu na prevučene kvalitetnije cementirane čelike.

2. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

2.1. Merni sistem

Eksperimentalna istraživanja tribološkog ponašanja tvrdih prevlaka otpornih na habanje na uzorcima od konstrukcijskih čelika obavljena su na kompjuterski podržanom tribometru TR-1 Laboratorije za tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu [7, 8, 9] u uslovima trenja sa podmazivanjem i bez podmazivanja.

2.2. Kontaktni elementi

Korišćena je modifikovana pin on disk šema kontakta. Ulogu pin-a ima nepokretni disk koji po izvodnici naleže na čelo rotaconog diska. U tim uslovima realizuje se nominalni linijski tip kontakta.

U svim ispitivanjima kao pokretni elementi kontaktnih parova korišćeni su diskovi prečnika 82 mm i debeline 8 mm od hrom nikl čelika Č.5420 u cementiranom stanju (dubina cementacije $0.6 - 0.8\text{ mm}$) sa tvrdoćom 60 HRC . Svi diskovi obrađeni su pod istim uslovima. Hrapavost kontaktnih površina aproksimativno je $R_a = 0.2\text{ }\mu\text{m}$.

Za ispitivanje efekata tvrdih prevlaka na tribološko ponašanje konstrukcijskih čelika korišćeni su nepokretni diskovi sa prevlakama. Disk kao nepokretni element omogućava veliki broj ponavljanja ispitivanja jednostavnim obrtanjem oko ose za određeni ugao.

Obuhvaćen je širok spektar konstrukcijskih čelika za cementaciju (Č.5420 - hrom nikl čelik, Č.4320 - hrom mangan čelik) i poboljšanje (Č.4730 - hrom molibden čelik i Č.1430 ugljenični čelik), koji se koriste u izradi raznovrsnih tribomehaničkih elemenata (Tabela 1). Na kontaktne površine uzoraka od ispitivanih čelika deponovane su različitim postupcima (ion-plating, catode arc deposition) TiN prevlaka, ZrN prevlaka i danas sve prisutnije višekomponentne TiAlN i Ti(C,N) prevlake. Hrapavost prevučenih površina ispitivanih uzoraka odgovara granicama $R_a = 0.3 - 0.4 \mu\text{m}$.

Kao posledica temperatura deponovanja na nekim uzorcima uočen je određen stepen pada tvrdoće osnovnog materijala, što je prikazano u tabeli 1.

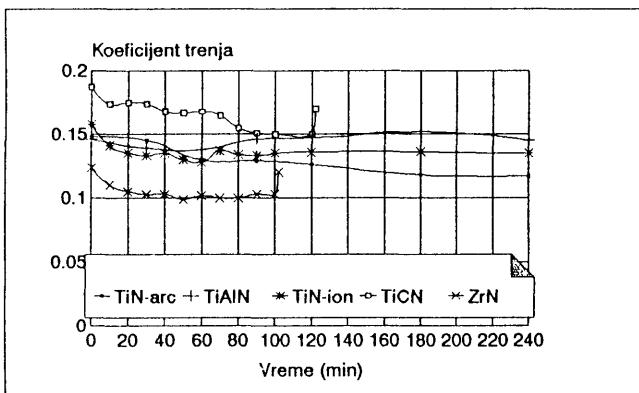
Tabela 1

Čelik	Termička obrada	Prevlaka	Debljina prevlake. (μm)	HRC	
				pre	posle
				deponovanja	
Č.5420	Cement.	TiN -arc	1.4		56
Č.5420	Cement.	ZrN	1.5		59
Č.4320	Cement.	TiN -ion plat.	1.0		59
Č.4730	Pobolj.	TiCN	1.1		27
Č.1430	Pobolj.	TiAlN	1.5		25

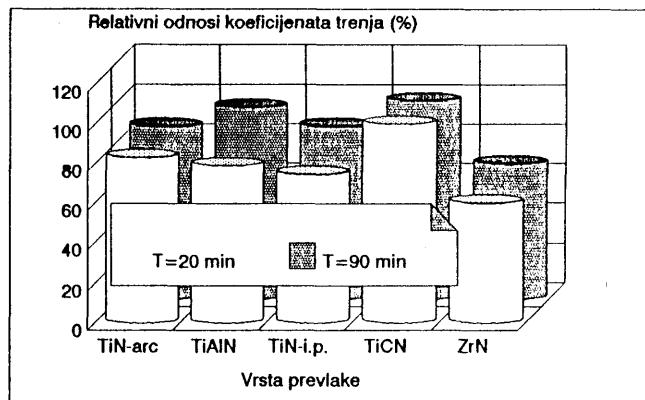
3. REZULTATI ISPITIVANJA

Serija ponovljanih ispitivanja triboloških efekata prevlaka obavljena je uslovima graničnog podmazivanja pri normalnom opterećenju $F_n=15 \text{ daN}$ i brzini klizanja $v=1.5 \text{ m/s}$.

Na sl. 1. prikazane su grafički vremenske serije koeficijenta trenja za ispitivane prevlake u rasponu 0 do 240 minuta, u kome dolazi do pojave razaranja ZrN i TiCN prevlaka. Početni deo dijagrama pokazuje postojanje izraženog perioda uhodavanja kontaktnih parova. Veći



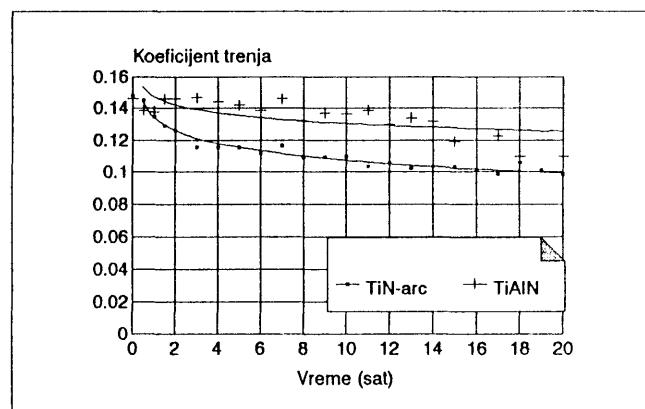
Sl. 1. Koeficijent trenja u funkciji vremena (granično podmazivanje $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
The friction coefficient as a function of time
(limiting lubrication $F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Коэффициент трения в функции времени
(границная смазка $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)



Sl. 2. Koeficijent trenja posle određenog vremenskog intervala (granično podmazivanje $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
The friction coefficient after the certain time interval
(limiting lubrication $F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Коэффициент трения после определенного промежутка времени (границная смазка $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)

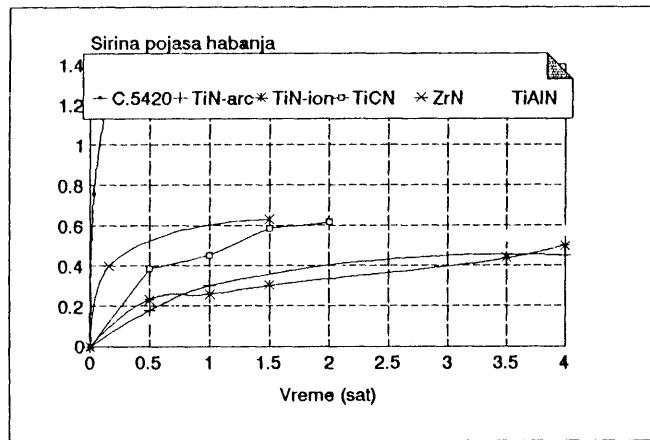
pad koeficijenata trenja u relativno kraćem vremenskom periodu kod TiN, TiN-ion plating i ZrN prevlaka upućuje na intezivniji razvoj inicijalnog habanja. Utvrđeno je postojanje znatnih razlika u pogledu frikcionih svojstava, posebno u početnom periodu procesa uhodavanja. Ti odnosi prikazani su dijagramski na slici 2. i pokazuju razlike između TiCN (prevlaka sa najvišim koeficijentom trenja) i ZrN prevlake (prevlaka sa najnižim koeficijentom trenja) na nivou 40%. U tom periodu ostalim prevlakama odgovara približno ista vrednost koeficijenta trenja.

Navedene razlike između maksimalnih i minimalnih koeficijenata trenja se umanjuju nakon perioda uhodavanja, ali dolazi do povećanja razlika koeficijenata trenja TiAlN, TiN-arc i TiN-ion plating prevlaka. Uspostavljeni odnosi koeficijenata trenja TiN-arc i TiAlN prevlaka nakon perioda uhodavanja održavaju se i u rasponu od 0 do 20 časova procesa trenja (slika 3.).



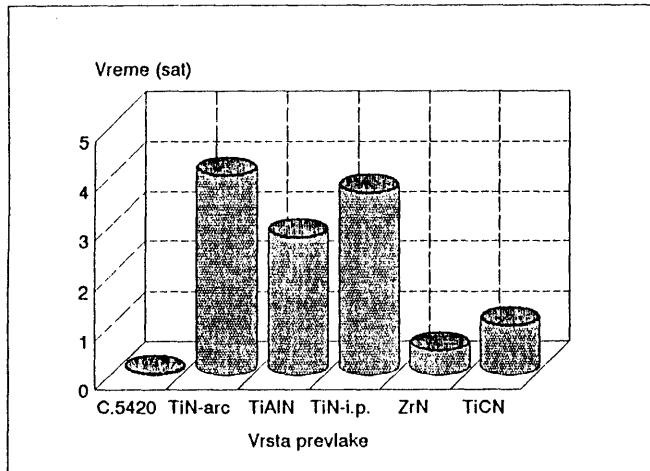
Sl. 3. Koeficijent trenja u funkciji vremena (granično podmazivanje $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
The friction coefficient as a function of time
(limiting lubrication $F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Коэффициент трения в функции времени
(границная смазка $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)

Razvoj procesa habanja na ispitivanim uzorcima praćen je kao širina traga habanja do pojave razaranja prevlaka. Osim prevučenih uzoraka ispitivanjem su, zbog mogućnosti poređenja, obuhvaćeni i uzorci od cementiranog čelika bez prevlaka.



Sl. 4. Trenje sa podmazivanjem Disk: Č. 5420 61HRC (granično podmazivanje $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Friction with lubrication ($F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$,
Disk: C.5420 61HRC)
Трение при смазке (границная смазка,
 $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)

Dobijeni prosečni rezultati prikazani su odgovarajućim krivima habanja na slici 4. Položaj krivih habanja govori o velikim razlikama u intenzitetu habanja ispitivanih uzoraka. Neprevučenom čeliku odgovara veoma strma kriva, tj. veoma intezivan razvoj procesa habanja. Pojava razaranja kod prevlake ZrN uočava se posle 1.5 sat trenja, a kod prevlake TiCN posle 2 sata trenja. Istovremeno TiN-arc, TiN-ion plating i TiAlN do 4 sata procesa trenja odlikuje ulazak u zonu ravnomernog habanja. Kod prevlake TiN-ion plating prosečno vreme do pojave nastajanja razaranja iznosi 9 sati dok na TiN-arc i TiAlN prevlakama ni nakon 20 časova rada ne dolazi do pojave



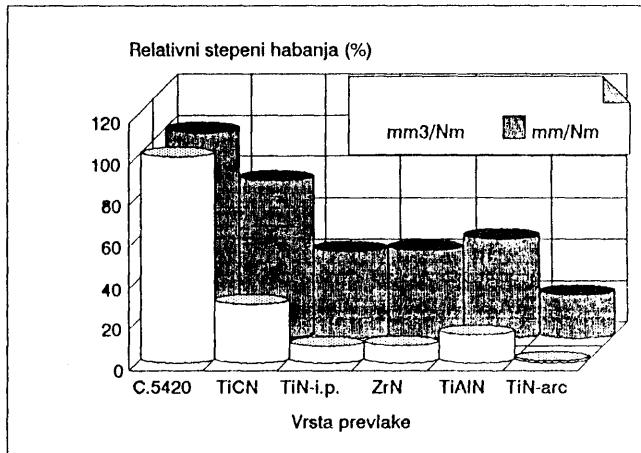
Sl. 5. Veličina trenja do dostizanja habanja $h=0.45 \text{ mm}$ (granično podmazivanje $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Value of friction at the point where wear is $h=0.45 \text{ mm}$ (limiting lubrication $F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)
Величина трения до начала изнашивания
(границная смазка, $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)

razaranja. Pri poređenju ove tri prevlake potrebno je imati u vidu i činjenicu da je debljina TiN-ion prevlake izuzetno mala ($1\mu\text{m}$).

Na slici 5. prikazano je poređenje ispitivanih uzoraka izvršeno na bazi vremena procesa trenja potrebnog da se dostigne širina traga habanja od 0.45 mm . Na osnovu njega moguće je uspostaviti rang listu prevlaka s obzirom na otpornost na habanje u sledećem redosledu: TiN-arc, TiN-ion plating, TiAlN, TiCN, ZrN. Ukoliko se, međutim, ima u vidu vreme do pojave razaranja prevlake, što je objektivniji kriterijum, u prethodnoj listi TiAlN i TiN-ion plating treba da uzajamno zamene mesta.

Pored navedenih, obavljena je i serija ispitivanja u uslovima trenja bez podmazivanja pri normalnom opterećenju $F_n=1.5 \text{ daN}$ i brzini klizanja $v=0.5 \text{ m/s}$. Habanje je mereno nakon 2 sata procesa trenja. Dobijeni srednji rezultati merenja prikazani na slici 6. u vidu relativnih stepena habanja, pri čemu je kao osnova za komparaciju služio stepen habanja čelika bez prevlaka. Stepeni habanja iskazani su na dva načina: odnosom širine traga habanja, površine traga habanja ili zapremine habanja i proizvoda opterećenja i puta trenja. Izrazitije razlike u pogledu otpornosti na habanje dobijaju se na bazi stepena habanja računatih sa zapreminama habanja. Ovo je posledica neilinearne zavisnosti između širine pojasa habanja i zapremine habanja uslovljene geometrijom kontakta.

Prikazani odnosi dobijeni u uslovima koje karakteriše mali stepen prekrivanja ispitivanog kontaktog elementa u tribološkom paru i veliko kontaktno opterećenje ukazuju da sve vrste ispitivanih prevlaka veoma unapređuju otpornost na habanje osnovnog materijala. To je još izraženije pri trenju sa podmazivanjem. Pri tome potrebno je imati u vidu da su TiCN i TiAlN prevlake na poboljšanim čelicima znatno manje tvrdoće u odnosu na reperni neprevučeni cementirani čelik Č.5420.



Sl. 6. Trenje bez podmazivanja Disk: č 5420 61 HRC (Fn=15 daN, v=1.5 m/s)
Friction without lubrication ($F=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$,
Disk: C.5429 61 HRC)
Трение без смазки (границная смазка,
 $F_n=15 \text{ daN}$, $v=1.5 \text{ m/s}$)

Uočljive su zнатне разлике у ниву отпорности на habanje površina sa različitim prevlakama. TiN-arc prevlaka pokazuje najveću otpornost na habanje u svim uslovima ispitivanja. Istovremeno, rang lista ostalih prevlaka unekoliko se menja zavisno od toga da li se radi o uslovima trenja sa ili bez podmazivanja.

Ove razlike su posebno interesantne ukoliko se dovedu u vezu sa karakteristikama čelika koji su služili kao osnova za nanošenje prevlaka. Tako TiAlN prevlaka na poboljšanom čeliku Č.1430 male tvrdoće posebno u uslovima podmazivanja ima otpornost na habanje koja ne zaostaje značajno za TiN prevlakama a prevazilazi ZrN prevlaku na cementiranim čelicima.

Uočljivo je da prevlaci sa najnižom otpornošću na habanje (ZrN) odgovara najniži koeficijent trenja, odnosno najbolja frikciona svojstva. Kod ostalih prevlaka rangiranje s obzirom na frikciona svojstva i otpornost na habanje pokazuje zнатnu saglasnost.

4. ZAKLJUČCI

- Sve ispitivane tvrde prevlake doprinose značajnom povećanju otpornosti na habanje kontaktnih elemenata od konstrukcijskih čelika u nepovoljnim uslovima nominalnog linijskog kontakta, pri čemu prevučeni kontaktni element odlikuje veoma mali koeficijent prekrivanja. Stepen povećanja otpornosti na habanje funkcija je kako vrste prevlake, tako i postupka deponovanja iste vrste prevlake.
- Izborom odgovarajućih prevlaka za date uslove kontakta moguće je i sa manje kvalitetnim konstrukcijskim čelicima prevazići tribološke efekte drugih prevlaka na znatno kvalitetnijim i skupljim konstrukcijskim čelicima. Prema tome može se tvrditi da u strogo tribološkom smislu primarni značaj ima kvalitet prevlake i da se kvalitetnim prevlakama deponovanim u tzv. "hladnim PVD postupcima" otvaraju mogućnosti supstitucije skupih čelika čelicima manje cene.
- Ispitivane prevlake, posebno u periodu uhodavanja odlikuju zнатne razlike u pogledu frikcionih svojstava. Pri tome ne postoji potpuno poklapanje redosleda prevlaka pri rangiranju s obzirom na frikciona svojstva i otpornost na habanje.
- Realno je očekivati da se savremenim postupcima prevlačenja kontaktnih površina uštodi visokokvalitetnih materijala može doprineti ne samo kroz povećanje veka trajanja tribomehaničkih elemenata, već i kroz njihovu supstituciju manje kvalitetnim materijalima sa kvalitetnim kontaktnim slojevima.

LITERATURA

- [1.] H. RUDIGIER, E. BERGMANN, J. VOGEL, **Properties of ion-plated TiN coatings grown at low temperatures**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 675-682.
- [2.] A. ERDEMIR, R.F. HOCMAN, **Surface metallurgical and tribological characteristics of TiN coated coated bearings steels**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 755-763.
- [3.] D. G. TEER, **A magnetron sputter ion plating system**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 901-907.
- [4.] TH. ROTH, E. BROSZEIT, K.H. KLOOS, **Properties and optimization of Rf-bias-sputtered TiN for the wear reduction of plastic manufacturing tools and components**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 272-282.
- [5.] E. MOLL, R. BUHL, H.K. PULKER, E. BERGMANN, **Activated reactive ion plating (ARIP)**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 219-232.
- [6.] D. G. TEER, **Technical note: A magnetron sputter ion-plating system**, Metallurgical coatings 1988, Proceedings of the 15th international conference, San Diego, California, April 11 - 15, 1988., str. 565-572.
- [7.] M. BABIĆ, **An approach to the measurement of tribological characteristics of contact layers triboelements**, Proceedings of the EUROTRIB 89, Helsinki
- [8.] B. JEREMIĆ, M. MILIĆ, M. BABIĆ, M. MEYER, **Uticaj geometrije kontakta na proces razaranja sloja čvrstog maziva**, Tribologija u industriji, No 1, 1991.
- [9.] M. BABIĆ, M. MEYER, **Tribological effects of hard lubricant coating application**, Proceedings of the JTC Nagoja 1990,

* Rad je nastao kao rezultat istraživanja na naučno-istraživačkom projektu "Razvoj postupaka za modifikovanje i regenerisanje kontaktnih slojeva elemenata tehničkih sistema i tribološki info-sistem"