



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТ НА ПОЛИМЕРНИ (PEEK) ЗЪБНИ КОЛЕЛА

ПЕТКО ДОБРЕВ, ДИМИТЪР ПЕТРОВ, ПЕТЪР ШИНДОВ

Резюме: *Представят се експериментално получените резултати от сравнително изследване относно износоустойчивостта на полимерни цилиндрични зъбни колела с прави зъби (покрити с вакуумно нанесен TiN и непокрити) изработени от поли-етер-етер-кетон (PEEK) работещи в двойки при различни условия със стоманени. Направени са някои изводи.*

Ключови думи: *полимер, PEEK, вакуумно нанесено покритие, износоустойчивост, цилиндрично зъбно колело*

EXPERIMENTAL RESULTS OF AN INVESTIGATION ABOUT WEAR DURABILITY OF POLYMER (PEEK) GEAR WHEELS

PETKO DOBREV, DIMITAR PETROV, PETAR SHINDOV

Abstract: *The experimental results of a comparative investigation about wear durability of polymeric spur gears (coated with vacuum deposited TiN and uncoated) made from poly-ether-ether-ketone (PEEK) running at different conditions in couples with steel spur gears are presented. Some conclusions are made.*

Key words: *polymer, PEEK, vacuum deposited coating, wear durability, spur gear wheel*

1. Въведение

Използването на полимерни зъбни предавки е широко разпространено в много индустрии и приложения. Всред предимствата на полимерните зъбни предавки можем да изброим намален излъчван звуков шум, самосмазване, силно намаляване на теглото и на разходите за изработка [1]. При използването обаче на полимерни зъбни колела трябва да се имат в предвид такива техни недостатъци като по-голямото топлинно разширение и свиване, по-ниски параметри на якост против счупване на зъбите от умора на огъване и по ниска контактна якост, по-голямо абсорбиране на влага и т.н. В научните публикации се докладва за различни повреди при полимерните зъбни колела (термично свързани, питинг и износване), като [2] най-често повредите са в

резултат от износването. Изследвани са различни параметри влияещи на износването при пластмасовите зъбни колела - на грапавостта на страничните повърхнини на стоманени зъбни колела въртящи се с полимерни [3], на въвеждането на политетрафлуоретилен (PTFE) в качеството на вътрешна смазка [4], на конструктивни мерки [5] с противоречиви резултати. Известен подход за повишаване контактната товароносимост и износоустойчивост при стоманените зъбни колела е подходящото третиране на странична повърхност на зъбите (напр. азотиране, циментация). При полимерните зъбни колела този подход може да се реализира, както се предлага в [5, 6], чрез използване на метален бандаж. Друг изследван начин е чрез нанасяне на покрития от твърди смазки [7] –

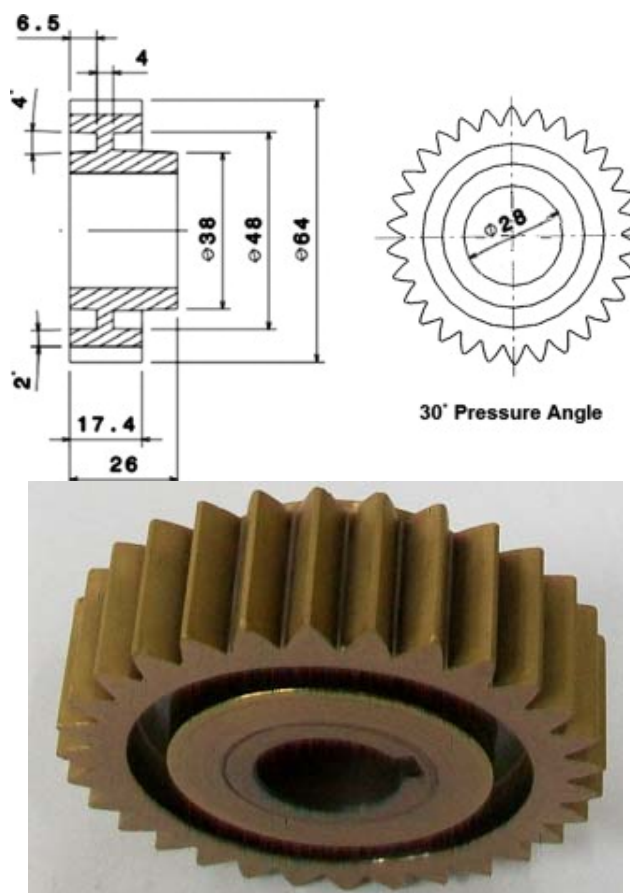
експериментите показват подобрени функционални характеристики за покритите с PTFE особено отчетливо за полимерни колела от полиамид (PA6). Експерименталните резултати публикувани в [8] потвърждават ефективността и от прилагането на покрития чрез вакуумно нанасяне на титан нитрид (TiN) върху страничната работна повърхност на зъбите на полимерни зъбни от полиамид (PA6), но при този материал, поради ниските му температури на топене и газенето на въглеродородни молекули във вакуум, има определени технологични проблеми по отношение нанасянето на тези покрития. Много по-добри характеристики в това отношение спрямо тези на полиамида има полимерния материал – полиетеретеркетон – РЕЕК. Последният [9] съчетава в себе си комбинация от: високи механични показатели (висока якост и отлична износоустойчивост), много висока сервизна температура (250°C при продължително натоварване и 310°C при краткотрайни натоварвания), ниска запалимост и устойчивост на радиация, химична резистентност. РЕЕК е един от малкото полимери с приложение в среда на ултрависок вакуум. Последната спомената характеристика плюс температурната устойчивост на полимерния материал РЕЕК позволява относително леко да бъдат вакуумно нанесени покрития от TiN.

В тази връзка тук се описват експерименталните резултати от сравнителното изследване на износоустойчивост на непокрити и покрити с TiN полимерни цилиндрични зъбни колела влизачи в зацепление под товар и при честота на въртене от 1000 rev/min със стоманени техни аналози от Ст45.

2. Обект, средства и методи на експерименталното изследване

Тестовите изследвания бяха направени върху полимерни зъбни колела (любезно предоставени от Университет на Бирмингам, Великобритания) от материала [10] неусилен поли-етер-етер-кетон (РЕЕК 450G) изработени по метода на отливане под налягане със стоманена вътрешна втулка за закрепване чрез шпонка към вал. Механичните характеристики на полимерния материал са [11]: граница на якост (23 °C) на опън 100 МПа, модул (23 °C) на линейни деформации 3,7 GPa, модул (23 °C) на деформации на огъване 4,1 GPa, температура на стапяне 343 °C, температура на встъкляване 143 °C, температура (при 1,8 МПа) на термично пълзене 152°C, плътност – 1,31 g/cm³. Основните параметри на изследваните зъбни колела са – брой зъби $z = 30$, модул $m = 2$ mm,

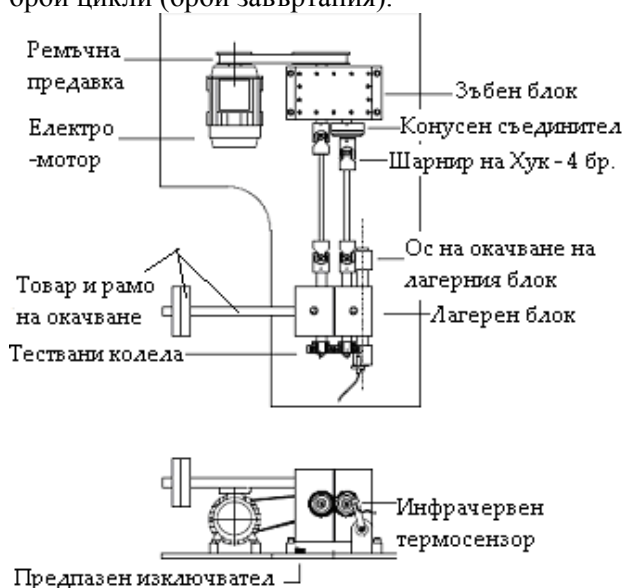
широчина на зъбния венец $b = 17,4$ mm, профилен ъгъл по делителната окръжност $\alpha_w = 30^\circ$ (фиг.1).



Фиг. 1. Полимерни зъбни колела – конструкция и фотография.

За целите на изследването върху образци от такива зъбни колела бе нанесено покритие от TiN (фиг.1 – фотографията) по следната технологична последователност: 1) Почистване, предварителна обработка на повърхността с повърхностно активен реактив и изсушаване на полимерните зъбни колела; 2) Плазмено-химическа модификация (йонна обработка в тлеещ разряд) на повърхността с реактивен газ кислород; 3) Нанасяне на лаково покритие във фирма „EWERT LAK“ – гр. Стрелча чрез пулверизация с дебелина на слоя 20-40 μ m. Лаковият композит, нанесен върху полимерната подложка изпълнява две функции: създаване на гладка, бездефектна повърхност и създаване на защитен противодифузионен бариерен слой; 4) Изпичане на нанесения лаков композит при температура от 180°C. Нанесеният лаков композит с дебелина 20-40 μ m (плътност 1.65 g/cm³) е устойчив на температури до 240°C; 5) Вакуумно електродъгово нанасяне на TiN с дебелина 1 μ m в режим на прекъсване (времетраене 2-3 часа).

Експериментите бяха извършени върху стенд (фиг.2) работещ на принципа на затворения контур (на циркулация на мощността) за изпитване на износоустойчивост на полимерни зъбни колела. Електродвигателят през ремъчна предавка задвижва зъбните колела като преодолява само съпротивлението от триене в механичната система, а изпитваната двойка зъбни колела е натоварена със статичен момент осигурен от теглото на товара окачен на рамо спрямо оста на окачване на лагерния блок. По време на въртенето се измерваше текущата температура в полюса на зацепването с помощта на безконтактен инфрачервен термосензор. Данните от този датчик се събираха от интерфейсно устройство за събиране на данни (data logger) и се записваха чрез специализиран софтуер в файлове в компютър. При измерване на износването се използваше прецизна аналитична везна със стойност на делението 0,1 mg. Износването се определяше чрез измерване на загубата на маса след изтичане на определен интервал от време. Тогава стенда се спираше, тестваните колела се сваляха и се измерваше тяхната маса. След това те отново се поставяха на стенда и въртенето им под натоварване продължаваше така до изтичането на определен брой цикли (брой завъртания).



Фиг. 2. Схема на изпитателния стенд

Тестовите изпитания бяха проведени върху сдружени двойки (общо четири двойки) от полимерно (непокрито/покрито) и стоманено зъбни колела при различен натоварващ въртящ момент T – при 27,8 Nm и 17,4 Nm без смазване при честота на въртене от 1000 об/мин до достигане на определен брой завъртания. Измерването на масата на едно контролно зъбно колело закрепено неподвижно към лагерния

блок се използваше за корекцията на измененията на масата дължащи се на изпарението или абсорбцията на влага от изпитваните полимерни зъбни колела. Типичната продължителност на един експеримент бе от $\frac{1}{2}$ до 2 денонощия със спиране само за замерване на масата.

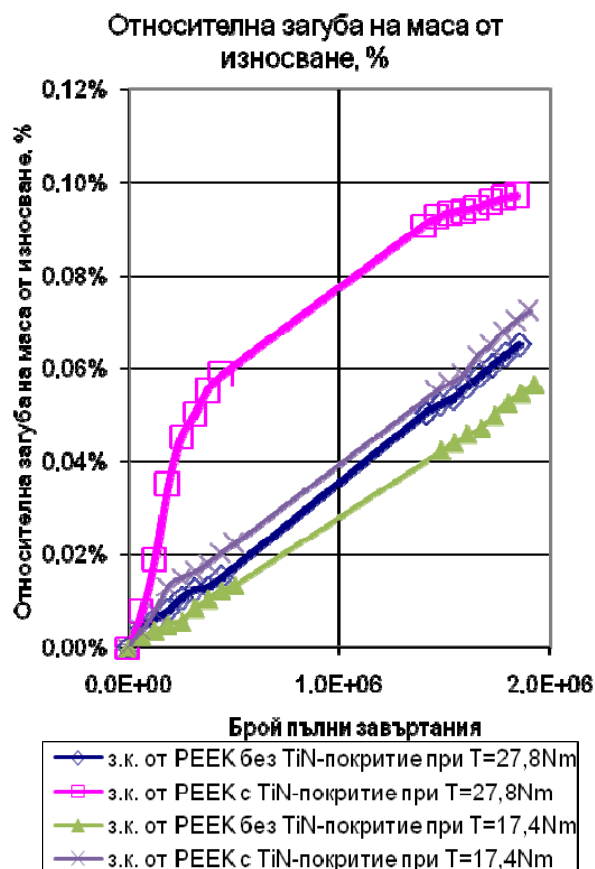
3. Резултати и коментари

3.1. Износване

Износването в зависимост от броя цикли и големина на натоварването T , според експерименталните резултати е показано (фиг.3) чрез процента на относителната загуба на маса $R\%$ изчислена по формулата:

$$R\%_i = \frac{\left(\frac{Q_i}{Q_0} \cdot P_0 - P_i \right)}{P_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Където: P_0 , P_i – съответно първоначална и текущо измерена маса на зъбното колело; Q_0 , Q_i – съответно първоначална и текущо измерена маса на контролното зъбно колело; $R\%_i$ – относителната загуба на маса в проценти.

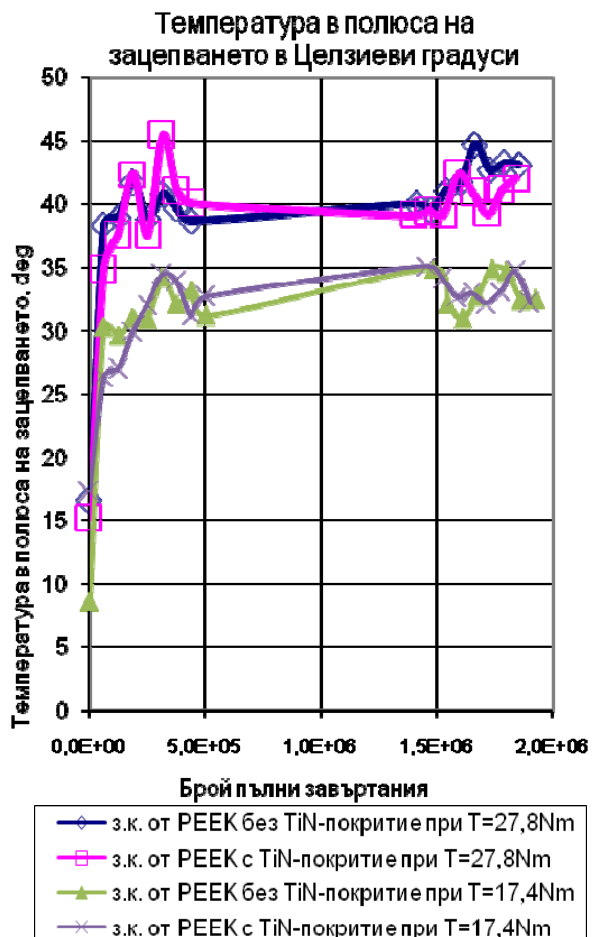


Фиг. 3. Износване – резултати

Горните графики показват очакваното повишаване на износване с нарастване на

натоварването T , но не потвърждават ползата от нанасяне на покритие от TiN. Специално кривите на износването за двойките с покрити с TiN полимерни зъбни колела в началото имат стръмен участък, докато след това стръмността става еднаква, дори малко по-малка от тази на непокрытите. Наблюдаваните резултати могат да бъдат обяснени с това, че в началото на процеса интензивно се сваля повърхностния слой, който при покритите с TiN полимерни зъбни колела е с по-висока специфична маса (5.22g/cm^3) и освен това сваления и надробен на ситни частици слой от TiN започва да играе ролята на абразивен прах и допринася за бързо износване. След първоначалния период на по-бързо износване и намаляване на масата при полимерните зъбни колела с TiN покритие техните по-изгладени повърхности, макар и не толкова забележимо, по-бавно се износват.

3.2. Температура в полюса на зацепване.



Фиг. 4. Температура в полюса на зацепване

Резултатите ясно показват очакваното наличие на права корелация между натоварването T и измерваната в полюса на зацепване температура. Освен това, макар и не така ясно изразено, се забелязва, че двойките с

покрити с TiN полимерни колела имат по-високи температури в началото на процеса на тестване, след което спрямо двойките с непокрыти полимерни колела температурата нараства по-бавно и в края на тестването дори става по-малка. Обяснението отново може да се даде с това, че сваления в началото и надробен на ситни частици слой от TiN, играейки ролята на абразивен прах, допринася за по интензивно износване и отделяне на топлина. След този първоначален процес, по изгладените повърхности на първоначално покритите полимерни колела, макар и не толкова забележимо, отделят по-малко топлина спрямо тези, които не са били покрити.

3.3. Грапавост на повърхнините.

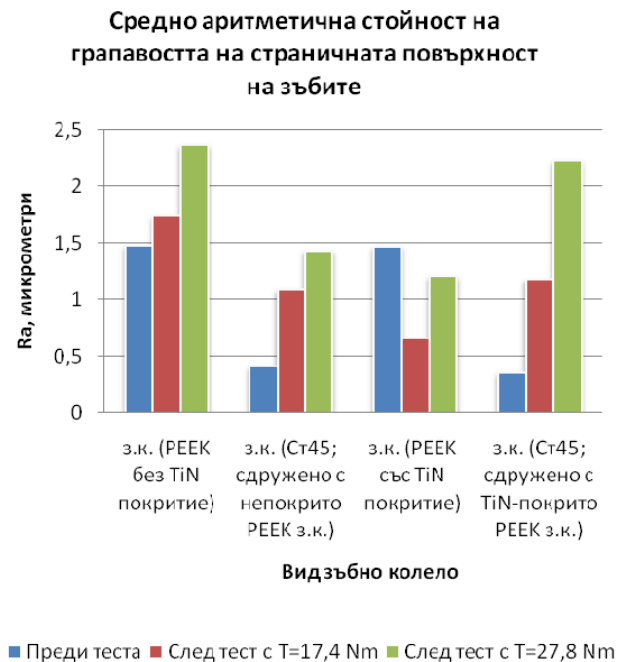
Измерването на грапавостта по страничната работна повърхност на зъбните колела (стоманени и зацепените с тях полимерни с и без покритие) преди и след тестовите изпитания бе извършено с преносим профиломер RCE-RT 1200 както е показано на фиг. 5.



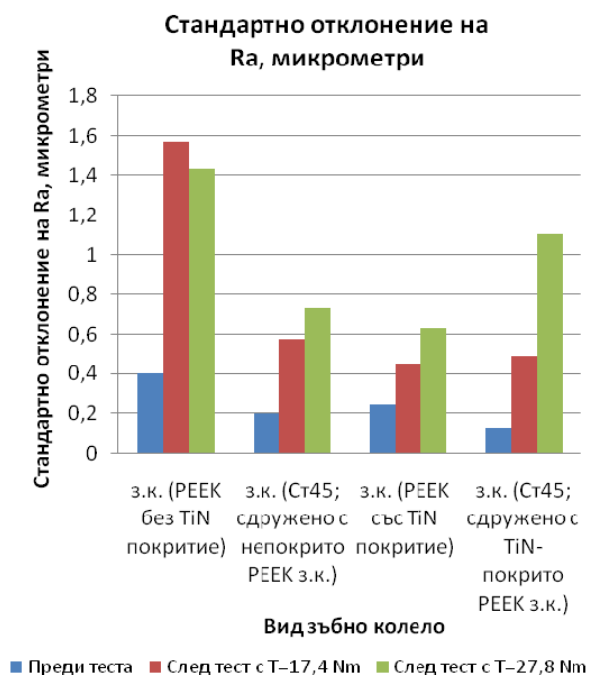
Фиг. 5. Измерване на грапавост.

Резултатите от измерванията на грапавостта са обобщени чрез графиките от фиг.6 и фиг.7. На фиг.6 са дадени средноаритметичните стойности на средноаритметичното отклонение на профила Ra от средната линия при мерене надлъжно по

страничната повърхност на n броя зъби ($n \approx 15$) от всяко зъбно колело (стоманено и полимерно – покрито и непокрито) преди и след тестовите изпитания. На фиг. 7 е дадено разсейването на резултатите от измерването на R_a .



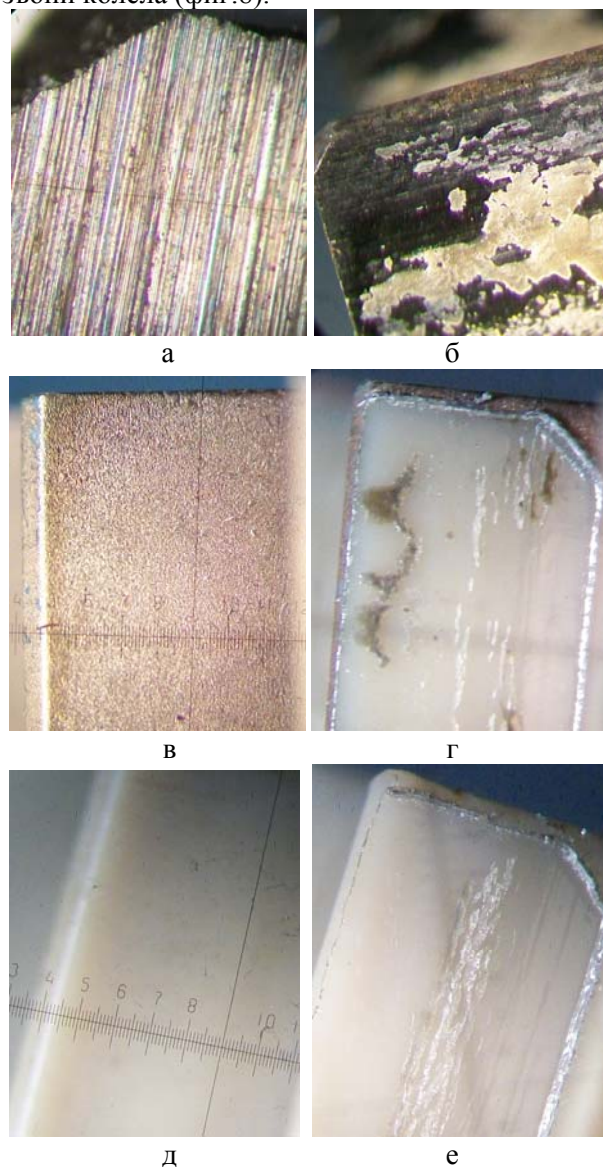
Фиг. 6. Грапавост, параметър R_a – средни стойности.



Фиг. 7. Стандартно отклонение на измерената стойност на R_a .

Резултатите показват, че с нарастване на натоварването от една страна се повишава грапавостта (фиг.6) на страничната работна повърхност на зъбите при всички зъбни колела – стоманени и полимерни (само покритите

полимерни преди теста са имали по-голяма грапавост, но и при тях с нарастване на натоварването след тестовите изпитания нараства и грапавостта), а от друга – се повишава и разсейването на получените резултати (фиг.7). Тези резултати могат да бъдат обяснени [11] с наблюдаваното явление на трансфер на материал преимуществено от полимерното към стоманеното колело и абразивно най-вече износване на полимерните зъбни колела (фиг.8).



Фиг. 8. Снимки на страничните работни повърхности на зъбите – преди теста (а – стоманено; в – покрито от PEEK; д – непокрито от PEEK) и след теста (б – стоманено; г – покрито от PEEK; е – непокрито от PEEK).

4. Заключение

Проведените изследвания целят да се потвърдят или отхвърлят експериментално предположенията за положителния или

отрицателен ефект от вакуумно нанасяне на покритие от титан нитрид върху страничната повърхност на зъбите на цилиндрични зъбни колела от полимера полиетеретеркетон (PEEK) с цел повишаване на износоустойчивостта им. Приложеният масов метод за отчитане на износването обаче, поради разликата в специфичната плътност на субстрата (полимера PEEK $-1,31 \text{ g/cm}^3$) и покритието (TiN $- 5,22 \text{ g/cm}^3$), по-скоро не може да даде категоричен отговор. Получените резултатите относно стръмността на характеристиката на относителното износване на маса, на изменението на температурата в полюса на зацепване, измерването на грапавостта по страничната повърхност на зъбите и микроскопските снимки на страничната повърхност на зъбите показват, че при тези натоварвания и скорост на въртене нанесения слой от TiN се сваля сравнително бързо от податливата полимерна основа – в рамките на първите 250 хиляди завъртания. Надробеният на ситни частици слой от TiN на свой ред ускорява износването си и след това и на оголения полимерен материал. След изчерпването на праха от частици от TiN вече износването на полимера става относително по-бавно (спрямо непокрытите полимерни зъбни колела) и с по-малко отделяне на топлина от триене и износване. Този анализ ни дава основание да заключим, че нанасянето на покритие от TiN върху и без това достатъчно износоустойчивия полимер PEEK не носи съществени ползи по отношение подобряване на износоустойчивостта.

Публикуването на това изследване става благодарение на средства по научноизследователски проект в помощ на докторанта Петко Добрев от ТУ-София, филиал Пловдив.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/ameri-cas/markets/gears.pdf>.
2. K. Mao. *The performance of dry running non-metallic gears*. PhD thesis, Birmingham University, 1993.
3. S. Akkurt. On the effect of surface roughness on wear of acetal-metal gear pairs. *Wear* 184, pp 107-109, 1995.
4. M. Rao, C. J. Hooke, S. N. Kukureka, P. Liao and Y. K. Chen. The effect of PTFE on the friction and wear behavior of polymers in rolling-sliding contact. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 12, pp 1946-1958, 1998

5. Петров Д. “Моделно изследване на оригинална конструкция неметални зъбни колела с тънъкостенен метален бандаж на зъбния профил”, Научни трудове на Съюза на Учените в България – Пловдив, серия В – “Техника и технологии”, том IV, ISBN 1311 – 9192, Научна сесия “Техника и технологии, естествени и хуманитарни науки”- 22.10.2004 г., Пловдив 2005 г., стр. 7-12.
6. Petrov Dimitar, Dinev Georgi “Model investigations on different original designs of nonmetal tooth gears with sheet iron bandage, Proceeding of the DEMI’2005 – 7th International Conference On Accomplishments In Electro And Mechanical Industries, Banja Luka University, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, 27 - 28 .05. 2005, pp.83 -88.
7. Dimitar Petrov, Karl Dearn, Doug Walton, Richard Bancs, Some experimental results concerning the influence of surface coatings from solid lubricants on the wear of polymeric gears, *Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv, Fundamental Sciences and Applications*”, Vol. 16, 2011, International Conference Engineering, Technologies and Systems - TechSys 2011, Plovdiv, Bulgaria
8. Dimitar G. Petrov, Petar Hr. Shindov, Dimitar N. Dimitrov, Petar L. Dimitrov , An investigation on the loading durability of polymeric gear wheels with vacuum deposited coatings, II International Conference - IIZS 2012, University of Novi Sad, Technical faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, Republic of Serbia, 2012.
9. <http://www.tregaltd.com/img/svoistvaCOLOR.pdf>
10. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=ffc10b084c4e4dd6975438d9968e1292&ckck=1>
11. K.D. Dearn, T.J. Hoskins, D.G. Petrov, S.C. Reynolds, R. Banks, Applications of dry film lubricants for polymer gears, *Wear*, Volumes 298–299, 15 February 2013, Pages 99–108.

Контакти:

Адрес: Пловдив 4000, ул. "Цанко Дюстабанов" №25

E-mail: eng.dobrev@mail.bg

E-mail: dimgog@abv.bg

E-mail: p_shindov@mail.bg