

UDC (УДК) 519.2

M. BOŠANSKÝ**HARD THIN COATINGS AND THEIR APPLICATIONS ON C60E NON-STANDARD GEARS**

В статті наведені результати трибологічних лабораторних випробувань п'яти тонких твердих покриттів на трьох матеріалах, які використовуються при створенні зубчатих коліс. Оцінка проводилась по параметрам абразивної наноміцності, коефіцієнта тертя, зносостійкості, товщини покриття та його структури для покриття DLCI, нанесеного на зубчасту шестерню з опукло-увігнутим зачепленням, виготовлену з матеріалу C60E. Знос даних зубчастих коліс був протестований на стенді Ньюмана з використанням якості змащування органічних мастил Biohyd MS46 та BioGear S150. Результати випробувань показали, що через особливі умови для зубчастих коліс, які спрягаються, неможливо розробити покриття для зубчатої передачі тільки на основі лабораторних випробувань – необхідно враховувати конкретні вимоги до нанесення покриття, типу та виду передачі а також матеріалу колеса.

Ключові слова: випробування на абразивну міцність, PVD, тверде покриття, зубчасте колесо з опукло-увігнутим зачепленням, стенд Ньюмана, C60E.

В статье представлены результаты трибологических лабораторных испытаний пяти выбранных тонких твердых покрытий на трех материалах, используемых при изготовлении зубчатых передач. Оценка проводилась по параметрам абразивной нанотвердости, коэффициента трения, износостойкости, толщины покрытия и его структуры для покрытия DLCI, нанесенного на зубчатую шестерню с выпукло-вогнутым зацеплением, изготовленным из материала C60E. Износ данных зубчатых колес был протестирован на стенде Ньюмана с использованием в качестве смазки органических масел Biohyd MS46 и BioGear S150. Результаты испытаний показали, что из-за особых условий для сопрягаемых зубчатых колес невозможно разработать покрытие для зубчатой передачи только на основе лабораторных испытаний – необходимо учитывать конкретные требования к нанесению покрытия, тип и вид передачи а также материал колеса.

Ключевые слова: испытание на абразивную прочность, PVD, твердое покрытие, зубчатое колесо с выпукло-вогнутым зацеплением, стенд Ньюмана, C60E.

The article presents the tribological results of laboratory applications five selected thin hard coating on the three materials used in the manufacture of gears. Based on their evaluation in terms of scratch test nanohardness, coefficient of friction, wear resistance, coating thickness and its structure was DLCI coating applied to the gear of the C-C gearing made of material C60E. Thus coated wheels lubricated with organic oils Biohyd MS46 and BioGear S150 were tested for scuffing to the Niemann's stand. The test results showed that due to the specific conditions for mating gears is not possible to design a coating for gear based on laboratory tests only, but should be based on what the specific requirements for the gear to be applied coating, ie. what type and kind of gearing and on what material wheels.

Keywords: scratch test, PVD, hard coating, C-C gearing, Niemann's stand, C60E.

1. Introduction. The gearing consists of power transmission, which are placed particularly high demands on durability and reliability. With increasing of its speed growth rate additional dynamic forces in gearing, which are make increase of vibration and noise and with increasing load also increases friction work and with it also increases the thermal load them. These facts are adding stress whitening, which carries an increased risk of damage to the gears [1–3]. These factors place increased demands on production quality and precision gears.

One possible way of increasing the surface properties of the gears and thus increase the loading capacity of minimizing the surface damage of the tooth side during the operation, which can be affected in several ways, e.g. changing material, changing the gearing geometry, heat treatment, chemical heat treatment or formed on the surface side of the tooth thin isotropic film.

Coating can be defined as a process that results in the creation of a thin coating on the isotropic working surfaces of parts to improve their surface properties. Practical use can be seen especially in the use of artificial thin layers (coatings). The development of thin-layer technology, mainly due to vacuum technology and capabilities that a precise and sensitive diagnostic methods needed to study the properties of these thin films [4].

From the point of view of physico-chemical processes taking place in the creation of coatings, coating processes can be generally categorized into three groups:

- 1 CVD (Chemical Vapour Deposition),
- 2 PACVD (Plasma Assisted CVD),
- 3 PVD (Physical Vapour Deposition).

The required temperature at the application hard thin coatings shown in fig. 1. From the analysis of the size of operating temperatures shows that, for the application of coatings in gear transmissions can be used only by PVD, whose working temperature is below 500 °C. In this method is the

low application temperature, there is no heat affected surface layers of parts and their deformation, and therefore this method is the most dynamic developing the coating methods.

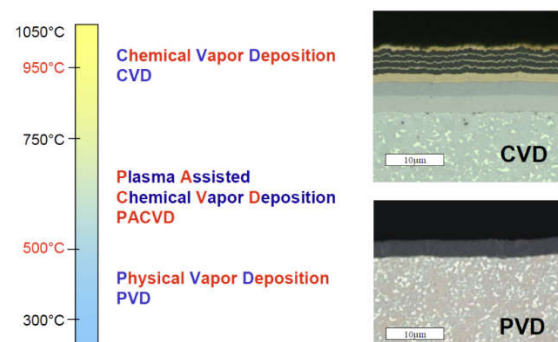


Fig. 1 – Working temperature coating technology CVD, PVD and PACVD

During deposition of PVD (Physical Vapour Deposition) layers are used by physical processes (heat, kinetic energy) to transform the deposited material from solid to gas. Thin layers deposited by PVD technology with a thickness of 0,0025 mm to a very high hardness, abrasion resistance and resistance to high temperatures.

PVD coatings have found wide application not only in the field of machining and forming, but now applied as well as in the production of gears, which creates conditions in the future also their wider use in gear power transmissions. Mostly coatings used in particular films based on amorphous carbon, known as DLC coatings. These layers are now used more types, the main difference being the method of deposition. However, there are a large number of different applications which may be a conventional or nanostructured PVD coatings. Both of the PVD coating can be in the form of monolayers and multilayers or gradient layers [5–7].

2. Evaluation of selected coatings on structural materials suitable for the manufacture of gear transmissions. In our workplace Institute of Transport Technology and Engineering Design Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava we are testing of selected PVD coatings in their application to non-standard convex-concave gearing (C-C gearing) with a low slip coefficient.

After detailed analysis of the fundamental tribological properties of thin PVD coatings have for their possible application in gearing we are selected five kinds of coatings: TiN, CrN, DLCI sandwich CR/CRN (plasma nitriding and PVD), duplex CRN (plasma nitriding and PVD), which were applied in laboratory samples for the selected construction materials suitable for the production of gears C60E, 16MnCr5, 41CrAlMo7. The results, as the volume loss of the coating on the substrate surface C60E are shown in fig. 2, the substrate 16MnCr5 in fig. 3 and the substrate 41CrAlMo7 in fig. 4 [8].

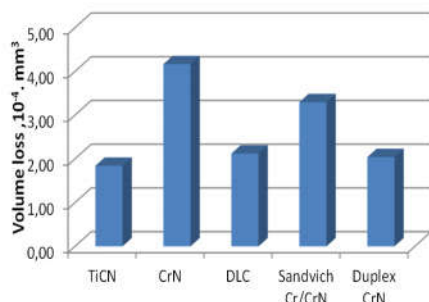


Fig. 2 – Volume loss of the surface selected coatings on the substrate C60E [8]

The course of the coefficient of friction on the selected materials is show in fig.5 for substrate C60E, in fig. 6, for the substrate 16MnCr5 and in fig. 7 for substrate 41CrAlMo7.

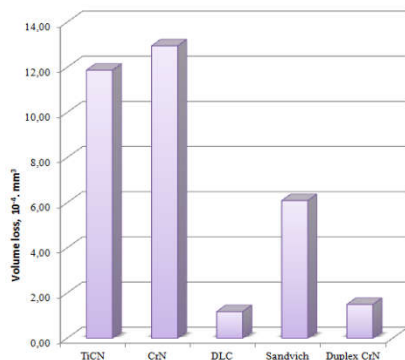


Fig. 3 – Volume loss of the surface selected coatings on the substrate 16MnCr5 [8]

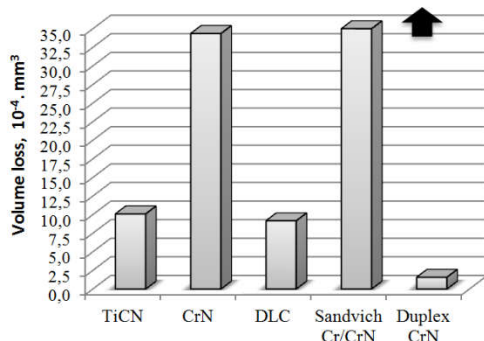


Fig. 4 – Volume loss of the surface selected coatings on the substrate 41CrAlMo7 [8]

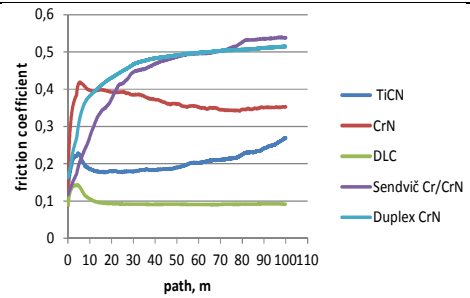


Fig. 5 – The course of the friction coefficient of selected coating on the substrate C60E

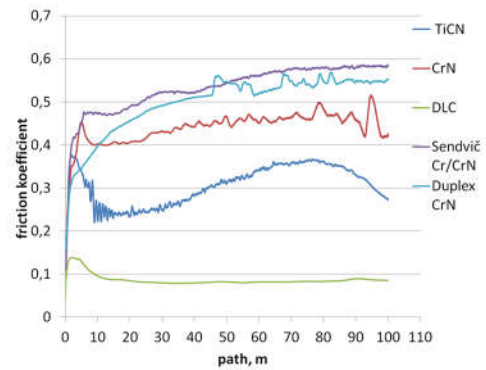


Fig. 6 – The course of the friction coefficient of selected coating on the substrate 16MnCr5

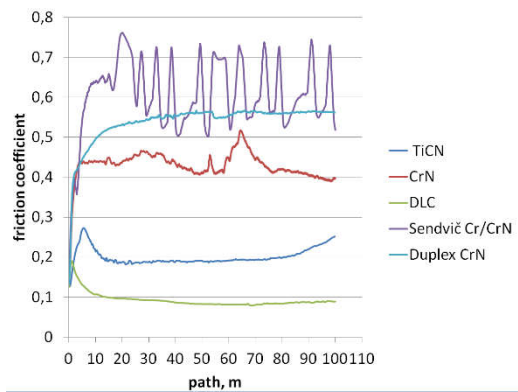


Fig. 7 – The course of the friction coefficient of selected coating on the substrate 41CrAlMo7

Based on the results obtained from the scratch test, analysis nanohardness, coefficient of friction, wear resistance, coating thickness and microstructure [8] can establish certain assessment test coatings on selected materials [9–11], which is listed in the table 1 for substrate C60E and substrate 16MnCr5 and in table 2 for substrate 41CrAlMo7.

Table 1 – Substrate C60E and substrate 16MnCr5 [8]

Test	C60E					16MnCr5				
	TiCN	CrN	DLC II	Sandwich Cr/CrN	Duplex CrN	TiCN	CrN	DLC II	Sandwich Cr/CrN	Duplex CrN
Scratch test	👍	👍	👎	👍	👍	👍	👍	👎	👍	👍
Nanohardness	👍	👍	👎	👍	👍	👍	👍	👎	👍	👍
Friction coefficient	👍	👎	👎	👍	👎	👍	👎	👎	👍	👍
Wear resistance	👍	👎	👍	👍	👍	👍	👎	👍	👍	👍
Thickness	👍	👎	👎	👍	👍	👍	👍	👎	👍	👍
Microstructure	👎	👎	👎	👍	👍	👎	👎	👎	👍	👍

From table 1 it can be concluded that the substrate C60E for coating DLCII has not score low, but only very

good and good, therefore his laboratory results include the substrate C60E among the best.

Table 2 – Substrate 41CrAlMo7

	41CrAlMo7				
	TiCN	CrN	DLC II	Sandwich Cr/CrN	Duplex CrN
very good					
weak					
good					
Scratch test	👍	👍	👍	👍	👍
Nanohardness	👍	👍	👍	👍	👍
Friction coefficient	👍	👍	👍	👍	👍
Wear resistance	👍	👍	👍	👍	👍
Thickness	👍	👍	👍	👍	👍
Microstructure	👍	👍	👍	👍	👍

Title DLC is currently used to refer to a metastable state of an amorphous carbon containing a significant proportion of sp³ bonds. These layers have very good mechanical properties, such as great hardness, chemical stability and excellent tribological properties. DLC layers therefore have great possibilities of its application in industry.

In the automotive industry, the DLC coating is applied to the tool, not only for the production of the components, but also to reduce friction in the parts of the motor, wear and corrosion protection, the coating is most often the piston rings, valves, pistons, pump parts, camshafts and the like. Tribological laboratory analysis shows the possibility to use the DLC coatings in the transmission mechanisms.

Operating conditions in mesh involute gears in interaction with the ecological lubricant [11–13] is significantly different from the laboratory conditions (high load and pressure in contact, a big specific slips and high temperatures in contact), therefore, we applied the coating to the non-standard C-C gearing, in which the contact pressure smaller and smaller slips. Niemann's tests for scuffing showed, that applications of the DLCII coating for real gears did not confirm the good laboratory results. Niemann's test for scuffing showed there was a peeling applied DLCII coating first on the addendum and then on dedendum of teeth and gradually the entire surface of the side of the tooth.

These results show that the coating DLC II applied to the convex-concave teeth working with organic lubricants OMV BIOHYD MS46 a OMV BIOGEAR S150 is be not very suitable coating for gearing mesh, because after a load level 4 was the coating DLCII wash out from the teeth [14].

3. Conclusion. From the results it can be concluded that given the specific operating conditions of mesh gears (high contact pressure, high temperature at the point of

contact, type of lubricating oil and a specific slip in the gearing) can be in designing a suitable coating for gear based on standard laboratory tests only indicatively. For the design a suitable coating for gearings need to be analyzed for what particular type of gearing is the coating used and also to which material should be coating is applied, as in compliance with other standard conditions such as roughness, accuracy and hardness side tooth. For the critical parameters applied coating on gear teeth is in particular the adhesion to the base material, the hardness and the friction coefficient and lubricant oil.

Acknowledgments. The research work reported here was made possible by grant projects VEGA 1/0227/15.

References

1. Bošanský M. Design II / Bošanský M., Vereš M., Rusnák J. [et al.] // STU Bratislava, 2009, 325 p., ISBN 978-80-227-3510-0.
2. Bošanský M. Non-Standard Gearing / Bošanský M., Vereš M., Tököly P. [et al.] // STU Bratislava, 2012, 159 p., ISBN 978-80-227-3713-5.
3. Bošanský M. Theory of Convex-Concave and Plane Cylindrical Gearing / Bošanský M., Vereš M., Gaduš J. // STU Bratislava, 2006, 180 p., ISBN 80-227-2451-3.
4. Bláhová O. Mechanické vlastnosti tenkých vrstev deponovaných obloukovým odpařováním. / Bláhová O. // [Disertační práce]. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 1998.
5. Lümkmann A. A New Generation of PVD Coatings for High-Performance Gear Hobbing / Lümkmann A., Beutner M., Morstein M. [et al.] // Preprint from A Coatings Conference, Thessaloniki, Greece, Oct.1–3, 2014, Platit.
6. Tuszyński W. The Effect of WC/C Coating on the Wear of Bevel Gears Used in Coal Mines / Tuszyński W., Kalbarczyk M., Michalak M. [et al.] // Materials Science (Medžiagotyra). Vol. 21, No. 3., 2015, ISSN 1392 – 1320.
7. Rusnák J. Štúdium tribologických vlastností materiálov nanosených na povrch nekonvenčnými technológiami / Rusnák J. // [Monografia] MF SPU Nitra 2005, 67 p, ISBN 80-8069-485-0.
8. Vanya A. Design of the structure the deposited layers as the coating-tooth flank on the requirements of the selected gearing / Vanya A. // [Dissertation thesis], Bratislava 2012, 104 p.
9. Kučera M. Analysis of the information from the test of tribological characteristics of selected materials / Kučera M. // In: Zborník. "Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2004", Nitra : SPU, s. 4, ISBN 80-8096-362-5.
10. Kučera M. The study of the effect of dynamic loading process on the properties of tribological system: methods, devices, interpretation / Kučera M., Kučera M.jr., Beloev Ch. [et al.] // 1st ed. Ruse: Angel Kanchev University of Rousse, 2015, s. 86, ISBN 978-954-712-644-2.
11. Tóth F. Effect of Selected Ecological Lubricants on the Wear of Defined Sliding Bearing / Tóth F., Rusnák J., Kadnár M. [et al.] // Vedecký časopis Acta technologica agriculturae 1/2014, s. 13–16, ISSN 1338-5267 (online), ISSN 1335-2555 (printed edition).
12. Tóth F. Study of tribological properties of chosen types of environmentally friendly oils in combined friction conditions / Tóth F., Rusnák J., Kadnár M. [et al.] // Vedecký časopis Journal of Central European Agriculture, 2014, 15 (1), s. 185–192, ISSN 1332-9049.
13. Tóth F. The Study of Geometrical Changes of a Given sliding Couple caused by the influence of Operation. Methods, Devices, interpretation. / Tóth F., Rusnák J., Hristo B., [et al.] // [Scientific monograph]. Angel Kanchev University of Ruse Agrarian and Industrial Faculty, 2014, s. 82, ISBN 978-954-712-628-2.
14. Zápotočný J. : Určenie kvalitatívnych a kvantitatívnych charakteristík deponovaných povlakov v systéme "Povlak–Bok zuba" z tribologického hľadiska / Zápotočný J. // [Disertačná práca] Bratislava, 2014, 94p.

Надійшло (received) 23.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Тверді тонкі покриття та їх застосування у нестандартних передачах C60E / М. Бошански // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 16–19. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0791.

Твердые тонкие покрытия и их применение в нестандартных передачах C60E / М. Вошанскý // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 16–19. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0791.

Hard thin coatings and their applications on C60E non-standard gears / М. Bošanský // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 16–19. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0791.

Мірослав Бошански – професор, доктор філософії, професор інституту транспортних технологій та машинобудування, факультет інженерної механіки словацького технологічного університету в Братиславі, Словаччина; e-mail: miroslav.bosansky@stuba.sk

Мірослав Бошански – профессор, доктор философии, профессор института транспортных технологий и машиностроения, факультет инженерной механики словацкого технологического университета в Братиславе, Словакия; e-mail: miroslav.bosansky@stuba.sk

Miroslav Bošanský – Prof. Ing., Ph. D., professor at The Institute of Transport Technology and Designing, Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia; e-mail: miroslav.bosansky@stuba.sk

УДК 621.01:621.913:621.633

Б. С. ВОРОНЦОВ, А. В. КРИВОШЕЯ, В. Е. МЕЛЬНИК, Т. Е. ТРЕТЬЯК

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗАДАНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИИ

У статті представлені особливості та основні завдання які необхідно вирішувати при теоретичному і технологічному синтезі зубчастих передач. При вирішенні цих завдань доводиться коригувати поверхню зубчастих вінців при призначенні її конструкторської, технологічної та експлуатаційної модифікації і багаторазово вирішувати пряму і обернену задачі формоутворення, а також визначати параметри відносної установки і відносного руху вихідного інструментального тіла. Показано, що існуючі інформаційні технології синтезу зубчастих передач не в повній мірі задовольняють виробництво при наскрізній підтримки на всіх етапах життєвого циклу передач. Запропоновано при чисельному вирішенні питань теоретичного і технологічного синтезу зубчастих передач використовувати сплайн-інтерполяцію сплайновими кривими Безьє 3-го порядку. Наведено приклад інтерполяції чисельно заданих поверхонь зубчастих вінців.

Ключові слова: сплайн, зубчасті передачі, інтерполяція, формоутворення.

В статье представлены особенности и основные задачи которые необходимо решать при теоретическом и технологическом синтезе зубчатых передач. При решении этих задач приходится корректировать поверхность зубчатых венцов при назначении ее конструкторской, технологической и эксплуатационной модификации и многократно решать прямую и обратную задачи формообразования, а также определять параметры относительной установки и относительного движения исходного инструментального тела. Показано, что существующие информационные технологии синтеза зубчатых передач не в полной мере удовлетворяют производство при сквозной поддержки на всех этапах жизненного цикла передачи. Предложено при численном решении вопросов теоретического и технологического синтеза зубчатых передач использовать сплайн-интерполяцию сплайновыми кривыми Безье 3-го порядка. Приведен пример интерполяции численно заданных поверхностей зубчатых венцов.

Ключевые слова: сплайн, зубчатые передачи, интерполяция, формообразования.

The article presents the features and main tasks that need to be addressed at the theoretical and technological synthesis of gears. When solving these problems, it is necessary to correct the surface of the gear rims when defining its design, technological and operational modification and repeatedly solve the direct and inverse problems of shaping, as well as determine the parameters of the relative setting and the relative motion of the original body of the tool. It is shown that the existing information technologies for the synthesis of gears do not fully satisfy production using end-to-end support at all stages of the transmission life cycle. It was proposed to use the spline interpolation with spline Bezier curves of the third order when solving numerically the problems of theoretical and technological synthesis of gears. An example of interpolation of numerically given surfaces of toothed rims is given.

Keywords: spline, gearing, interpolation, shaping.

Постановка проблеми. В настоящее время в отечественной промышленности распространяются новые информационные технологии сквозной поддержки сложной наукоемкой продукции на всех этапах ее жизненного цикла, в т.ч. на этапах проектирования и производства [1, 2].

Эти информационные технологии позволяют существенно снизить трудоемкость проектирования и производства сложных механизмов и повысить производительность труда на многих этапах жизненного цикла, как минимум, на 30% [1].

В то же время, эти информационные технологии сквозной поддержки этапов жизненного цикла продукции можно использовать не только для повышения эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности предприятия, но и для совершенствования известных и создания новых механизмов [3].

В данной статье мы представляем особенности совершенствования математических моделей задания, а

также теоретического и технологического формообразования зубчатых передач для информационных технологий поддержки этапов их проектирования и изготовления, как одной из массовых и наиболее сложных высших кинематических пар.

Многообразие различных классов, типов и видов зубчатых передач, расширение сфер применения и предназначения, необходимость повышения функциональных, эксплуатационных, энергетических, экономических, экологических (шум и вибрации) и массогабаритных показателей требует более совершенных подходов к разработке математических моделей для информационных технологий поддержки этапов их жизненного цикла в том числе этапов проектирования и изготовления, что является актуальной задачей отечественного машиностроения.

Формулировка цели статьи (постановка задачи). Целью данной статьи является совершенствование математических моделей задания, а также теоретического и технологического формообразования зубча-