



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY



Mérnöki Szimpózium a Bánkiban
(ESB 2025)



Duplex bevonatrendszerek adhéziós tulajdonságainak vizsgálata Daimler-Benz eljárással

Investigation of the adhesion properties of duplex coating systems using the Daimler-Benz method

¹Varga Viktória Annamária, ²Horváth Richárd

¹Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,
varga.viktoria16@stud.uni-obuda.hu

²Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Kari Kutatásszervező
Központ, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

Jelen tanulmány nemesített 42CrMo4 szerkezeti acélra felvitt duplex bevonatrendszerek vizsgálatával foglalkozik. A vizsgált mintadarabokat háromféle felületkezelés jellemzi: nitridálás nélküli alapfelület, nitridált felület, valamint olyan nitridált felület, ahol az ún. „fehér réteg” eltávolításra került. Ezen mintákra szilíciummal, oxigénnel és hidrogénnel dópolt amorf szén DLC bevonat került, hibrid PACVD+PVD technológiával. Adhéziós tulajdonságaik megállapítása és összehasonlítása Daimler-Benz eljárással történt. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a nitridálás alkalmas a tapadás javítására, továbbá a fehér réteg eltávolítása kedvezően hat az adhézióra.

Kulcsszavak: DLC bevonat, duplex rendszerek, adhézió

Abstract

This study deals with the examination of duplex coating systems applied to refined 42CrMo4 structural steel. The examined samples are characterized by three types of surface treatment: base surface without nitriding, nitrided surface, and nitrided surface where the so-called "white layer" has been removed. An amorphous carbon DLC coating doped with silicon, oxygen, and hydrogen was applied to these samples using hybrid PACVD+PVD technology. Their adhesion properties were determined and compared using the Daimler-Benz method. Based on the results, it can be concluded that nitriding is suitable for improving adhesion, and that the removal of the white layer has a positive effect on adhesion.

Keywords: DLC coating, duplex systems, adhesion

1 Bevezetés

A XXI. század elejétől kezdődően ugrásszerűen megnövekedett a különféle bevonatok alkalmazása. Különösen jelentős figyelmet kaptak a gyémántszerű szén (DLC – Diamond-Like Carbon) bevonatok, amelyek napjainkban széles körben elterjedtek különböző ipari alkalmazásokban és a tudományos munkákban egyaránt [1]–[5]. Ezen bevonatok népszerűsége elsősorban kiváló tribológiai és mechanikai tulajdonságaiknak tulajdonítható. A DLC rétegek jellemzői – mint például keménység, kopásállóság és kémiai stabilitás – a hidrogéntartalom, az

sp^2/sp^3 hibridkötések arányának módosításával, illetve különféle elem(ek) dópolásával az adott alkalmazási környezet követelményeihez igazíthatók [6].

Az önmagában alkalmazott DLC bevonatok esetén a bevonat és az alapszerkezet közötti magas szintű nyomófeszültség, valamint az alacsony adhéziós szilárdság jelentős problémát okozhat [7]. A DLC kedvező tulajdonságainak hatékony kihasználásához ezért szükséges a bevonat és az alapszerkezet közé egy vagy több átmeneti réteg beiktatása. Ezek az intermedier rétegek mérséklék az eltérő mechanikai jellemzőkből fakadó feszültségkoncentrációt, elősegítik a tapadás javítását, és hozzájárulnak a repedésterjedés megakadályozásához. Az ilyen többrétegű, komplex rendszereket duplex bevonatoknak nevezzük.

Jelen tanulmány duplex rendszerekkel foglalkozik, háromféle felületkezelés vizsgálata révén. A nitridálás növeli az alapanyag felületének keménységét, ezáltal átmeneti zónát hoz létre a bevonat és a szubsztrát között, így javítva az adhéziót. Ezen felül olyan minták vizsgálata is megtörtént, melyek felületéről a nitridálás során kialakult ún. „fehér réteg” eltávolításra került. A fehér réteg (más néven vegyületi réteg) a nitridált zóna felső rétege, mely egy magas keménységű, nagyjából 10 μm vastagságú kerámia réteg; elnevezése onnan ered, hogy maratás után mikroszkópos vizsgálat során fehér színt mutat. A kutatás során a fehér réteg adhézióra gyakorolt hatása is megállapításra került. Annak érdekében, hogy a nitridálás hatása megállapítható legyen, olyan minták vizsgálata is megvalósult, amelyek esetében a bevonat közvetlenül az alapfémre került felvitelre. Összefoglalva, a mintadarabok alapfelületei a következők voltak: nitridálás nélküli alapfelület, nitridált felület a fehér réteg meghagyásával és nitridált felület, de a fehér réteg eltávolításával. Mindhárom típusú mintára szilíciummal, oxigénnel és hidrogénnel dópoltt amorf szén (a-C:Si:O:H) DLC bevonat került.

2 Anyagok és módszerek

2.1 Alapanyag ismertetése

A kutatásban vizsgált DLC bevonat 42CrMo4 (1.7225) acél próbatesteken került alkalmazásra. Ennek elsődleges indoka, hogy a 42CrMo4 jó megmunkálhatósággal és könnyű előkészíthetőséggel rendelkezik.

A 42CrMo4 króm–molibdén ötvözéssel készült, nemesíthető szerkezeti acél, melyet széles körben alkalmaznak például a gépiparban és a járműgyártásban, ahol a fokozott szilárdság, a szívósság és a dinamikus igénybevételekkel szembeni ellenállás alapvető követelmény. Ugyanakkor nagy terhelés és erősen abrazív környezet esetén a kifáradással és a kopással szembeni ellenállása gyakran korlátozott. Jelentős üzemi terhelések mellett a károsodási folyamatok gyakorlatilag elkerülhetetlenek, amennyiben nem történik célzott hőkezelési eljárás, amely által az acél mikroszerkezete és felületi tulajdonságai optimalizálhatók [8].

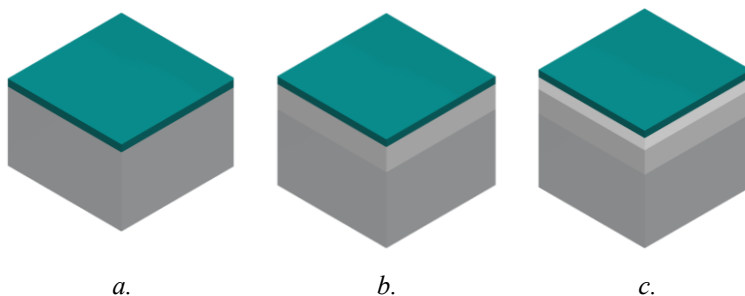
A kutatás során használt 42CrMo4 acél tömegszázalékos összetételét az 1. táblázat ismerteti.

1. táblázat 42CrMo4 m/m%-os összetétele

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,43	0,87	0,29	0,009	0,01	1,11	0,11	0,23	0,26	0,025

2.2 Alkalmazott felületkezelés

A kutatás során háromféle felületre került felvitelre a bevonat: nitridálás nélkül az alapfémre (1. ábra, a. rész), nitridált felületre, de a fehér réteg eltávolítását követően (1. ábra, b. rész), valamint a nitridálás során kialakult fehér réteg meghagyásával kialakult felületre (1. ábra, c. rész).



1. ábra A háromféle felület

A mintadarabok nitridálása sófürdős karbonitridálással valósult meg, 590°C-on 90 perc alatt. A fehér réteg eltávolítása üveggyöngyszórás és maratás háromszori ismétlésével történt.

2.3 Bevonat ismertetése

A kutatás során szilíciummal, oxigénnel és hidrogénnel dópolt amorf szén (a-C:Si:O:H) bevonat vizsgálata valósult meg. A hidrogén jelenléte mérsékli a surlódási tényezőt, amorf szén DLC bevonatok esetében növeli a keménységet. A Si és O dópolás rendkívül hidrofób bevonatot eredményez, azonban fontos kiemelni, hogy bizonyos tulajdonságok javítása gyakran más tulajdonságok romlásához vezet. A hidrofób bevonatok például alacsonyabb kopásállósággal rendelkeznek [9].

A bevonat felvitele hibrid PVD+PACVD technológiával történt. A hibrid technológia során a kétféle leválasztási eljárás egy vákuumkamrán belül szinkron működtetésben zajlik. Ilyen módon kiváló felületi minőségű, kopásálló és alacsony súrlódású bevonatok állíthatók elő.

3 Daimler-Benz eljárás eredményei

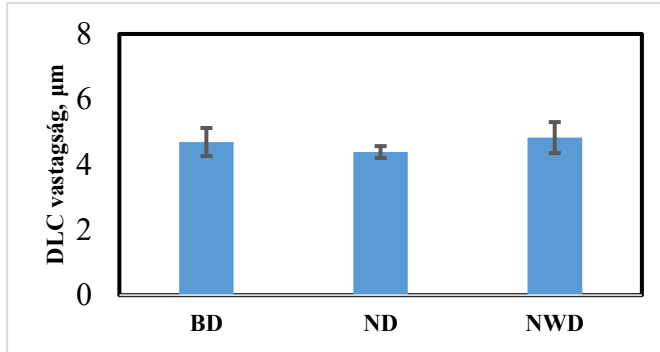
A vizsgálat célja annak meghatározása, hogy a nitridálás, illetve a fehér réteg jelenléte miként befolyásolja a bevonat és az alapanyag között fellépő adhéziót. A Daimler-Benz eljárást megelőző vizsgálat a calotest volt, mely elvégzése azért indokolt, mert a bevonatok tulajdonságait jelentősen befolyásolja azok vastagsága.

3.1 Calotest

A calotest, vagy gömbsüveg koptató eljárás a bevonatok rétegvastagságának meghatározására szolgál. Egy forgó kerámia- vagy acélgolyó gyémántszemcséket tartalmazó koptató paszta adagolásával – lokális abrázio által – lenyomatot képez a bevonat felületén, mely lenyomaton koncentrikus körökként kirajzolódik mikroszkóp alatt a bevonat és a szubsztrát. A körök átmérőjéből kiszámítható a bevonat vastagsága.

2. táblázat Calotest eredmények

Mintadarab	Átlag	Szórás
BD	4,69	0,43
ND	4,38	0,18
NWD	4,83	0,47

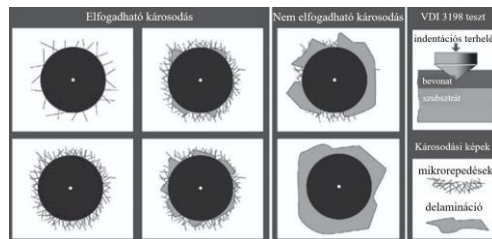


2. ábra Calotest eredmények oszlopdiagramon, BD – nitridálás nélküli alappfelület, ND – nitridált felület, NWD – nitridált felület a fehér réteg meghagyásával

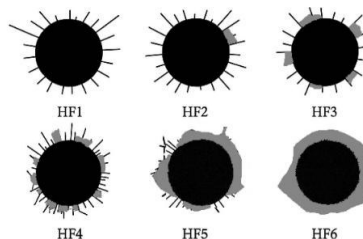
A vizsgált minták bevonatvastagsága három calotest átlagából lett megállapítva, a mért eredmények pedig közel azonos vastagságokat (4–5 μm) mutattak, mely értékek megfelelnek az általános DLC bevonatvastagságnak. A mért eredményeket a 2. táblázat és a 2. ábra ismerteti.

3.2 Daimler-Benz eljárás

A Daimler-Benz eljárás egy roncsolásos anyagvizsgálat, mely kiértékelése szemrevételezéses módszerrel történik, ezen okból kifolyólag alkalmas a vizsgált anyagok gyorsminősítésére. Az eljárás során Rockwell-C típusú indenterrel lenyomatot képzünk a minta felületén 1471 N (150 kg) nagyságú terheléssel; a lenyomat körül kialakult károsodási képek vizsgálatával minősíthető a bevonat adhéziós viselkedése [10]. Ezen felül megállapítható az indentációs mélység illetve az ún. „pile-up” és „sink-in” jelenség. A bevonatokon keletkezett károsodások a VDI 3198 (3. ábra a. rész) és a DIN 4856 (3. ábra b. rész) szabványban rögzített etalon képek használatával lettek kiértékelve [11][12].



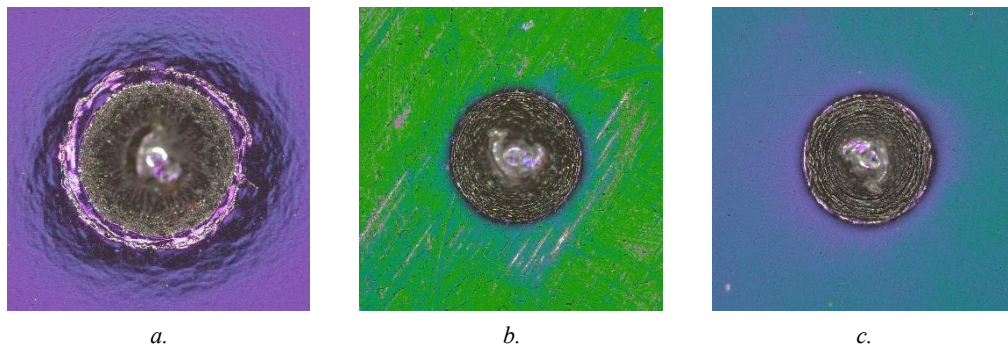
a.



b.

3. ábra VDI 3198 (a.) és DIN 4856 (b.) szabvány [11][12]

A VDI 3198 kiértékelést segítő táblázatának bal oldalán az elfogadható, jobb oldalán pedig a nem elfogadható károsodási képek láthatók, a DIN 4856 szabvány HF1–HF6 jelölésű minősítéseket tartalmaz; a HF1–HF4 képek jellemzik az elfogadható károsodást.



4. ábra BD (a.) ND (b.) és NWD (c.) mintákon létrehozott lenyomatok károsodása

Az eredmények alapján az a következtetés vonható le, hogy a DLC bevonat nitridálás nélkül gyenge adhéziót mutat, illetve nitridálás után a fehér réteg eltávolítása adhézió szempontjából kedvező, ugyanis ebben az esetben nem volt tapasztalható károsodás. A nitridálás nélküli mintákon továbbá a delamináción kívül megfigyelhető az ún. „pile-up” jelenség, mely a másik két minta esetében nem jellemző. Szemrevételezéses módszerrel a szabványban meghatározott etalon képek használatával az alábbi megállapítások tehetők:

- a nitridálás nélkül gyártott mintadarabok lenyomatai HF5/HF6 minősítésűek, nem elfogadható a károsodás
- a nitridált, fehér réteg nélküli mintákon nem tapasztalható károsodás
- a fehér réteg meghagyásával gyártott minták lenyomatai HF1 minősítésűek, elfogadható a károsodás.

A vizsgálat során megállapítható, hogy szükséges a DLC bevonat felvitele előtt az alapanyag felületkezelése, erre megfelelő módszer a nitridálás, illetve a fehér réteg eltávolítása kedvezően hat a bevonat adhéziójára.

4 Konklúzió

A kutatás a DLC bevonatok adhéziójának vizsgálatára terjedt ki, mely során megállapíthatóvá vált, hogy a felületkezelés elengedhetetlen a DLC bevonatok felvitele előtt, ugyanis közvetlenül az alapanyagra felvitt bevonatok tapadása nem megfelelő. A nitridálás alkalmas az adhézió növelésére, ezen felül a fehér réteg eltávolítása tovább javítja a tapadást.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Széll Attilának (TS Hungary Kft.) a mintadarabok nitridálásáért és a bevonat felviteléért.

A 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00019-A-69 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP Egyetemi kutatói ösztöndíj program finanszírozásában valósult meg.



5 Hivatkozások

- [1] Johnston, S. V., & Hainsworth, S. V. (2005). Effect of DLC coatings on wear in automotive applications. *Surface engineering*, 21(1), 67-71.
- [2] Sundaram, V. S. (2006). Diamond like carbon film as a protective coating for high strength steel and titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2707-2711.
- [3] Studeny, Z., Pokorny, Z., Dobrocky, D., Joska, Z., & Prochazka, J. (2020). Tribological properties of DLC coating for parts of weapons. *ECS Transactions*, 99(1), 297.
- [4] Shah, R., Pai, N., Khandekar, R., Aslam, R., Wang, Q., Yan, Z., & Rosenkranz, A. (2024). DLC coatings in biomedical applications—Review on current advantages, existing challenges, and future directions. *Surface and Coatings Technology*, 131006.
- [5] Rajak, D. K., Kumar, A., Behera, A., & Menezes, P. L. (2021). Diamond-like carbon (DLC) coatings: classification, properties, and applications. *Applied Sciences*, 11(10), 4445.
- [6] Bernhardt, F., Georgiadis, K., Dolle, L., Dambon, O., & Klocke, F. (2013). Development of a ta-C diamond-like carbon (DLC) coating by magnetron sputtering for use in precision glass molding. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 44(8), 661-666.
- [7] Wang, L., Liu, Y., Chen, H., & Wang, M. (2022). Modification methods of diamond like carbon coating and the performance in machining applications: A review. *Coatings*, 12(2), 224.
- [8] Saoudi, A., Boulahrouz, S., Aissani, L., Chahaoui, O., Kouba, R., Chala, A., & Rahman, M. M. (2025). Characterization of fracture and impact behavior of plasma nitrided 42CrMo4 steel: structural and mechanical properties. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 29, e20240468.
- [9] Bewilogua, K., Bialuch, I., Brand, J., Keunecke, M., Ruske, H., Thomsen, H., ... & Wittorf, R. (2006). DLC based coatings for tribological applications. In *International Workshop on Application of Nanocrystalline Diamond Like Carbon Materials (IWAncDLC) Kolkata*.
- [10] ISO 6508-1:2023 Metallic materials — Rockwell hardness test – Part 1: Test method
- [11] Zong, X., Jiang, W., & Fan, Z. (2018). Characteristics and wear performance of borided AISI 440C martensitic stainless steel. *Materials Express*, 8(6), 500-510.
- [12] DIN 4856; Carbon-Based Films and Other Hard Coatings—Rockwell Penetration Test to Evaluate the Adhesion. Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany, 2018.