

## Az X40CrMoV5-1 jelű acél kopási viselkedése különböző felületkezelések hatására

### The abrasion behaviour of X40CrMoV5-1 steel under various surface treatments

Tóth László,<sup>1</sup> Kovács Tünde,<sup>2</sup> Nyikes Zoltán,<sup>3</sup> Umesh Mhatre<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, [toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu](mailto:toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, [kovacs.tunde@bgk.uni-buda.hu](mailto:kovacs.tunde@bgk.uni-buda.hu)

<sup>3</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, [zoltan.nyikes@bgk.uni-obuda.hu](mailto:zoltan.nyikes@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>4</sup> Surface Modification Technologies Pvt. Ltd. Research and Development La, India, Sativali Road Vasai Road- (East), Dist. Palghar, Maharashtra-401208, [umhatre@hotmail.com](mailto:umhatre@hotmail.com)

#### Abstract

For evolving a surface layer on the X40CrMoV5-1 steel, a plasma-nitridation and PVD coating process was applied. In our experiments, the samples were heat-treated (high-temperature hardening, annealed three times) and surface treatments (plasma-nitridation, PVD coating by TiAlN, duplex surface treating by plasma nitridation and after that, PVD coating TiAlN). After the heat treatments, we performed hardness tests and surface abrasion wear tests. The abrasion wear resistance of the specimens was studied in order to understand the heat treatment effects on abrasion behaviour. It was observed that the heat treatment and surface treatment process greatly influence the tool steel surface hardness and abrasion resistance behaviour. By plasma-nitridation the surface hardness doubled compared to the quenched surface hardness while the PVD coated TiAlN surface layer hardness is more than five times that of the hardened one. There was no relevant difference between the PVD coated (TiAlN) surface hardness and the duplex surface-treated hardness. On the basis of the results of the comparative abrasive wear tests, it can be concluded that the duplex surface treatment resulted in the greatest wear resistance..

**Keywords:** *tool steel, secondary hardening, austenitization, PVD coating, hardness, plasma nitriding.*

#### Összefoglalás

Az X40CrMoV5-1 jelű, melegalakító szerszámacélon plazmanitridálást és PVD-bevonatoló eljárást alkalmaztunk a felületi réteg kialakítására. Kísérleteink során a mintáinkon hőkezeléseket (magas hőmérsékletű edzés, háromszoros megeresztés), illetve felületkezeléseket végeztünk el (plazmanitridálás, PVD-bevonatolás TiAlN, duplex kezelés plazmanitridálás és PVD-bevonatolás TiAlN). A kezelések után keménységvizsgálatokat és felületi kopásállósági vizsgálatokat végeztünk. Tanulmányoztuk, hogy a különböző hőkezelések után hogyan változik a vizsgálati darabok keménysége, illetve kopásállósága, és hogyan befolyásolja az acél hőkezelése a kopási tulajdonságokat. A vizsgálatok alapján kiderült, hogy a hőkezelés és felületkezelés nagymértékben befolyásolja a melegmunkaacél felületi keménységét és kopási viselkedését.

A plazmanitridálással az edzéshez képest a felületi keménység kétszeresére növekedett, míg a PVD-bevonat keménysége az edzettnek több mint ötszöröse. A PVD (TiAlN) bevonat és duplex bevonat keménysége nem mutatott releváns különbséget. Az összehasonlító kopásvizsgálatok eredményeként a duplex felületkezelés mutatta a legnagyobb kopásállóságot.

**Kulcsszavak:** *szerszámacél, szekunder keményedés, PVD-bevonatolás, keménység, plazmanitridálás.*

## 1. Bevezetés

A megalakító szerszámacélokra jellemző, hogy sokszor egymással szembenálló követelményeknek kell egyszerre megfelelniük, vagyis hogy különböző igénybevételek együttes hatása mellett is alkalmazni lehessen azokat. Ilyen igénybevételek a kopás, a nagy hőmérséklet, a hőingadozás, a dinamikus igénybevételek, a húzó-nyomó, hajlító és nyíró igénybevételek. Ebből következik, hogy a megalakító szerszámacélok alapvető tulajdonságai a melegszilárdság, keménység, kopásállóság, szívósság, megeresztésállóság, termikus fáradással szembeni ellenállás, megalakíthatóság, forgácsolhatóság.

Ezen tulajdonságokat részben ötvözésükkel, részben az alkalmazott hőkezeléssel érhetjük el. Felhasználásuktól függően vannak esetek, amikor egyszerre van szükség az anyag szívósságára és kopásállóságára. Ilyen esetekben felületkezelő eljárásokat alkalmaznak. A kopással szembeni ellenállást, a munkadarab megfelelő szilárdságát és szívósságát egyszerre úgy lehet biztosítani, hogy a kopásnak kitett felületen egy vékony kopásálló réteget hozunk létre. Ez többféleképpen lehetséges.

Az X40CrMoV5-1 jelű acél a megalakító szerszámacélok családjába tartozik, mely a szerszámgyártók körében EN 1.2344 anyagszámon ismert. Az anyagnak nagyon jó a melegszilárdsága és a meleg-kopásállósága [1, 2]. Ezek az acélok üzemelésük során megtartják tulajdonságaikat a tartósan 200 °C feletti hőmérsékleten is, ami az anyag vegyi összetételén kívül a megfelelő hőkezelési technológiának köszönhető. A felületi kopásállóság növelését egy vékony kopásálló és megeresztésálló réteg létrehozásával lehet elérni [3, 4]. Ezt a megalakító szerszámacéloknál nitridálással vagy/és felületbevonatolással érhetjük el.

A plazmanitridálást az 1920-as években vezették be, azonban ipari alkalmazással csak az elmúlt harminc évben vált. A plazmanitridálás a termokémiai felületkezelési eljárások körébe tartozik, melyet 350–600 °C hőmérséklet-tartományban végeznek. Az anódként szolgáló kemencefal előtt pozitív töltésű ionok ütköznek – nagy becsapódási sebességgel – a katódként kapcsolt munkadaraboknak. Ez az ionzápor először egy nagyon intenzív felülettisztítást eredményez, majd felhevíti és nitridálja a munkadarab felületét [5]. A plazmanitridálás végezhető egyenáramú és pulzált plazmában egyaránt. A plazmanitridálás vákuumkémencében (200–500 Pa nyomáson), ionizált gáz atmoszférában (ammónia, nitrogén, metán vagy

hidrogén) történik, de kopásállóbb felületi rétegek kialakításához gázkeveréket is használnak. A hőkezelés minőségét a gáz összetétele, a nyomás, a hőmérséklet és a művelet időtartama határozza meg.

A nitridált kéreg felső része (anyagtól függően max. 30 µm vastag) kemény és vegyileg stabil réteg, alatta pedig a diffúziós zóna helyezkedik el, amely max. 1 mm vastag lehet. Megalakító szerszámacél esetében plazmanitridálással 850–950 HV felületi keménységet is el lehet érni 0,4 mm mélységig. Az eljárással javíthatók az anyagok kopási és csúszási tulajdonságai, s korrózióálló réteg hozható létre. A vetemedés igen csekély. Általában csak kész alkatrészekben végeznek plazmanitridálást, mert a hőkezelést követően nincs szükség semmilyen utómegmunkálásra.

A nitridált munkadarabok méretei a kéregvastagság ~1%-ával növekednek, amely jelentéktelen változás. Ez az eljárás lehetővé teszi a folyamat pontos ellenőrzését, szabályozását, a nitridált réteg mikroszerkezetének pontos beállítását és ezáltal a kívánt tulajdonságok elérését. A PVD-felületkezelés fizikai gőzfázisú bevonatolás (physical vapour deposition), melynek során a bevonatot képező anyagot atomos, vegyületi vagy ionos formában viszik fel a bevonatoló alkatrész felületére. A PVD-eljárások viszonylag kis hőmérsékleten mennek végbe, ami azt jelenti, hogy az eljárás nem módosítja a réteg alatti hordozóanyag szövetszerkezetét és nincs allotróp átalakulás, tehát a felületkezelt szerszám nem szenved méretváltozást.

A PVD-bevonattal a szerszám felületén jó siklási tulajdonságot, nagy kopásállóságot és nagy felületi keménységet érhetünk el. Az elvégzett felületkezelések célja főleg a szerszám kopásállóságának a növelése volt. A kopás mikroszintű kölcsönhatások összetett rendszere, amely egymáson elcsúszó felületek között jön létre. Ezen kölcsönhatások függenek az érintkező felületek anyagától, fizikai, kémiai, mechanikai jellemzőitől és viselkedésétől, geometriájától, valamint a külső körülményektől, melyek hatással vannak a kopásra (pl. hőmérséklet) [6–7].

A kopási folyamatok vizsgálata csak pontosan definiált kopási rendszerben történhet, összehasonlításra azok a mért eredmények alkalmasak, melyeket hasonló tribológiai rendszerben határoztak meg, és ahol csak a vizsgált paraméter változik, a többi paraméter változása minimalizált [8–9]. A szerszám kopásállóságát nem könnyű előre jelezni. Az iparban sok helyen a keménységmérést használják erre a célra, hiszen a kopásáll-

lóság és a keménység között bizonyos korreláció létezik. Hasonlóképpen elterjedtek az összehasonlító kísérleti módszerek, pl. a golyó/sík kopás-teszt [10–12]. A méréseink során összehasonlító eljárással vizsgáltuk a különböző hőkezelésű és felületkezelésű próbatestek kopással szembeni ellenállását, összehasonlítva ezek keménységi értékeivel is.

## 2. Vizsgálati anyagok és technológiák

A vizsgált, X40CrMoV5-1 minőségű acélmintadarakok vegyi összetétele az 1. táblázatban látható.

**1. táblázat.** A vizsgálati anyag kémiai összetétele spektrométeres mérés alapján (tömeg %-ban)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,40	1,10	0,45	5,25	1,41	1,2

A minták ausztenítését egy VFC típusú, 300×370×200 mm méretű Ipsen-vákuumkemocében végeztük, kétlépcsős hevítéssel (650 °C, illetve 850 °C), 1050 °C-on. Az edzést 6 bar nyomású nitrogéngázzal végeztük. Az edzést háromszoros, nagy hőmérsékletű megeresztés követte (1. ábra).

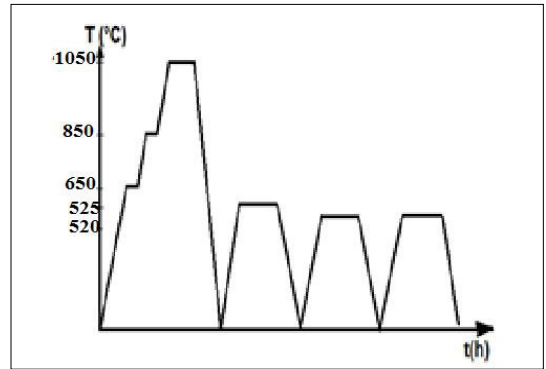
A megeresztéseket egy 300×370×350 mm-es méretű Muehl-kemocében, argon védőgáz alatt végeztük, 2 órás hűn tartásokkal.

Minden edzési és megeresztési művelet után Vickers-keménységmérést végeztünk a szokásos gyakorlat szerint [13–14], egy Buhler 1105 típusú gépen. Ezután a 2-es és 4-es mintákon plazmanitridálást hajtottunk végre. A tisztítást hidrogén (40 L/h), argon (5 L/h) és nitrogén (1 L/h) védőgáz keverékben végeztük. Ezután 480 °C-on 24 órás nitridálás történt hidrogén (120 L/h) és nitrogén (40 L/h) gáz keverékben. Hűtés után Vickers-keménységmérés következett. A 3-as és 4-es mintákon TiAlN PVD-bevonatolási eljárást végeztünk, amit szintén Vickers keménységmérés követett.

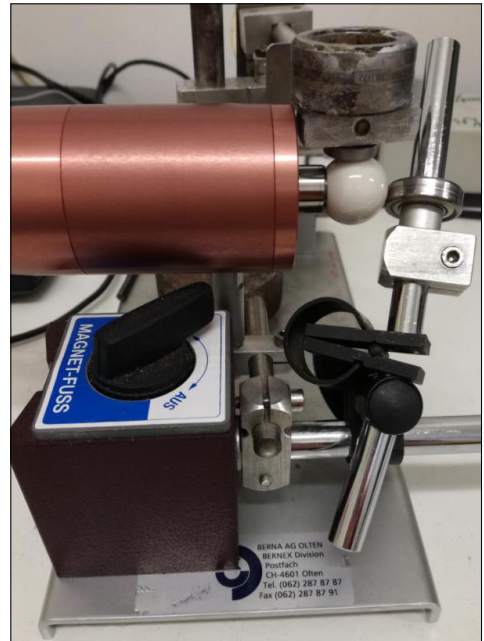
A végső vizsgálat mind a négy próba esetében a kopásvizsgálat volt. Kopásvizsgálathoz golyós koptatóberendezést használtunk (2. ábra). Kopásvizsgálat előtt érdességmérést végeztünk a 3. ábrán látható érdességmérő berendezéssel. A koptatógolyó 20 mm-es átmérőjű, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alapú, polírozott felületű keramiagolyó volt. Kopási mérőszámként a kopási tényezőt ( $K$ ) használtuk (1), mely a kopási térfogatból ( $V_V$ ), a kopási úthosszból ( $S$ ) és a terhelőerőből ( $N$ ) számolható.

$$K = \frac{V_V}{S \cdot N}, \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right) \quad (1)$$

A kopási térfogat a kopásnyom átmérőjéből ( $d$ ) és a gömbsüveg mélységéből ( $h$ ) számolható (2):



**1. ábra.** Az X40CrMoV5-1 acél hőkezelési ciklusa



**2. ábra.** A kopásvizsgáló berendezés



**3. ábra.** A Mahr-típusú, metszettapintós érdességmérő berendezés képe

$$V_v = \frac{h\pi}{6} \left( \frac{3}{4}d^2 + h^2 \right), (mm^3) \quad (2)$$

A koptatott göombsüveg mélysége a koptatógolyó  $R$  sugarából és a kopási lenyomat átmérőjéből ( $d = 2R$ ) egyszerűen összefüggéssel számolható (3).

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, (mm) \quad (3)$$

A kopási úthossz ( $S$ ) a koptatási időtől ( $t$ ), a koptatógömb sugarától és annak fordulatszámától ( $n$ ) függ (4):

$$S = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot t, (m) \quad (4)$$

A szakirodalmi adatokkal való összehasonlíthatóság érdekében a fordulatszámot 570 fordulat/percre állítottuk, a koptatóvizsgálat 5 percig tartott.

### 3. Vizsgálati eredmények

A vizsgálni kívánt, X40CrMoV5-1 minőségű szerzszámacél keménysége szállítási állapotban átlagosan 215 HV.

#### 3.1. A hőkezelések hatásai (2. táblázat)

A próbatesteken 1050 °C-ról történt edzés és 520 °C-on történt háromszoros megeresztés után 549 HV keménységet mértünk. A 2-es és 4-es mintadarabon a plazmanitridálás utáni keménység 1140 HV lett. A 3-as minta, mely vákuumos edzés után TiAlN-bevonatot kapott, 2938 HV felületi keménységű lett. A 4-es minta plazmanitridálás után még TiAlN-bevonatolás alá esett, vagyis kettős felületkezelést kapott, így felületi keménysége 2539 HV lett.

#### 2. táblázat. A hőkezelések utáni keménységi értékek

Minta	Hőkezelés	Bevonat vastagság (μm)	Keménység
1	Edzett + megeresztett	0	549 HV
2	Edzett + megeresztett + plazmanitridált	0	1140 HV
3	Edzett + megeresztett + TiAlN-bevonat	2,05	2938 HV
4	Edzett + megeresztett + plazmanitridált + TiAlN-bevonat	1,93	2539 HV

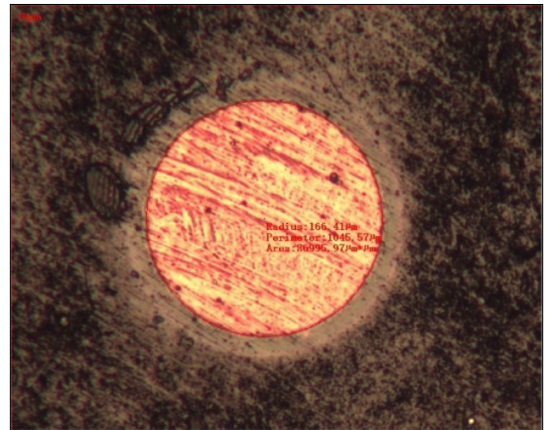
### 3.2. A kopásvizsgálatok eredményei

Az érdességmérések és az (1) képlet alapján kiszámolt kopási tényezőt a 3. táblázat mutatja:

#### 3. táblázat. Az érdességi és kopási tényező értékei

Minta	Hőkezelés	Ra (μm)	Kopási tényező (mm <sup>3</sup> /(N·m))
1	Edzett + megeresztett	0,010	$6,32 \times 10^{-9}$
2	Edzett + megeresztett + plazmanitridált	0,057	$1,95 \times 10^{-9}$
3	Edzett + megeresztett + TiAlN-bevonat	0,233	$8,46 \times 10^{-10}$
4	Edzett + megeresztett + plazmanitridált + TiAlN-bevonat	0,177	$7,57 \times 10^{-10}$

A koptatások elvégzése után a koptatott kráterek átmérőit Neophot-2 típusú fémmikroszkóppal mértük meg (4. ábra).



4. ábra. 3-as minta kopási lenyomata; a kör sugara 166 mikrométer

### 4. Következtetések

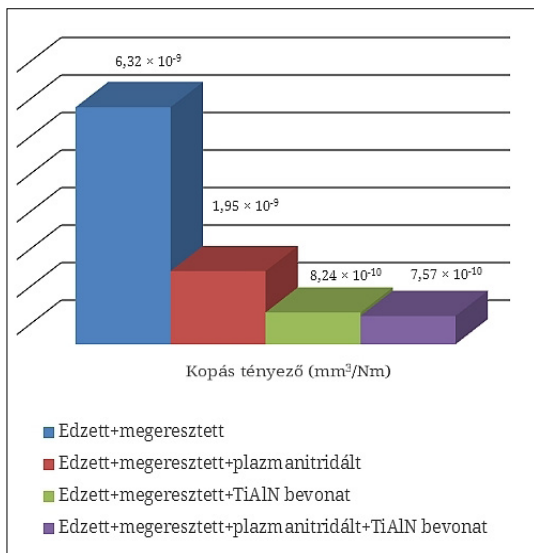
A vizsgált, X40CrMoV5-1 minőségű acélmintadarabok különböző hőkezelési, illetve felületkezelési eljárások alkalmazása hatására az 5. ábrába foglalt kopási tulajdonságok alakultak ki.

Az eredmények alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

I. A TiAlN alapú PVD-bevonat mutatta a legnagyobb kopásállóságot az alkalmazott kísérleti módszerek és paraméterek alapján.

II. A plazmanitridált, illetve PVD-bevonatolt felületű próbatest keménysége és kopási tényezője





5. ábra. Mérési eredmények: a hőkezelés és felületkezelés hatása az acél kopásállóságára

is jóval kedvezőbb tulajdonságokat eredményezett, mint a csak edzett és megeresztett hagyományos hőkezelésű felület.

III. A plazmanitridált és PVD-bevonatú felület, mindamelllett, hogy kisebb keménységű, mint az edzett + megeresztett és PVD-bevonatú felület, jobb kopásállóságot eredményezett. Viszont, hogy ez az eredmény pontosan értékelhető legyen, fontos lenne mindkét próbatest felületi érdességének az azonossága.

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton kívánnak köszönetet mondani a magyar államnak és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a 2019-2.1.11-TÉT-2019-00093. számú pályázat keretében nyújtott támogatásért.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Takács L.: *Szerszámacél ismertető – RIGOR hidegmunkaacél*. Uddeholm <https://adoc.tips/szerszamacel-ismerteto-rigor-hidegmunkaacel-whenever-tools-a.html>
- [2] Borbély G.: *Szerszámacélok, nemesacélok*. Böhler Kereskedelmi Kft., 2009.
- [3] Bitay E.: *Bevonatolt gyorsacélok kopásállósága/ Coated HS steels wear resistance*. In: XVIII. FMTÜ, EME, Kolozsvár, 2013. 73–76. <https://doi.org/10.36243/fmtu-2013.10>

- [4] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Felületkezelés*. Műszaki Tudományos Füzetek 5., EME, Kolozsvár, 2009. <https://doi.org/10.36242/mtf-05>
- [5] Bagyinszky Gy., Bitay E.: *Kopásálló felületkezelte rétegek minősítése/Characterization of surface treated, wear resistant layers*. In: XIV. FMTÜ, Kolozsvár, 2009. 13–16. <https://doi.org/10.36243/fmtu-2009.08>
- [6] Tóth L.: *Examination of the Properties and Structure of Tool Steel EN 1.2379 Due to Different Heat Treatments*. European Journal of Materials Science and Engineering, 3/3. (2018) 165–170. [http://ejmse.tuiasi.ro/articles/EJMSE\\_03\\_03\\_06\\_Toth.pdf](http://ejmse.tuiasi.ro/articles/EJMSE_03_03_06_Toth.pdf)
- [7] Sebestyén A., Nagyné Halász E., Bagyinszky Gy., Bitay E.: *Felületmódosítási eljárások hatása acélok kopásállóságára*. In: XII. FMTÜ, EME, Kolozsvár, 2007. 161–169. <https://doi.org/10.36243/fmtu-2007.4>
- [8] Tóth L., Haraszti F., Kovács T.: *Surface Roughness Effect in the Case of Welded Stainless Steel Corrosion Resistance*. In: Acta Materialia Transylvanica, 1/1. (2018) 53–56. <https://doi.org/10.2478/amt-2018-0017>, <https://doi.org/10.2478/amt-2018-0018>
- [9] Titu M. A., Pop A. B., Titu S., Pop G. I.: *Optimization of the objective function surface quality by end-milling dimensional machining of some aluminium alloys*. ICIR Euroinvent, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 572. (2019) <https://doi.org/10.1088/1757-899x/572/1/012042>
- [10] Stescu C., Chicet D., Munteanu C., Croitoru C., Cârlescu V.: *Machining of thermal sprayed coatings a case study for self fluxing powder*. ICIR Euroinvent, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 572. (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899x/572/1/012051>
- [11] Sandu A. V., Baltatu M. S., Nabialek M., Savin A., Vizureanu P.: *Characterization and Mechanical Properties of New TiMo Alloys for Medical Applications*. Materials, 12/18. (2019), Art. nr. 2973. <https://doi.org/10.3390/ma12182973>
- [12] Kovács T., Bitay E.: *The hardness control in the coated surface layer*. Materials Science Forum, 729. (2012) 415–418. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.415>.
- [13] Bitay E.: *Lézeresen kezelt felületek kopásállósága*. In: VI. FMTÜ, EME, Kolozsvár, 2001. 111–118. <https://doi.org/10.36243/fmtu-2001.23>
- [14] Kovács-Coskun T., Pinke P.: *The Effect on Microstructure on the Local Wear Behavior of Dual Phase Steels*. IOP Conference Serie: Materials Science and Engineering, 47. (2013) 012032, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/47/1/012032>.