



Szerszámacélok tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására

Effect of Heat Treatment on the Properties of Tool Steel

Tóth László

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézet, Budapest, Magyarország, toth.laszlo@bkg.uni-obuda.hu

Abstract

Tool production has deep importance for the industry. The developed tool steels are suitable for the requirements. These tool steels contain large amounts of alloying elements and carbon. The required properties are determined by the chemical composition and microstructure of the tool steel. High hardness, wear resistance, strength, toughness, and corrosion resistance can be achieved by heat treatment which can modify the microstructure. Sub-zero treatment, shallow cryogenic treatment, and deep cryogenic treatment technology, and the resulting microstructure, are given a prominent place in this paper. The review is summarized based on literature research on the experimental results of heat treatment of tool steels.

Keywords: *tool steel, heat treatment, retained austenite, high tempering temperature, cryogenic treatments.*

Összefoglalás

A szerszámgyártás kiemelt fontosságú az ipar számára. Olyan szerszámacélokat fejlesztettek, melyek a szerszámokkal szembeni követelményeket teljesítik. Kémiai összetételüket tekintve nagy mennyiségű ötvözt és korbont tartalmaznak. Az elvárt tulajdonságokat a szerszámacél vegyi összetétele és a szövetszerkezet határozza meg. Az acél mikroszerkezetét hőkezeléssel az elrendő tulajdonságoknak megfelelően lehet módosítani, ennek eredményeként nagy keménységet, kopásállóságot, szilárdságot, szívósságot és korrózióállóságot lehet elérni. A 0 °C alá hűtés (sub zero treatment), az enyhe mélyhűtés és a mélyhűtés technológiája, valamint az ezek hatására létrejövő mikroszerkezet kiemelt helyet kapott a dolgozatban. A munka irodalomkutatásra épülve számos szerszámacél hőkezelését bemutató kísérleti eredmény feldolgozásával készült összefoglaló munka.

Kulcsszavak: *szerszámacél, hőkezelés, maradék ausztenit, magas hőmérsékletű megeresztés, mélyhűtés.*

1. Bevezetés

A szerszámacélok ötvözetlen vagy ötvözött acélok, melyeket elsősorban más anyagok megmunkálására, alakítására alkalmaznak. A szerszámacélok felhasználhatóságát a tulajdonságaik határozzák meg. A szerszámacélok főbb tulajdonságai a kopásállóság, keménység, szívósság, melegszi-lárdság, korrózióállóság, polírozhatóság, nyomó-szilárdság, nitridálhatóság, bevonatolthatóság [1]. E tulajdonságokat a vegyi összetétel és a szövet-szerkezet befolyásolja. Így például a szén meg-határozza az elérhető keménységet, szilárdságot, edzhetőséget és a martenzites átalakulás kezdeti, illetve befejező hőmérsékletét [2]. A króm növeli

az átedzhetőséget, karbidképzőként a kopásál-lóságot, éltartósságot, nagyobb mennyiségben a korrózióállóságot [3]. A vanádium finomítja a primer szemcséket, ezáltal növeli a szívósságot, a ko-pásállóságot, éltartósságot és a melegszi-lárdságot és a nagy hőmérsékleti kopásállóságot. A kobalt megakadályozza a nagy hőmérsékleti szemcsenövekedést [4–6].

A szerszámacélok szerkezeti felépítése, szövet-szerkezete és szemcsemérete szintén hatással van a tulajdonságokra [7, 8], melyek függhetnek az alapanyag gyártási technológiájától, így lehet hagyományos, átolvasztott vagy porkohászati a képlekeny alakítástól, pl. melegalakítás vagy hi-

degalakítás, illetve a hőkezelésektől [9–11].

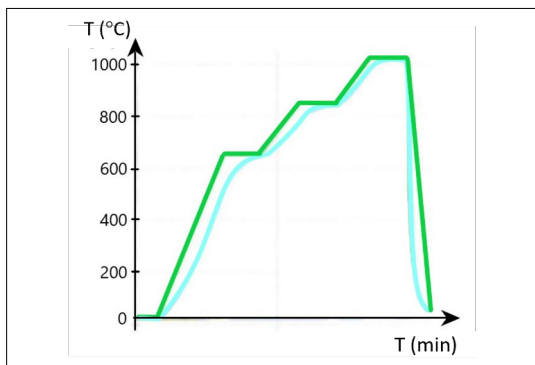
A szerszámacélokat széles körben alkalmazzák ott, ahol kopásállóságra, szilárdságra, szívósságra, illetve korrózióállóságra van szükség. A szövetszerkezet hőkezeléssel változtatható, illetve állítható be [12, 13]. A hőkezelések hevítési, hőtartási és hűtési ciklusokból állnak [14]. A feszültségcsökkentés, lágyítás, normalizálás, edzés és megeresztés a legfontosabb hőkezelések, amelyeket gyakran használunk az acél mikroszerkezetének módosítására és a kívánt mechanikai tulajdonságok elérésére [15]. Hőkezelést alkalmazhatnak gyártás előtt, gyártás közben vagy gyártás után. Például egy szerszám gyártása során a kiinduló alapanyag lágyító hőkezelésnek van alávetve a megmunkálhatóság érdekében, gyártás közben az anyagban képződött feszültségek csökkentése miatt feszültségcsökkentő hőkezelést végeznek. A kész szerszámot a kívánt keménységűre edzik, aztán megereszti, igény esetén még felületi hőkezelést vagy bevonatolást is végezhetnek [16–18].

Afelsoroltak alapján is érezhető, hogy a szerszámacélok kívánt tulajdonságai elérésének egyik fő módszere a hőkezelés lehet. Tanulmányomban a következőkben részletesebben kitérek a szerszámok munkakeménységre való optimális hőkezelési eljárásaira és a felületkezelések, illetve bevonatolások fontosságára.

2. Szerszámacélok edzése

Az edzés az ausztenitesítési hőmérsékletre való hevítésből, hőtartásból és a kritikus hűtési sebességnél gyorsabb hűtésből áll (1. ábra).

Az 1. ábrán egy szerszámacél edzési diagramját láthatjuk a hőmérséklet és az idő függvényében. Hevítés során az anyagban feszültségek keletkezhetnek, melyek méretváltozást, illetve torzulást okozhatnak. Ennek elkerülése érdekében aján-



1. ábra. Edzési diagram

lott a lassú felfűtés. Az átalakulási hőmérsékletek alatt 650 °C, illetve 850 °C-on hőkiegyenlítő lépést kell tartani azért, hogy kiegyenlítődjen a hőmérséklet a szerszám magja és a felülete között. A diagramon a zöld görbe mutatja a szerszám felületén mért hőmérsékletet, míg a kék a szerszám középpontjában a hőmérsékletet. Az ausztenitesítési hőmérsékleten a hőkiegyenlítődé után tovább tart a hőtartás a homogén ausztenit kialakulásáig [16].

Adott acélminőség ausztenitesítési hőmérséklete is befolyásolhatja a tulajdonságokat. Az ausztenitesítés elvégezhető kisebb vagy nagyobb hőmérsékleten is. Az Uddeholm cég által gyártott Sverker 21 minőségű hidegalakító szerszámacél 1020 °C-on történt ausztenitesítés utáni edzéssel elért keménysége 62 HRC, míg 1075 °C-on 61 HRC lett [17]. A nagy hőmérsékletű edzés utáni kisebb keménységi érték a primer karbidok részleges oldódásának, illetve a durvább ausztenitzemcséből át nem alakult maradék ausztenit mennyiségének köszönhető [18, 19].

A maradék ausztenit az edzés során képződik, amikor az ausztenit egy része nem tud átalakulni martenzitté. Ez az átalakulás egy diffúzió nélküli átalakulás, mely az M_s azaz a martenzites átalakulás kezdeti hőmérsékletén (angolul martensit start) kezdődik, és az M_f azaz a martenzites átalakulás befejezési hőmérsékletén (angolul martensite final) ér véget. Az M_s illetve M_f hőmérsékletet az acél karbontartalma határozza meg, mely a szerszámacélok esetében nagy, így az M_s és M_f kis, sőt az M_f negatív tartományba esik [45]. Ezért is szükséges a mélyhűtés. A maradék ausztenit nem kívánt fázis a szerszámacélok esetében, mivel feszültséget és méretváltozást okoz. A feszültség az anyagon belül ott képződik, ahol az át nem alakult ausztenit található, ugyanis az ausztenit térfogata kisebb, mint a martenzit, így a fázisok között húzó-nyomó feszültség keletkezik. A maradék ausztenit egy lágy és instabil fázis, mely amellet, hogy csökkenti a keménységet, a szerszám működése közben az igénybevételek hatására martenzitté alakul, és ezáltal a szerszámban repedéseket, illetve szerszámtörést okozhat [20–22]. Az edzés utáni maradék ausztenit mennyiségének csökkentésére a leghatékonyabb módszer a mélyhűtés [23–25].

2.1. A mélyhűtés és hatásai

A mélyhűtés, angolul „cryogenic treatment”, azt jelenti, hogy az acélt negatív hőmérsékletre hűtik az anyag sajátos tulajdonságainak elérése céljából.

A mélyhűtés három különböző hőmérsékleti tartományra osztható. Az első a 0 °C alatti tartomány (angolul sub zero treatment), mely –80 °C-ig tart. Ebben a tartományban a maradék ausztenit nagy része martenzitté alakul, javul az acél kifaradással szembeni ellenállása, a méretstabilitás, és nő az acél kopással szembeni ellenállása [26]. A második tartomány az ún. enyhe mélyhűtés (angolul shallow cryogenic treatment), mely a –80 és –160 °C közötti tartományt foglalja magába. Ebben a tartományban a maradék ausztenit mennyisége 1,8% alá csökkenthető, ami méretstabilitást biztosít, kopásállóságot és nem utolsósorban a szerszám élettartamának növekedését [27, 28]. Az **1. táblázat** egy elektrosalakos átvlasztással gyártott K340-es minőségű Böhler hidegalakító szerszámacél röntgendiffrakciós vizsgálati eredményeit mutatja be egy hagyományosan hőkezelt (CHT, angolul conventional heat treated) és egy –150 °C-ra hűtött, azaz enyhe mélyhűtött (SCT, angolul shallow cryogenic treated) mintadarabon. Az eredmény azt mutatja, hogy a sekély mélyhűtött próbatest maradékausztenit-tartalma több mint 3-szor kevesebb, mint a hagyományosan hőkezelté, karbidtartalma meg 20%-kal több, ami a másodlagos karbidkiválásoknak köszönhető. Ez a mélyhűtésnövekedés mellett jobb kopási tulajdonságot is biztosít az acélnek.

1. táblázat. K340 acél XRD vizsgálati eredménye [27]

Fázisok (tömeg %)	1- CHT	2- SCT (–150 °C)
Martenzit	62,8	55,8
Maradék ausztenit	6,2	1,8
M ₂ C (V,Nb)	5,2	4,8
M ₇ C ₃ (Cr, Fe)	16,7	24,6
M ₂₃ C ₆ (Cr, Fe)	9,1	5,3
M ₃ C ₂ (Cr,Fe)	0	7,7

A harmadik tartomány (–160 °C-tól –196 °C-ig tart) az úgynevezett mélyhűtés (DCT, angolul deep cryogenic treatment), mely nemcsak a szerszám méretstabilitását biztosítja, hanem jelentősen növeli a kopásállóságát, a keménységét, a szilárdságát, de bizonyos esetekben még a korrózióállóságát is [29, 30].

A mélyhűtési hőkezelések pozitív hatásai miatt számos területen terjedtek el, mint például az additív gyártással előállított termékek esetében [31], elektródák [32], hegesztett kötések [33], anyagok megmunkálásai során [34–36]. A mélyhűtés alkalmazásai elterjedtek a nanotechnológiákban [37] és más iparágakban is, mint például

az orvostudomány, az űrkutatás, a zene, az autópár [38–40] területén. Az alkatrészek, szerszámok élettartama és teljesítménye is nagyban függ az alkalmazott hőkezelési technológiáktól. Mélyhűtéssel nagymértékben javíthatók a szerszám-célok mechanikai, termokémiai és tribológiai tulajdonságai [41, 42].

A mélyhűtésben nagy lehetőségek rejlenek a fémek anyagok tulajdonságainak javítására és a szerszámok élettartamának növelésére.

A Böhler M340 ISOPLAST elektrosalakos átoltasztott minőségű műanyagforma acél edzés utáni mélyhűtéssel és háromszorosan nagy hőmérsékletű megeresztéssel végzett próbatestek tulajdonságait hasonlítottuk össze a hagyományosan, azaz mélyhűtés nélkül hőkezelt próbatestekkel [43]. A hőkezelési diagramot a **2. ábra** szemlélteti.

A mélyhűtött próbatest keménysége 1 HRC-vel lett nagyobb a hagyományosan hőkezelténél, a kopási tényezője 45%-kal lett kedvezőbb, míg a korróziós tömegvesztés 15%-kal csökkent.

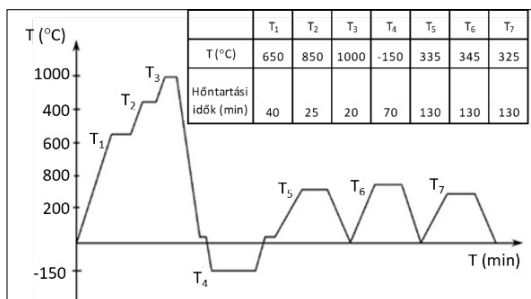
A mélyhűtést edzés után és megeresztés előtt szokás elvégezni [44].

3. A megeresztés és hatásai

Az edzés utáni feszültséggel teli martenzites szövet rideg és törekeny, gyakorlati alkalmazásra nem ajánlott. Felhevítve 200–600 °C közé a feszültségek enyhülnek, relaxálódnak. A szerszám-célok szövetszerkezete martenzitet, maradék ausztenitet és karbidokat tartalmaz, de újból felhevítve egy adott hőmérsékletre az A_{c1} átalakulási hőmérséklet alá, csökken a feszültsége és a maradék ausztenit mennyisége.

Szerszámacélok megeresztése során az edzés utáni rideg martenzites szövet megeresztése, illetve szerszámacélok esetében a homogén szfroiditos szövetszerkezet elérése a cél.

A szerszámacél edzését mindig azonnal a megeresztésnek kell követnie (kivéve, ha mélyhűtést alkalmazunk).



2. ábra. A Böhler M340 ISOPLAST acél hőkezelési diagramja

Kis hőmérsékletű megeresztéssel csak a martenzit megeresztődését érhetjük el, míg nagy hőmérsékletű megeresztéssel a maradék ausztenit mennyisége is csökkenthető.

Az első megeresztés után, nagy megeresztési hőmérséklet esetén a szövetszerkezet megeresztett martenzitet, újonnan alakult martenzitet (maradék ausztenitből), valamennyi maradék ausztenitet és karbidokat tartalmaz. Ez esetben új karbidok, ún. másodlagos (szekunder) karbidok válnak ki, melyek az újonnan képződött martenzittel megemelhetik a keménységet. Ezt nevezik másodlagos (szekunder) keményedésnek.

A szerszámacélokat legalább kétszer kell megeresztetni nagy hőmérsékleten. Ekkor az első megeresztés után megeresztődött martenzit szferoidittá, az újonnan alakult martenzit megeresztett martenzitté, a maradék ausztenit pedig martenzitté alakul.

Harmadik nagy hőmérsékletű megeresztés javasolt gyorsacélok, melegmunkaacélok, főleg öntőszerszámok esetében, nagyobb műanyagforma szerszámok hőkezelésekor, valamint bonyolult geometriájú, nagy méretpontosságú darabok esetén. A harmadik megeresztés lényege a homogén szferoiditos szövet elérése, illetve az anyag hőkezelés utáni feszültségcsökkentése.

Patricia Jovicevic-Klug és társai vizsgálták a gyorsacélok tulajdonságainak változását a mélyhűtés (DCT) hatására [45], és arra a következtetésre jutottak, hogy a mélyhűtés (DCT) növeli az acél keménységét, javítja a fáradással szembeni ellenállást, növeli a nyomószilárdságot és az ütőmunkát, ezáltal javítva a szívósságot. Mindezen tulajdonságokra azonban a mélyhűtés mellett hatást gyakorol az ausztenitesítési hőmérséklet és a megeresztési hőmérséklet. Vizsgálataikból az is kiderül, hogy egy kis ausztenitesítési hőmérséklet és egy nagy megeresztési hőmérséklet kedvezőbb tulajdonságokat biztosít a gyorsacélok esetében, mint egy nagy edzési hőmérséklet és egy kis megeresztési hőmérséklet.

Kutatásaink alapján megállapítottuk, hogy a Böhler K110-es hidegalakító szerszámacél esetében a nagy edzési hőmérséklet, mélyhűtés és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztés során a legkedvezőbbek a mechanikai tulajdonságok [46]. A nagy hőmérsékletű edzés (1070 °C) és a kis hőmérsékletű megeresztés (200 °C) után 641 HV lett a keménység, míg a magas hőmérsékletű edzés (1070 °C), mélyhűtés (–80 °C) és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztés (480 °C) után 738 HV keménységet mértünk, ami 14%-os növekedést jelentett.

A kísérletek azt bizonyítják, hogy a szerszámacélok kedvező tulajdonságait homogén, kismértű, egyenletes eloszlású karbidokat tartalmazó szferoidites szövet kialakításával érhetjük el. Ezt a szövetszerkezetet nagy hőmérsékletű edzést követő mélyhűtéssel és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztéssel lehet elérni. Egy ilyen szövet nagy keménység mellett szívósságot, kopásállóságot, esetenként korrózióállóságot biztosít a szerszám számára, és nem utolsósorban élettartam-növekedést. E tulajdonságok elérésére jól kidolgozott optimális hőkezelési technológia szükséges. Nagyobb felületi keménységet, illetve kopásállóságot felületkezelés útján lehet elérni.

4. Szerszámacélok felületkezelése

A szerszám felületkezelésének célja a kopásállóság növelése, az adhézió csökkentése és a kialakított alkatrész minőségének javítása.

A szerszámgártás során a legelterjedtebb felületkezelések a nitridálások és a bevonatolások.

4.1. Szerszámacélok nitridálása

Nitridálás során a szerszám felületi rétegébe nitrogént diffundáltatnak, mely az acélban lévő nitridképző elemekkel kemény kopásálló vegyületet képez. Nitridálásra a legalkalmasabb acélok a közepes széntartalmú szerszámacélok, melyek alumíniummal, krómmal, molibdénnel, illetve vanádiummal vannak ötvözve. Fontos, hogy a szerszám utolsó megeresztési hőmérséklete a nitridálás hőmérséklete alatt legyen, különben kilágyulhat.

A legelterjedtebb nitridálási eljárások a gáznitridálás és a plazmanitridálás.

4.1.1. Gáznitridálás

A nitridált kéreg egy vegyületi (fehér) és egy diffúziós rétegből tevődik össze. A vegyületi réteg felelős a kopással, súrlódással és rátapadásal szembeni ellenállásért, míg a diffúziós réteg a kifáradással szembeni ellenállásért. A vegyületi réteg vastagsága mikronos nagyságrendű (10 µm körüli), míg a diffúziós rétegé 0,1–1 mm körüli.

A gáznitridálást általában nitrogénben gazdag gázban, ammóniában végzik. Amikor az ammónia érintkezésbe kerül a felhevített munkadarabbal, nitrogénre és hidrogénre bomlik, és a nitrogén a darab felületébe diffundál. A nitridált réteg keménysége a szerszámacélok felületén elérheti a 950–1200 HV értéket. A gáznitridálás hőmérséklete 500–570 °C között változhat. Guo-meng Li és társai a nitridált M50NiL acél esetében a legjobb kopási ellenállást az 500 °C-os hőmérséklet alkalmazásával érték el [47].

4.1.2. Plazmanitridálás

A plazmanitridálást általában 480–520 °C közötti hőmérsékleten végzik. Ezen eljárás nagy előnye, hogy a többi nitridálási eljárással szemben jól szabályozható, könnyen reprodukálható, rövid időtartamú, és aránylag kis hőmérsékleten végezhető [48, 49].

Kolozsváry Zoltán a nitridált réteg szerkezetét és tulajdonságait vizsgálta dolgozatában [50].

Kísérleteink során egy H13 minőségű melegmunkaacélon 520 °C hőmérsékleten végzett plazmanitridálás után a 200 µm-es vastag rétegen 1144 HV keménységet mértünk [51]. A megállapított kopási együttható alapján a plazmanitridált felületű minta jobb kopási ellenállással rendelkezik, mint az edzett és megeresztett próbatestét.

Kovács Dorina és társai a nemesíthető és rozsdamentes acélok plazmanitridálás utáni kopási viselkedéseit vizsgálták [52].

A plazmanitridálás egyik változata az aktív ernyős plazmanitridálás (ASPN). Szilágyiné Bíró Ilona téziszüzetében [53] a próbatesteken történő elszíneződést okozó éihatást tanulmányozta az aktív ernyős plazmanitridálás során, és összehasonlította a hagyományos és aktív ernyős plazmanitridálás utáni nitridált rétegeket.

4.2. Szerszámacélok felületi bevonatolása

A szerszámacélok felületi bevonatolása általános gyakorlattá vált. Ezen eljárás általános célja egy nagy keménységű és kis súrlódású felületi réteg létrehozása, mely jó kopásállóságot eredményez, minimalisra csökkentve a tapadás és ragadás kockázatát.

A bevonat jellemzően egy vékony kerámiaréteg (4 µm alatti), melyet nagyon nagy keménység és kis súrlódás jellemez. A leggyakrabban alkalmazott bevonatolási eljárás a PVD (physical vapour deposition) és a CVD (chemical vapour deposition).

Kísérleteink során vizsgáltuk a X40CrMoV5-1 minőségű megalakító szerszámacél tulajdonságait különböző bevonatolások hatására [43]. A legnagyobb felületi keménységet, éspedig 2938 HV, a TiN/AlTiN PVD bevonattal értük el, amely egyben a legjobb kopási tulajdonságokat is hozta.

5. Következtetések

A szerszámacélok tulajdonságait a gyártási technológia, a kémiai összetétel és a mikroszerkezet határozza meg. A mikroszerkezet a hőkezeléssel állítható be, mely a megfelelő tulajdonságokat biztosítja a szerszámacélok felhasználása során.

Dolgozatomban számos releváns szakirodalom felhasználásával áttekintettem a szerszámacélok hőkezelési technológiáit, mely során összehasonlítottam a hőkezeléssel elérhető tulajdonságokat. A főbb tulajdonságok a keménység, kopásállóság, szilárdság, szívósság, megeresztésállóság, melegszilárdság, korrózióállóság, mérettartóság. A legújabb kutatási eredmények alapján a szerszámok legjobb tulajdonságait és egyben a legnagyobb élettartamát a mélyhűtéses eljárás alkalmazásával lehet elérni. Felületkezeléssel és bevonatolással a kopásállóság, keménység, korrózióállóság még tovább javítható.

Az optimális hőkezelési technológia alkalmazása a kulcs az élettartam és az elvárt tulajdonságok eléréséhez.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gaard A., Krakhamler P., Bergström J.: *Wear mechanism in deep drawing of carbon steel-correlation to laboratory testing*. Tribotest, 14. (2008) 1–9. <https://doi.org/10.1002/tt.49>.
- [2] Staia M. H., Pérez-Delgado Y., Sancho C., Castro A., Le Bourhis E., Pucho Cabrera E.: *Hardness properties on high-temperature wear behavior of nitrided AISI D2 tool steel, prior and after PAPVD coating*. Wear, 267. (2009) 1452–1461. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.03.045>.
- [3] Brezinová J., Vinos J., Guzanova A., Zivcak J., Brezina J., Sailer A., Voidka M. et al.: *Selected Properties of Hardfacing layers Created by PTA Technology*. Metals, (2021). <https://doi.org/10.3390/met11010134>.
- [4] Böhler-Uddeholm Hungary Kft.: *Szerszámacélok. Nemesacélok katalógus*. www.boehler.hu (2014)
- [5] Böhler Uddeholm AG: *Heat Treatment of Tool Steel*. www.uddeholm.com (2012) 39.
- [6] Tóth László: *Reduction of Retained Austenite in Tool Steels*. MTK, 16. (2022) 52–57. <https://doi.org/10.33894/mtk-2022.16.10>
- [7] P. Bala: *The Kinetics of Phase Transformations During Tempering of Tool Steels With Different Carbon Content*. Archives of Metallurgy and Materials, 2/54. (2009) 491–498.
- [8] Soares E. Jr., Vatauvuk J., Panelli R., Pillis M. F.: *Evaluation of Mechanical Properties and Microstructure of a High Carbon-vanadium Tool Steel Produced by Powder Metallurgy*. Materials Science Forum, 530–531. (2006) 140–144.
- [9] Bostjan Arh, Bojan Podgornik, Jaka Burja: *Electroslag Remelting: A Process Overview*. Materials Technology, 50. (2016) 6, 971–979. ISSN 1580_2949.
- [10] Schickbichler M., Ramesh Babu S., Hafok M., Turk C., Schneeberger G., Fölzer A. & Michelic S. K.: *Comparison of methods for characterising the steel cleanliness in powder metallurgical high-speed*

- steels. Powder Metallurgy. <https://doi.org/10.1088/00325899.2023.2170848>.
- [11] Korotkov A. N., Korotkova L. P., Laschinina S. V.: *Influence of production technology on the structure and properties of powder high-speed steels*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971. (2020) 022096. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/971/2/022096>.
- [12] Bahrami A., Anijdon S. H. M., Shamanion M., Varahvam N.: *Effects of conventional heat treatment on wear resistance AISI H13 tool steel*. Wear, 258. (2005) 846–851. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09008>
- [13] Réger Mihály, Horváth Richárd, Széll Attila, Réti Tamás, Gonda Viktor, Felde Imre: *The Relationship between Surface and In-Depth Hardness for the Nitrocarburizing Treatment Process*. Metals, 11. (2021) 812. <https://doi.org/10.3390/met11050812>
- [14] Htun Min Shan, Kyaw Si Thu, Lwin Kay Thi: *Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Spring Steel*. Journal of Metals, Materials and Minerals, 18/2. (2008) 191–197.
- [15] Fadare D. A., Fadara T. G., Akanbi O. Y.: *Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 10/3. (2011) <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.103020>
- [16] Bede Martin, Tóth László: *Optimális paraméterek meghatározása dievar melegelakító szerszámacél hőkezelése során*. XXX. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiállítás, Hőkezelő proceeding (2022).
- [17] Tóth László: *A maradék ausztenit mennyiségének csökkentése szerszámacélok esetében*. Műszaki Tudományos Közlemények, 16. (2022) 52–57. <https://doi.org/10.33895/mtk-2022.16.10>
- [18] Yiwa Luo, Hanjie Guo, Xiaolin Sun, Mingtao Mao, Jing Guo: *Effect of Austenitizing Conditions on The Microstructure of AISI M42 High-Speed Steel*. Metals, 7. (2017) 27, <https://doi.org/10.3390/met7010027>
- [19] Sola R., Veronesi P., Giovanardi R., Forti A., Parigi G.: *Effect of heat treatment before cryogenic cooling on the properties of AISI M2 steel*. Metall. Ital., 109. (2017) 5–16.
- [20] R. Pierer, R. Schneider, H. Hiebler: *The behavior of two new steels regarding dimensional changes*. 6th International Tooling Conference, 2022, 611–624.
- [21] P. Sekhbar Babui: *Effects of Cryogenic Treatment on H13 Tool steel - An Experimental Investigation*. International Journal of Metallurgical & Materials Science on Engineering, 3/2. (2013) 53–58. ISSN 2278-2516.
- [22] M. Arbab Rehan, Anna Medvedeva, Lars-Erik Svensson, Leif Karlsson: *Retained Austenite Transformation during Heat Treatment of a 5 Wt Pct Cr Cold work Tool Steel*. Metallurgical and Materials Transaction, 481. (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4232-5>
- [23] Arunram S. P., Nishal M., Thirumugham M., Raghunath A. G.: *Effect of deep and shallow cryogenic treatment on high speed steel grade M2 drilling tool*. Materials Today: Proceedings, 46/19. (2021), 9444–9448.
- [24] Dumasia C. A., Kulkarni V. A., Sonar K. A.: *Review on the effect of cryogenic treatment on metals*. International Research Journal of Engineering and Technology, 4/7. (2017). ISSN: 2395-0072.
- [24] Podgornik B., Paulin I., Zajec B., Jacobson S., Leskovšek V.: *Deep cryogenic treatment of tool steels*. Journal of Materials Processing Technology, 229. (2016) 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.045>
- [25] Chopra Swamini A., Sargade V. G.: *Metallurgy behind the Cryogenic Treatment of Cutting Tools: An Overview*. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.119>.
- [26] Yarasu Venu, Jurci Peter, Gogola Peter, Podgornik Bojan, Sedlacek Marko: *Sliding wear behaviour of conventional and cryotreated PM Cr-v (Vanadis 6) ledeburitic tool steel*. Wear, (2023) 532–533. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205107>
- [27] Jovicevic-Klug Patricia, Tóth László, Podgornik Bojan: *Comparison of K340 Steel Microstructures and mechanical properties using shallow and Deep Cryogenic Treatment*. Coatings, 12. (2022) 1296. <https://doi.org/10.3390/coatings12091296>
- [28] Tóth László, Fábián Enikő Réka: *Possibility for Improving the Properties of the Plastic Mold Tool In order to Increase its Service Life*. European Journal of Materials Science and Engineering, 7/4. (2022) 299–305. <https://doi.org/10.33895/ejmse.2022.07.04.299>
- [29] Essam M. A., Shash A. Y. El-Fawakhry M. K., El-Kashif E., Megahed, H.: *Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Behavior of Cold Work Tool Steel*. Metals, 13. (2023) 382. <https://doi.org/10.3390/met13020382>
- [30] Voglar J., Novak Ž., Jovicevic-Klug P., Podgornik B., Kosec, T.: *Effect of Deep Cryogenic Treatment on Corrosion Properties of Various High-Speed Steels*. Metals, 11. (2021) 14. <https://doi.org/10.3390/met11010014>
- [31] Bartolomé E., Bozzo B., Sevilla P., Martínez-Pasarell O., Puig T., Granados X.: *ABS 3D printed solutions for cryogenic applications*. Cryogenics, 82. (2017) 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.01.005>
- [32] Zhisheng W., Ping S., Jinrui L., Shengsun H.: *Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel*. Materials and Design (2003) 24. 687–692.

- [33] Lin Y. T., Wang M. C., Zhang Y., He Y. Z., Wang D. P.: *Investigation of microstructure evolution after postweld Heat Treatment and cryogenic fracture toughness of the weld metal of AA2219 VPTIG joints*. Materials and Design, 113. (2017) 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.010>
- [34] Paul S., Chattopadhyay A. B.: *Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling*. Machining Science and Technology, 10. (2007) 87–131. <https://doi.org/10.1080/10910340500534316>
- [35] Govindaraju N., Shakeel A. L., Pradeep Kumar M.: *Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of AISI 1045 Steel*. Materials and Manufacturing Process, 29. (2014) 1417–1421. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.930952>
- [36] Su Y., He N., Li L., Zhao W.: *Effects of cryogenic nitrogen gas jet on machinability of Ti-alloy in high-speed milling*. China Mechanical Engineering, 17. (2006) 1183–1187.
- [37] La Rocca A., Di Liberto G., Shayler P. J., Fay M. W.: *The nanostructure of soot-in-oil particles and agglomerates from an automotive diesel engine*. Tribology International, 61. (2013) 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.12.002>
- [38] Iacopi F., Choi J. H., Terashima K., Rice P. M., Dubois G.: *Cryogenic plasmas for controlled processing of nanoporous materials*. Phys. Chem. Chem. Phys., 13. (2011) 3634–3637. <https://doi.org/10.1039/c0c02660c>
- [39] Thornton R., Slatter T., Jones A. H., Lewis R.: *The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs*. Wear, 271. (2011) 2386–2395. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.014>
- [40] Ming C. J. E. R.: *Cryogenic Treatment of Music Wire*. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore, 2004. <https://scholarbank.nus.edu.sg/haler/10635/14397>
- [41] Mahdi Koneshlon, Kaveh Meshinchi, Farzad Khomamizadeh: *Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviours of AISI H13 hot work tool steel*. Cryogenics, 51. (2011) 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.001>
- [42] Debdulal D. Das & Ray K. K.: *On the mechanism of wear resistance enhancement of tool steels by deep cryogenic treatment*. Philosophical Magazine Letters, 92/6. (2012) 295–303. <https://doi.org/10.1080/09500839.2012.669052>
- [43] Körösi Gábor, Dr. Tóth László, Dr. Pinke Péter: *Vizsgálatok a PVC granuláló szerszám élettartamának növelésére*. Mérnöki Szimpózium a Bánkin, ESB, 2022. 194–199. <http://bgk.uni-obuda.hu/esb>, ISBN 978-963-449-306-8
- [44] Jovicevic-Klug Patricia, Podgornik Bojan: *Effect of Deep Cryogenic treatment of Metallic Materials in Automotive Application*. 2020. <https://doi.org/10.3390/met10040434>.
- [45] Jovicevic-Klug Patricia, Pus Gasper, Jovicevic-Klug Matic, Zuzek Borut, Podgornik Bojan: *Influence of heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment on properties of high-speed steels*. Materials Science & Engineering, A829. (2021) 142157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142157>
- [46] Tóth L., Fábíán E. R.: *The Effects of Quenching and Tempering Treatment on the Hardness and Microstructures of a Cold Work Steel*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 4/1. (2019). <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.36>
- [47] Guo-meng Li, Yi-long Liang, Hao Sun, Yun-gang Cao: *Nitriding behaviour and mechanical properties of carburizing and nitriding duplex treated M50NiL steel*. Surface and Coatings Technology, 384. (2019) 125315. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125315>.
- [48] Podgornik B., Majdic F., Leslovsek V., Vizintin J.: *Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding*. Wear, 288. (2011) 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.04.001>.
- [49] Georges J., Lebrun J.: *Plasma-nitriding and postoxidizing: An innovative and eco-friendly solution with strong reduced consumption of gas and energy*. Nitriding and Nitrocarburising Conference Proceedings, Aachen, Germany, 2010.
- [50] Kolozsvári Z.: *Nitriding Structure and Properties of Nitriding Layers*. ASM Handbook, Volume 40, Treating of Iron and Steels, 2014. ISBN: 978-1-62708-066-8.
- [51] Tóth László, Kovács Tünde Anna, Nyikes Zoltán, Ghica Valeriu-Gabriel: *Increasing the H13 Tool Steel Wear Resistance by Plasma Nitriding and Multilayer PVD Coating*. U. P. B. Sci. Bull, Series B, 83/2. (2021). ISSN 1454-2331.
- [52] Kovács Dorina, Blücker József, Dobránszky János, Fábíán Réka: *Nemesíthető acélok és rozsdamentes acélok plazmanitridálása*. 2016, XXI. FMTÜ. <https://doi.org/10.33895/mtk2016.05.50>
- [53] Szilágyiné Bíró Andrea: *The Influence of Bios Voltage on The Layer Structure in Active Screen Plasma Nitriding*. Booklet of PHD Theses, University of Miskolc, 2017.
- [54] Bitay Enikő, Tóth László, Kovács Tünde Anna, Nyikes Zoltán, Gergely Attila Levente: *Experimental Study on the Influence of TiN/AlTiN PVD Layer on the Surface Characteristics of Hot Work Tool Steel*. Appl. Sci., 11. (2021) 9309. <https://doi.org/10.3390/app11199309>