



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Műanyagalakító szerszám élettartam növelése a hőkezelési technológia optimalizálásával

**OE-BGK
2022.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

**Kőrösi Gábor
T000238/FI12904/B**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyag- és Gyártástudományi Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Kőrösi Gábor

Szakedolgozat száma: SZD2208231314004288

Törzskönyvi száma: T000238/FI12904/B

Neptun kódja:

Szak: gépészmérnöki

Specializáció: gépészmérnöki - CAD-CAM-CNC

A dolgozat címe: Műanyagalkító szerszám élettartam növelése a hőkezelési technológia optimalizálásával

A dolgozat címe angolul: Increasing the lifetime of a plastic mould steel by optimizing the heat treatment technology

A feladat részletezése:

1. Ismertesse a műanyag alakító szerszámokkal támasztott követelményeket!
2. Ismertesse a szerszám anyagválasztást!
3. Ismertesse a szerszámok hőkezelésére alkalmazott hőkezelési technológiákat!
4. Készítsen hőkezelési technológiát a szerszám élettartam növelésére!
5. Ellenőrizze a hőkezelés eredményességét!

Intézményi konzulens neve: Dr. Tóth László

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 21.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találok.

belső konzulens

.....
külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

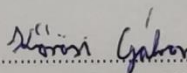
Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat/diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban/diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022. december 15.


.....
hallgató aláírása

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a Titán 94 Kft -nek, hogy a hőkezelésekhez és a metallurgiai vizsgálatokhoz rendelkezésre bocsátotta a szükséges berendezéseket, eszközöket.

A Rolló Kft -nél dolgozó Csóti Zsoltnak köszönöm, hogy felajánlotta a gyárlátogatást, és az ott dolgozó ifj. Novák Mihálynak külön köszönettel tartozom, hogy részletekbemenően bemutatta a PVC alapú műanyagok újrahasznosításának minden lépését, valamint az alkalmazott szerszámokat és gyártási folyamatokat.

A Duna Precíziós Kft -nek köszönöm, hogy a hőkezelt munkadarabokból a későbbi vizsgálatokhoz kimunkálták a próbatesteket, és az ott dolgozó Brieska Csabának is köszönettel tartozom, hogy hasznos tanácsaival ellátott, valamint, hogy körbevezetett a gyártócsarnokukban.

Köszönöm az Óbudai Egyetem oktatóinak, hogy bármikor, bármilyen kéréssel fordultam hozzájuk abban a pillanatban készek voltak segítséget nyújtani, és hogy a koptató-, és korróziós vizsgálatokhoz a szükséges eszközöket a rendelkezésemre bocsátották.

Továbbá köszönöm, és nagyon hálás vagyok konzulensemnek, Dr. Tóth Lászlónak, hogy mindenben támogatott, jótanácsaival folyamatosan ellátott, és ha szükségem volt rá irányt mutatott.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Rolló Kft.....	3
2.1. Szerszámkészítő és gépgyártó műhely:	4
2.2. Granuláló részleg	10
2.3. Késztermék előállítás.....	13
3. Szerszámanyag választás.....	14
3.1. Eddig alkalmazott szerszámanyagok.....	15
3.2. Választott szerszámanyag bemutatása	16
4. Hőkezelések.....	19
4.1. A műanyagalkító szerszámok hőkezelésére alkalmazott hőkezelési technológiák	19
4.2. Alkalmazott hőkezelések	22
5. Vizsgálatok.....	29
5.1. Keménységmérés	30
5.2. Mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálat	31
5.3. Koptatóvizsgálat.....	33
5.4. Korrozíóállósági vizsgálat	44
6. Összefoglalás	51
7. Idegen nyelvű tartalmi összefoglaló.....	53
Felhasznált irodalom.....	55

1. Bevezetés

A műanyagok az elmúlt évtizedekben nélkülözhetlenné váltak az alkalmazhatóságuk szinte minden területén. Ezt legfőképpen előnyös tulajdonságaiknak köszönhetik. Többek között alacsony sűrűségük miatt számos helyen gazdaságosabb felhasználást biztosítanak a korábban azonos területen alkalmazott más anyagokhoz képest, pl.: gépjárművek bizonyos alkatrészei, építőipari szerkezeti elemek. A gyártásuk során felhasznált energiamennyiség is viszonylag kevés, az alacsony feldolgozási hőmérsékletük végett.

A világ műanyagtermelésének legnagyobb hányadát a polietilén, polipropilén, polivinilklorid, polisztirol, valamint a polietilén - tereftalát teszik ki. Ezeket nevezzük tömegműanyagoknak. A tömegműanyagok újrahasznosítása kiemelten fontos, mert ezeket használják fel a legnagyobb mennyiségben. A tömegműanyagok közül a polivinilklorid (PVC) alapú műanyagok újrahasznosítása során különösen nagy odafigyeléssel kell eljárni, mivel a feldolgozó berendezéseken túl, az azokat kezelő személyzetben is kárt tehet [1,2].

2022. július 5 -én Dr. Tóth László Tanár Úr közreműködésével a Rolló Kft -nél egy gyárlátogatás keretein belül megismerkedhettem az újrahasznosított PVC alapú anyagból készülő granulátum, valamint számos területen alkalmazott extrudált elem teljes gyártási folyamatával ifj. Novák Mihály, a szerszámkészítés részleg telepvezetője kíséretében.

A továbbiakban bemutatom a Rolló Kft -nél megismert PVC anyagok feldolgozási körülményeit, és a gyártás szempontjából fontos tulajdonságait, a PVC reciklási eljárását, valamint az újrahasznosítás során alkalmazott berendezéseket. A PVC alapú anyagok újrahasznosítása szinte elengedhetetlen, mivel nem képes lebomlani, így a nagy tömegű felhasználása miatt a gyakran nem megfelelően kezelt hulladéka szennyezi a környezetet.

A gyárlátogatás során szerzett ismeretek alapján, lehetőséget láttam a termelés gazdaságosságának növelésére. Ezt az újrahasznosított alapanyagú granulátum készítése során alkalmazott granuláló szerszám élettartamának növelésével szeretném elérni. Ehhez ajánlok egy szerszámanyagot, amihez egy olyan hőkezelési eljárást fogok választani, amely után a legyártott szerszám egyrészt ellenáll az erős koptató hatásnak, amit a reciklált műanyagok között megtalálható, nehezen kiszűrhető, a PVC -nél jóval

keményebb, idegen anyagok idéznek elő, másrészt nagy mértékben korrózióálló is, az erősen korrodáló, klórt tartalmazó gőz miatt, ami a PVC polimer feldolgozási hőmérsékletre történő hevítése közben alakul ki az ömledékben.

A megfelelő hőkezelési technológia kiválasztásához, két különböző eljárással hőkezelt próbatesteket vizsgáltam. A hőkezelések eredményességét keménységméréssel, valamint kopásvizsgálattal és korrózióállósági vizsgálattal ellenőriztem.

A kapott eredmények azt mutatták, hogy az egyik hőkezelési technológián átesett szerszámanyag mind a keménység és kopásállóság, mind a korrózióállóság tekintetében jobb tulajdonságokkal rendelkezik, mint az eltérő hőkezelésű szerszámanyag. Ezen felül az eddig az iparban alkalmazott acélminőségekhez viszonyítva* is jobb korrózióállósággal rendelkezik.

*A Rolló Kft. gyárlátogatásán emlegetett szerszámmínőségekhez képest (2. fejezet).

2. Rolló Kft.

A Rolló Kft. 1993. óta működő, magyar tulajdonban lévő vállalat, amely PVC újrahasznosítással, granulátum gyártással, illetve késztermék extrudálással foglalkozik. A skandináv országokból, Szerbiából, Szlovákiából, Romániából is vásárolnak fel újrahasznosítható PVC -hulladékot, de akár a megrendelő is hozhat anyagot, amiből gyártatni szeretne [3].

Jelenleg három telephelyen zajlanak a cég tevékenységei:

- szerszámkészítő és gépgyártó műhely
- granuláló részleg
- késztermék előállítás

Mindhárom részleget bemutatom röviden a PVC tulajdonságainak ismertetése után, amibe a gyárlátogatást vezető ifj. Novák Mihály engedett betekintést.

A PVC, feldolgozás szempontjából, fontos tulajdonságai:

- hőmérséklet és nyomás növekedés következtében gázosodik
- 190 - 200 °C -on degradálódik, ezért a gyártás során hőmérséklete 160 -180 °C között van
- nedvességet nem vesz fel
- adalékokkal termikus stabilitása növelhető, mechanikai tulajdonságai széles tartományban szabályozhatóak
- töltőanyagokkal a gyártása olcsóbbá tehető, amelyek a mechanikai tulajdonságait nem, vagy csupán nagyon kis mértékben befolyásolják
- sokszor újrahasznosítható, van, hogy az újrahasznosított jobb tulajdonságokkal rendelkezik, mint az új alapanyagból készült**

A megfelelő tulajdonságok elérése érdekében fontos a hevítés / hőntartás / hűtés, valamint a hozzáadott adalékok, töltőanyagok minőségének és mennyiségének helyes megválasztása.

**a Rolló Kft. tapasztalata szerint

2.1. Szerszámkészítő és gépgyártó műhely:

A cég saját maga készíti elő, és javítja a gyártóeszközeit (a hőkezelésen, esetleges bevonatoláson kívül), egy erre a célra felkészített csarnokban, ezen felül még az új csarnokaik egyes alapanyagait, pl. a lambériákat is, saját maga gyártja le.

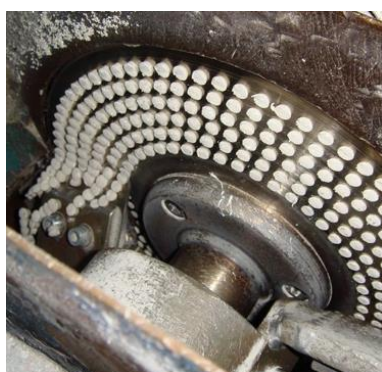
A PVC feldolgozás során alkalmazott szerszámok között megtalálhatunk késeket, guillotine -okat, csigákat (anyagmozgató, valamint granulátum előkészítő), törőtárcsákat, terelőkúpokat, terelőgyűrűket, granuláló fejeket (előlapokat), lyukasztó matricákat, perforáló lapokat, kalibrálókat.



1.ábra. A gyártás során alkalmazott szerszámok egy része

A granulátum készülhet új alapanyagból, vagy újrahasznosított (reciklált) anyag felhasználásával, ezeket a granuláló részleg bemutatása során részletesebben kifejtem.

A **kések** reciklálás során vannak a legnagyobb igénybevételnek kitéve. Az újrahasznosított anyagban a PVC mellett gumidarabok, és akár acél csavarok is keverednek, amik előidéznek ezt a nagy koptató igénybevételt. Hetente 2-3 garnitúrányi is elfogy belőlük. Egy garnitúrában maximum 6 db forgó, és 4 db álló kés található. Ettől eltérő összetételű késgarnitúrákat is alkalmaznak az adott feladattól függően. A kések javítása felrakóhegesztéssel, majd azt követő köszörüléssel történik. Vannak olyan gépek, amelyek akár 5000 fordulat/perc fordulatszámra dolgoznak (többnyire az újrahasznosítandó anyagok aprítói), ez, a nagy tömegük miatt, a hajtást is nagy mértékben igénybe veszi. A forgó kések szívósabb szerszámanyagot igényelnek, mint az állók.



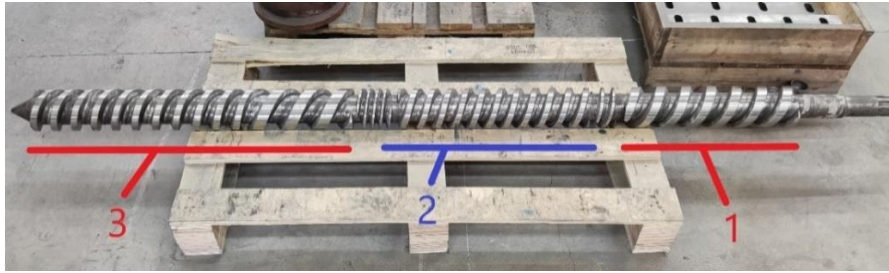
2.ábra. Granulátum levágása kétkéses szerszámmal (bal) [3], javításra váró kések (jobb)

A granulátum előkészítő **csigák** szerepe fontos, megmunkálásuk/karbantartásuk bonyolult és időigényes, a szerkezeti kialakításuk miatt.

3 fő részre oszthatóak (3.ábra.):

- behúzó szakasz (1)
- kompressziós szakasz (2)
- kigázosító szakasz (3)

Ezek mindegyike eltérő menetemelkedést kíván egy csigatengelyen, amiknek az elkészítése bonyolítja leginkább a szerszámot.



3.ábra. Granulátum előkészítő csiga

Egy és kétcsigás kialakítások is vannak. A kompresszió során akár 300 – 400 bar nyomást is létrehozhatnak. A kigázósításhoz a szerszámházon szellőzőnyílásokat kell elhelyezni.



4.ábra. Kettős csigaház szellőzőfuratokkal



5.ábra. Gőzelvezetés (1) és hőmérsékletszabályozás (2)

A **törőtárcsák** K100 -as (EN X210Cr12) anyagminőségből készülnek, szerepük a lamináris anyagáramlás biztosítása, és a nyomásnövelés. Fontos tulajdonságuk az áteresztő- képesség.



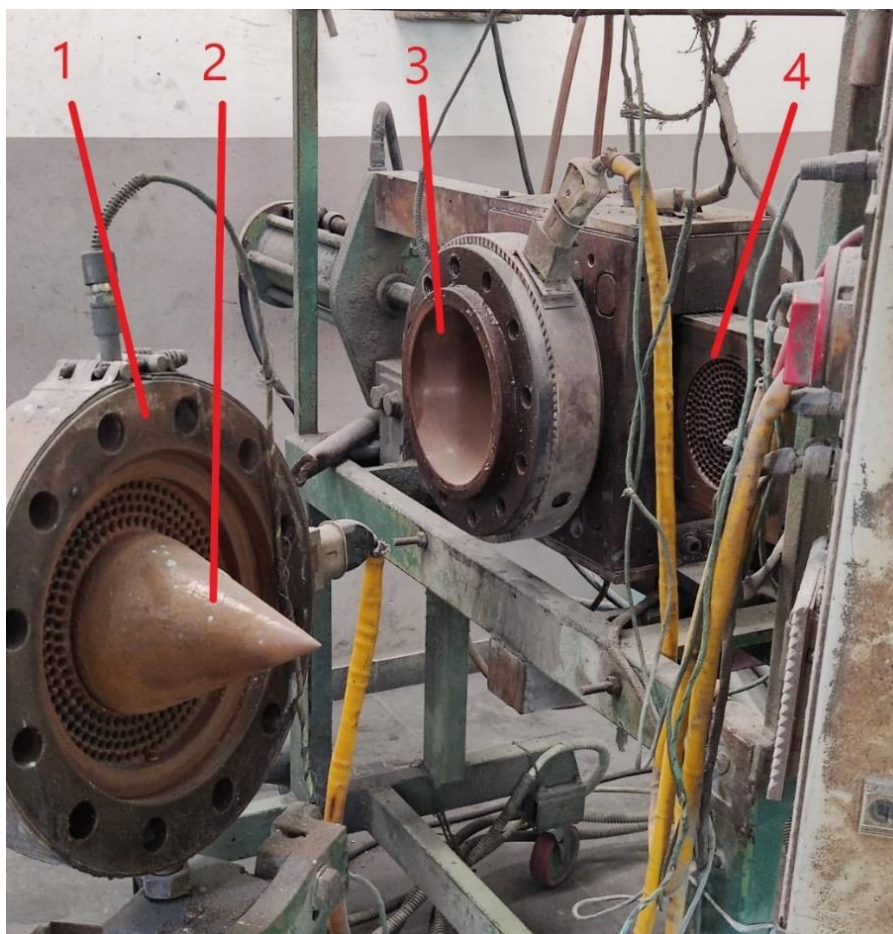
6.ábra. Törőtárcsa (a bal oldali kép az áramlás irányából készült)

A **terelőkúpok** és **terelőgyűrűk** kialakításánál arra kell törekedni, hogy ne legyenek akadó felületek, és holtterek. Ahol megállhat az anyag áramlás közben, ott meg is fog állni, ahol ez bekövetkezik ott megkeményedhet, akár meg is éghet. A belső, anyaggal érintkező, részek felülete polírozott kell legyen. Így az alkalmazott anyagminőséggel szembeni követelmény a jó polírozhatóság, és a kopásállóság, ami a megfelelően kiválasztott hőkezeléssel optimalizálható. Általában K100 -as, vagy K110 -es (EN X153CrMoV12) anyagminőségű acélt alkalmaznak gyártásuk során.

A **granuláló fej (előlap)** BC3 betétben edzhető anyagból készül (EN 16MnCr5). A törőtárcsához hasonlóan ennek is fontos tulajdonsága az áteresztő képesség. Itt az előlapon történik meg a granulátumok levágása, így kiemelten fontos az alkalmazott szerszámanyag kopásállósága. A kés excentrikusan forog az előlapon, ennek mértéke 2-3 mm. Alacsony excentrikusság alkalmazásakor a granulálókés nem „szalad le” eléggé az előlapon, így a kés hullámosan fog kopni.



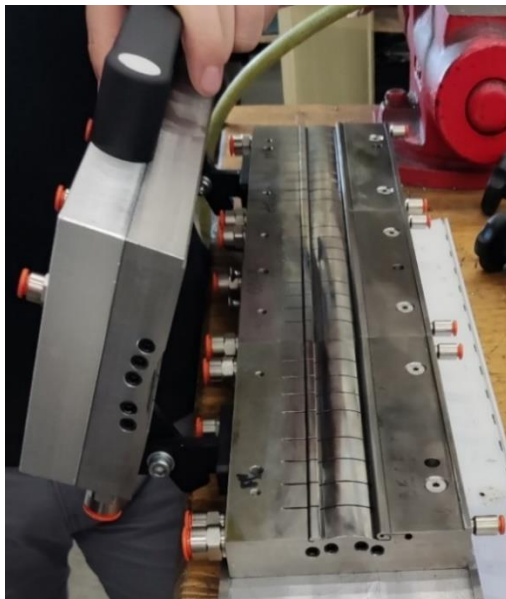
7.ábra. Granuláló fej (előlap) köszörülése [3]



8.ábra. Granuláló szerszám javítása

- 1 – granulálófej
- 2 – terelőkúp
- 3 – terelőgyűrű
- 4 – törőtárcsa

A **kalibráló szerszám**on keresztül húzzák a felhevített extrudált munkadarabot, itt nyeri el végleges formáját. A hűtés is ebben történik, a belső falához szívja a készítendő profilt. A húzósebességgel állítják be az anyagvastagságot. A szerszám szerelt kivitelű, ezzel biztosítható a pontos gyárthatóság, valamint a gyors átállás másik munkadarabra. Az alakítandó anyaggal érintkező felülete polírozott.



9.ábra. Kalibráló szerszám redőny lamellákhoz

A fenti ábrán egy redőny lamella kalibráló szerszáma látható. A narancssárga színű dugók a hűtőcsatornák csatlakozóit zárják le.

2.2. Granuláló részleg

Két főbb területre osztható:

- új alapanyagból
 - újrahasznosított anyagból
- készített granulátumok előállítása.

Az **új alapanyagból** készülő granulátumok legnagyobb összetevője por alapú PVC -ből áll. Ehhez, az egyéb adalékokon túl és a granulátum elvárt tulajdonságaihoz képest, különböző arányban titán-dioxidot (TiO_2) is adagolnak (5 – 40 % -ban is akár), ami hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, de olcsóbb, mint a PVC. Bizonyos termékekhez üvegszálát is kevernek, de az csak a mechanikai tulajdonságokat javítja, egyéb tulajdonságokon nem módosít.

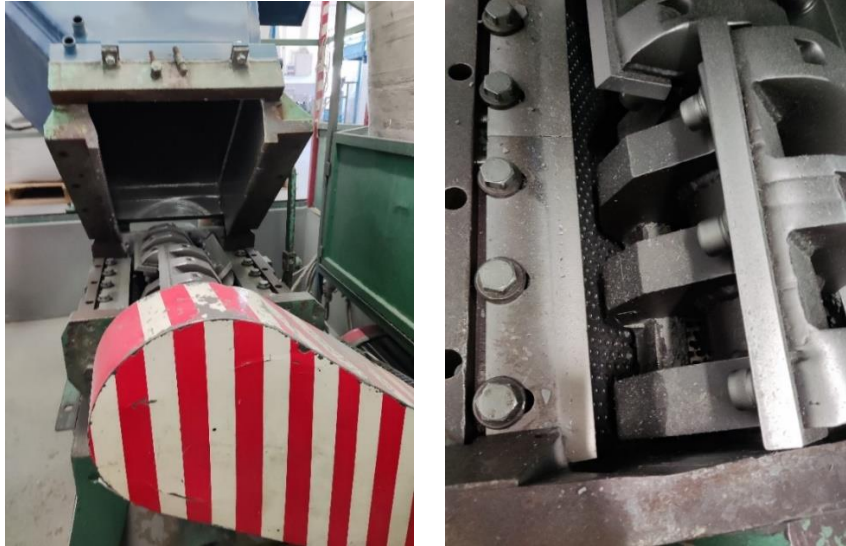
A minőségbiztosításhoz UV -állóság és viszkozitás vizsgálatokat is lehetne végezni, ezeket a Rolló Kft. nem alkalmazza még, csak spektroszkóp analízist.

Az **újrahasznosított alapanyagból** készülő granulátumokhoz kézi válogatással tudják a megfelelő minőségű alapanyagot biztosítani (pl.: ablakkeretből a szigetelést + egyéb idegen anyagokat eltávolítani), ami még így is nagy mértékben tartalmaz szennyezőket, amiket később a granulálás során ki kell szűrni. Az újrahasznosított alapanyagból készülő granulátumokhoz is adagolnak TiO_2 -t szükség esetén (pl.: fehérités miatt). A késztermékek gyártása során keletkező hulladékot (pl.: lyukasztás) is felhasználják az újrahasznosítás során.



10.ábra. Lyukasztási hulladékok

A nagyobb újrahasznosítandó elemeket a granulátum készítés előtt kisebb darabokra törik egy erre a célra használt aprító géppel.



11.ábra. Újrahasznosítandó alapanyag aprító

Később ezeket tovább darálják granulátum méretűre és összekeverik a késztermék gyártás során keletkező maradék anyagokkal. Az újrahasznosított, granulátum méretű anyag a hevítés/ nyomásnövelés után, de még a levágás előtt, szűrésre kerül. Nagyon nagy mennyiségű szennyeződést lehet ezáltal kivenni a készítendő granulátumból.

A szűrés kétféle módját alkalmazzák:

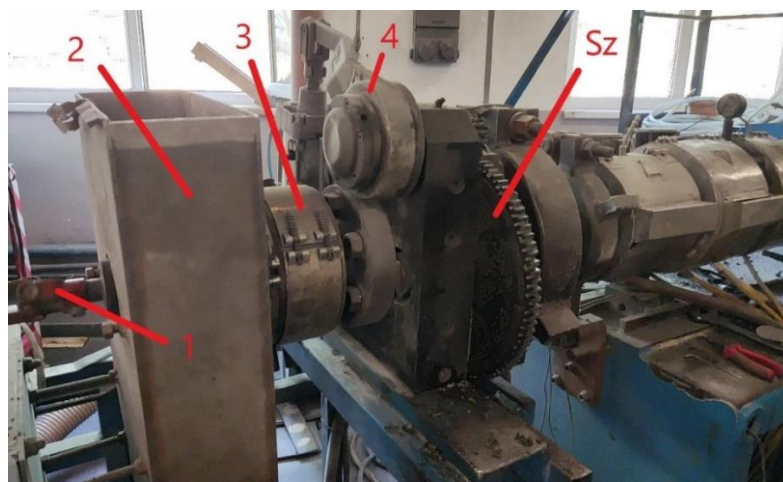
- álló szűrő
- mozgó „tárcsaszűrő”

Az álló szűrő egy egyszerű szűrőlap, ezeket sűrűn cserélni kell, a gyors eltömődés miatt.



12.ábra. Álló szűrőből kivett szennyezőelemek

A cserék számának csökkentése végett használnak mozgó szűrőket (13. ábra), ahol egy külső fogazású tárcsa excentrikusan el tud fordulni az anyagáramlás tengelyéhez képest, ami így lehetővé teszi, hogy a rajta kialakított szűrő (furatokkal ellátott felületek) bizonyos időközönként ki tudjanak fordulni az anyagáramlásból, így a tárcsa egy másik felülete szűr tovább. A használt szűrőfelület addig kitisztítható. Egy tárcsán több ilyen felület is ki van alakítva.



13.ábra. Mozgó szűrő

Sz – szűrőtárcsa

1 – kések hajtása villanymotorral kardáncsuklón keresztül

2 – védőburkolat (mögötte történik a granulátum méretre vágása)

3 – granulálófej

4 – szűrőtárcsa mozgató mechanizmusa

Gyártás során a levágott granulátum felveszi a granulálófejen kialakított rés és a granulálókés formáját, majd lehülés után az egyik oldalán beszívódás figyelhető meg.



14.ábra. Granulátum lehülés utáni beszívódása

2.3. Késztermék előállítás

A késztermékek gyártására szolgáló gépek a késztermékek jellege szerint vannak csoportosítva. (csövek, sarokvédők, redőnylamellák, élelmiszeriparban használt termékek, stb.)

A gépek felépítése első ránézésre nagyon hasonlónak tűnhet. Mindegyik áll egy extrudáló, kalibráló, húzó, méretre vágó részegységből, de ezeken kívül több fontos dologban is eltérnek egymástól. Többek között: a felhasznált granulátum; az extrudálás során alkalmazott hőmérséklet, valamint nyomás; a profil alakját biztosító extrudálófej; a kalibrálószerszám kialakítása, hűtési sebessége; a profilhúzási sebesség; további műveletek (pl.: lyukasztás); egyesítés másik elemmel (pl.: élvédő profil üvegszövet hálójával).

A cég többek között az autóiparban, csomagolástechnikában, élelmiszeriparban, építőiparban, kertészetben használt profilokat, csöveket, és egyéb extrudált elemeket gyárt, akár egyedi rendelés alapján is [3].

Ezek mellett az alábbi tevékenységeket bér munkában is végzi a Rolló Kft.:

- extrudálás
- regranulálás
- szerszámkészítés extruderekhez
- extrudáláshoz kapcsolódó egyedi igények tervezése, kivitelezése
- műanyag hulladékok válogatása, darálása
- PVC hulladék felvásárlása

3. Szerszámanyag választás

A szerszámacélokkal szemben legtöbbször egymásnak ellentmondó követelményeket támasztunk, ráadásul ezek a követelmények napról-napra nőnek az ipari fejlődés hatására. A megrendelők elvárják a szerszámgyártóktól, hogy a megnövekedett igényeket azok a legkorszerűbb fejlesztéseikkel kiszolgálják. Folyamatosan nőnek az élettartammal kopásállósággal, valamint a termelékenységgel szemben támasztott elvárások. Ez kényszeríti rá a gyártókat az újabb anyagok és technológiák létrehozására.

A műanyagalakító szerszámok rendszerint bonyolult alakúak, a műanyaggal érintkező felületük gyakran polírozott. A műanyag-alakító szerszámok gyártásának igényeihez rendelkezésre áll a problémát legjobban megoldó szerszámacél, melyek tulajdonságait a megfelelő hőkezeléssel az egyes speciális alkalmazásokhoz lehet igazítani [4].

Az egyes szerszámok megmunkálása és üzemeltetése során nagyon sokféle, részben egymásnak ellentmondó követelményt támasztunk a felhasznált acélokkal szemben, melyek közül a PVC feldolgozása során a legfontosabbak az alábbiak:

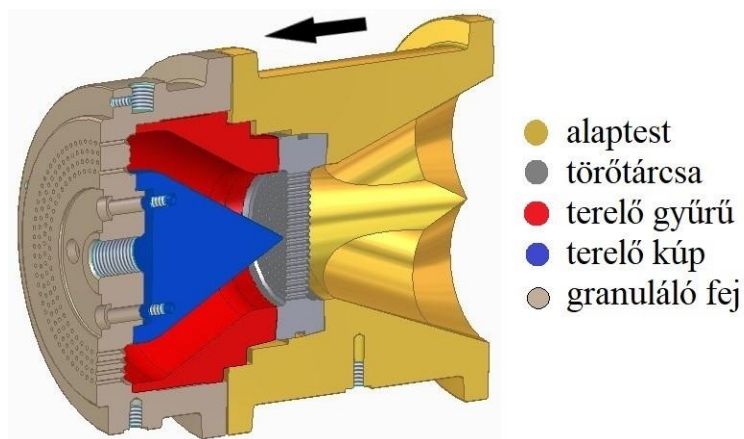
- jó forgácsolhatóság
- jó hővezető képesség
- nagy biztonság repedéssel és töréssel szemben
- jó szívósság
- korrózióállóság
- hegeszthetőség (javítás)
- kopásállóság (reciklálás, töltőanyag-tartalmú műanyagok, granulálás)
- polírozhatóság
- átedzhetőség
- hosszú élettartam

A reciklált alapanyaggal dolgozó granuláló szerszám az egyik leginkább igénybevett szerszámtest az újrahasznosítási folyamat során, aminek az összes fentebb felsorolt követelményt ki kell elégítenie. Ezáltal könnyen belátható, hogy a granulátum előállítás termelékenységének meghatározó eleme, így megbízhatóságának növelése kiemelt figyelmet érdemel. Az esetleges leállások mérséklésével nagy mértékben növelhető a termelékenysége.

3.1. Eddig alkalmazott szerszámanyagok

A szerszámkészítő és gépgyártó részleg bemutatása során említettem, hogy a reciklált műanyag granulálása során alkalmazott anyagminőségek a K100 (EN X210Cr12), K110 (EN X153CrMoV12), valamint a BC3 (EN 16MnCr5). Ezek mindegyike alkalmas ugyan a feladatai ellátására, de már a piacon megjelentek korszerűbb szerszámanyagok, és hőkezelési technológiák, amelyek kifejezetten a műanyag feldolgozáshoz lettek optimalizálva.

Az alábbi képen egy reciklált (újrahasznosított) anyaggal dolgozó granuláló szerszám 3D modelljének metszete látható, mellette az egyes főbb részegységek megnevezései, valamint felette nyíllal jelölve a PVC ömledék áramlási iránya.



15.ábra. Granuláló szerszám 3D modelljének metszete

Az eddig alkalmazott szerszámok hőkezeléséhez elegendő volt egyszerűbb kialakítású hőkezelő berendezések használata, viszont a korszerű szerszámanyagok tulajdonságainak teljes kiaknázásához elengedhetetlenek a legkorszerűbb hőkezelő technológiák alkalmazása. Ezek a hőkezelő technológiák, fejlettebb hőkezelő kemencéket és kiegészítő berendezéseket követelnek meg.

3.2. Választott szerszámanyag bemutatása

Szerszámanyagot a műanyagalakító szerszámok családjából választottam. Az általam ajánlott szerszámanyag, a voestalpine High Performance Metals Hungary Kft. által forgalmazott Böhler M340 ISOPLAST elnevezésű [5]. Jól edzhető, forgácsolható, polírozható, nagyon jó mérettartósság jellemzi. Magas krómtartalma lehetővé teszi, megfelelő hőkezelés mellett, a kitűnő korrózióállóság elérését.

Az ISOPLAST elnevezés egy elektrosalakos átolvasztási eljárással tisztított anyagot jelöl. A tisztító eljárás során a már leöntött acélt újraolvasztják cseppenként, amivel el lehet távolítani a benne lévő szilárd zárványokat. Az acél megdermedése közben tulajdonképpen egy irányított kristályosítási eljárás megy keresztül, összességében egy homogénebb szövetszerkezetet létrehozva.

Emellett fontos volt a széntartalma, az elérhető keménység miatt, a króm, molibdén tartalom a kopásállóság miatt. A króm önmagában a korrózióállóságon javít. A vanádiumnak szemcsefinomító és szívósságnövelő hatása van.

A jelenleg alkalmazott (K100/K110/BC3) acélokhoz képest jobb szívóssági, és megmunkálhatósági tulajdonságokkal rendelkezik, ezek mellett a korrózióállóság tekintetében is kiemelkedik közülük. Mindhárom szerszámacélhoz képest finomabb karbideloszlás és jóval kevesebb maradék ausztenit érhető el a jól megválasztott hőkezelési technológia segítségével.

Az M340 szerszámacél összetétele az alábbi táblázatban látható, amit Hitachi PMP2 spektrométerrel (15.ábra) mértem le.

1. táblázat: Az M340 szerszámacél vegyi összetétele spektroszkóppal mérve

Vegyi összetétel (tömeg %):					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,52	0,42	0,41	17,10	1,12	0,11



16.ábra. Hitachi PMP2 spektrométer

Az egyes ötvözők hatása [6,7]:

Szén (C):

Az acélok alapvető ötvözőeleme, meghatározza az alapmátrix keménységét, karbidképző ötvöző.

Szilícium (Si):

Növeli a keménységet, kopásállóságot, dezoxidál. Viszont rontja a megmunkálhatóságot.

Mangán (Mn):

Csökkenti a kén tartalmát az acélban. Csökkenti a kritikus hűtési sebességet ezáltal javítva az átedzhetőséget. Dezoxidál.

Króm (Cr):

Szintén csökkenti a kritikus hűtési sebességet. Karbidképző ötvöző, növeli a keménységet és a kopásállóságot. Szabad króm formában, a szerszám felületén oxidhártyát képezve korrózióállóvá teszi az acélt. Diszperz eloszlása kulcsfontosságú ezen tulajdonságok maximalizálásához, ezt megfelelő hőkezeléssel érhetjük el. Karbid formában a polírozhatóságot kis mértékben rontja, de eloszlása homogenizálásával mérsékelhetjük hatását.

Molibdén (Mo):

A molibdén is csökkenti a kritikus hűtési sebességet. Javítja az acél megeresztésállóságát. Karbidképző, ezzel növelve a keménységet, és a korrózióállóságot.

Vanádium (V):

Növeli a keménységet, kopásállóságot, megeresztésállóságot és a szívósságot.

Nitrogén (N):

Stabilizálja az ausztenites szövetszerkezetet, szemcsefinomító hatása van.

4. Hőkezelések

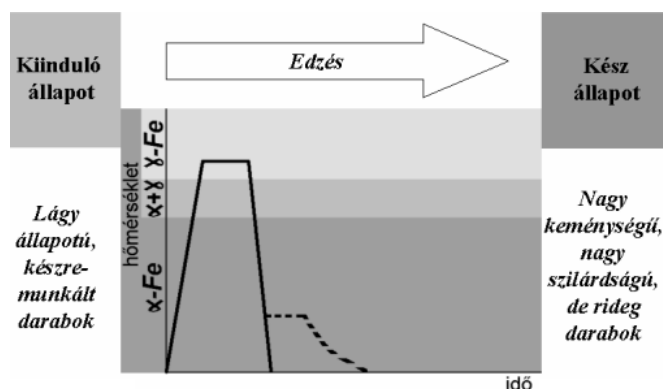
4.1. A műanyagalakító szerszámok hőkezelésére alkalmazott hőkezelési technológiák

A szerszámacélok tulajdonságait kémiai összetételük, valamint hőkezelési és feszültségállapotuk határozza meg. Kémiai összetételüket az acél gyártásakor szabják meg, ami ötvözők és szennyezőanyagok mennyiségének beállítását jelenti. Hőkezelési állapotukat, meghatározott kémiai összetétel esetén, egyrészt az alapanyaggyártás során alkalmazott kohászati melegalakító technológiák, másrészt a további feldolgozás során tudatosan alkalmazott hőkezelési eljárások alakítják ki. Saját feszültségállapotuk a gyártástechnológia alatt alakul ki a, hely függvényében változó, hevítési és hűtési ciklusok okozta eltérő hőtágulás, és az eltérő alakíthatóság miatt.

A műanyag - alakító szerszámokat lágyított szerszámacélokból, legtöbbször forgácsolással alakítják ki. Ezt követően edzeni, majd megereszteni kell a szerszámokat, amelyek során több szempontot is figyelembe kell venni.

Edzés:

Auszténitesítésből és azt követő edző hatású, gyors lehűtésből áll. Az auszténitesítés hőmérsékletét, idejét, és a lehűtés sebességét kompromisszumokkal lehet meghatározni. Az auszténitesítés követelményei a finom szemcsenagyság és a homogén szerkezet elérése, ugyanis ebből hozható létre a legnagyobb keménységű martenzit, amit később megereszttéssel a szerszámacélok számára legmegfelelőbb tulajdonságúvá alakíthatunk. Ez a két követelmény ellentmond egymásnak, mivel a homogenitás a hőmérséklet növelésével javul, viszont minél nagyobb a hőmérséklet annál nagyobb lesz a szemcsedurvulás is [8].



17.ábra. Edzés elvi vázlata [8]

Az ausztenitesítés paramétereit ebből kifolyólag optimalizálni kell az edzés során alkalmazott hűtési sebesség, és az azt követő megeresztés tulajdonságai függvényében.

A hűtési program szintén optimalizálást igényel, mivel nagyobb hűtési sebességnél vastagabb darabokban hozható létre martenzites szövetszerkezet, de ezzel megnő a repedés veszélye is.

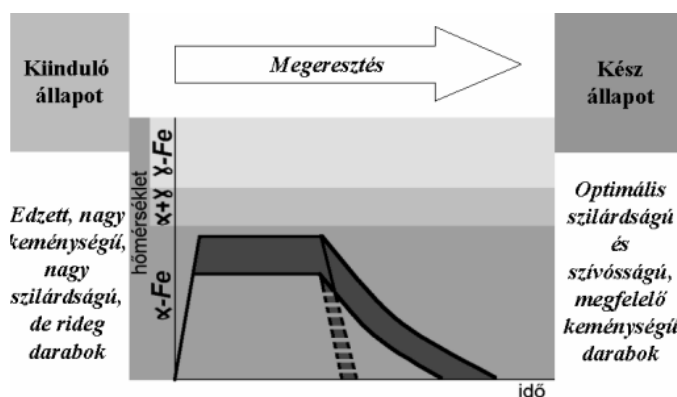
Ezek alapján - egy konkrét anyagminőségre és szerszámmra nézve - több szempont figyelembevételével lehet meghatározni a helyes hőkezelési technológiát.

Mivel a szerszámacélok többsége karbidképző elemekkel erősen ötvözött, ami miatt romlik a hővezető képességük két újabb dolgot is figyelembe kell venni. Először is a felhevítés során is repedést okozhat, így akár szükségszerű lehet a lépcsősen ausztenitesítési hőmérsékletre hevíteni. Másrészt az edzés hőmérsékleti igénye elérheti az 1000 - 1300 °C -t is, ami szokványos hőkezelő kemencékkel nem valósítható meg, így speciális berendezéseket igényelhet.

Az erős ötvözés következménye még, hogy a szükséges hűtési sebességigény alacsonyabb, ami miatt a lehűtés vákuumkemencében is megvalósíthatóvá válik.

Megeresztés:

Megeresztés során a megeresztett martenzites / szferoidites szövet elérése a cél, így, ha nem optimalizált az edzés, akkor semmilyen megeresztési technológiával nem lehet javítani rajta (martenzit hiány). Az előírt tulajdonságok (szilárdság, keménység, kopásállóság és korrózióállóság) eléréséhez kell választani megeresztési hőmérsékletet és időt [8].



18.ábra. Megeresztés elvi vázlata [8]

Minél nagyobb az edzés során létrehozott martenzit széntartalma, annál előbb indul meg a bomlása. A szénttartalmának csökkenésével a rács torzultsága kezd megszűnni, közel szabályos rendszerűvé alakul át, ennek hatására az acél fajtérfogata, mérete csökken, és enyhül az ebből fakadó belső nyomás is, aminek következtében emelkedik a martenzit-átalakulás kiinduló (M_s) és véghőmérséklete (M_f), ami lehetővé teszi, hogy a maradék ausztenit lehűléskor martenzitté alakuljon át. [7,9].

Mélyhűtés:

Edzés után a nagy szén- és ötvözőtartalmú acélokban a martenzit között mindig marad átalakulatlan ausztenit, mivel az ilyen acélok martenzites átalakulásának befejező hőmérséklete (M_f) az edzés befejezésének hőmérséklete alatt (általában szobahőmérséklet) van. A maradék ausztenit nem minden esetben kedvező hatású, ezért ilyenkor lehetővé kell tenni martenzitté való alakulását. Ennek legkézenfekvőbb módja, ha a szerszámot tovább hűtik, megközelítve, vagy átlépve az M_f hőmérsékletet.

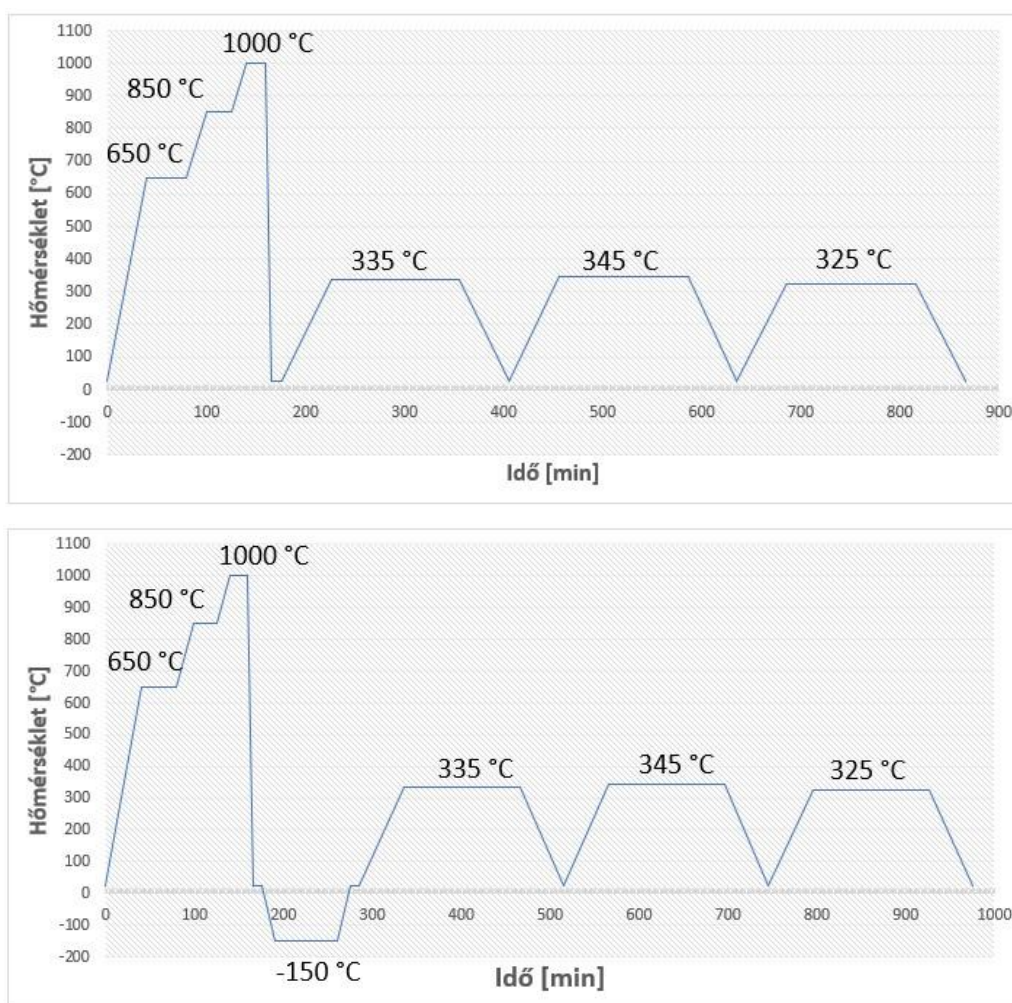
A mélyhűtést közvetlenül az edzés után célszerű elvégezni, rövid időn belül, mivel a maradék ausztenit stabilizálódhat, így nehezen alakul át [10,11].

4.2. Alkalmazott hőkezelések

A hőkezelésekhez a Titán 94 Kft. hőkezelőjét használhattam Dr. Tóth László Tanár Úr segítségével.

Az alkalmazott hőkezelések legfontosabb céljai a megeresztett martenzites szövet elérése, a lehető legkevesebb maradék ausztenit mellett, valamint a létrejövő karbidok, és szabad króm finom, diszperz eloszlása [12]. Mindezek együtt alkotnak olyan szövetszerkezetet, amely biztosítani tudja a megkívánt kopásállóságot és korrózióállóságot.

Ennek megvalósítása érdekében a szakirodalmat és a legfrissebb kutatási anyagokat tanulmányozva arra a megállapításra jutottam, hogy egy magas hőmérsékletű ausztenitesítést követő edzést követően mélyhűteni kell a munkadarabot, amit három megeresztés követ különböző hőmérsékleteken (19. ábra, alsó kép).



19.ábra. Hőkezelési diagramok

Hogy ennek eredményességéről megbizonyosodjak, két, egy lépésben eltérő, eljárással végeztem hőkezeléseket. Első alkalommal az iparban elterjedt „hagyományos” módon, edzést követően háromszor megeresztve a próbatesteket (19. ábra, felső kép). A másik eljárás során az ausztenitesítést követő lehűtés (edzés) után mínusz 150 °C -ig tovább csökkentve a hőmérsékletet (mélyhűtés) átlépve a martenzit átalakulás befejező (M_f) hőmérsékletét [13], és csak ez után következik a három megeresztés.

A magas hőmérsékletű ausztenitesítés azért szükséges, hogy minél finomabb nagyságú, és homogénebb eloszlású szemcsék jöjjenek létre. Arra vigyázni kell, hogy ne legyen túl magas ez a hőmérséklet, mivel az ugyan növeli a homogenitást, de már szemcsedurvulást eredményez. A szakirodalom, és a voestalpine Böhler Kft. katalógusa a 950 – 1100 °C -os tartományt ajánlja [5,7].

A szerszámacél karbidképző elemekkel erősen ötvözött, ami rontja hővezető képességét, így a repedésveszély elkerülése végett elengedhetetlen a lépcsős hevítés alkalmazása, ami a munkadarab magja és felülete közötti hőmérsékletkülönbség kiegyenlítésében segít.

Az ausztenitesítés után olyan sebességgel kell lehűteni a munkadarabot, amivel diffúziómentes átalakulásra kényszerítjük, ezzel a kívánt martenzites szövetszerkezetet létrehozva. A nagy mennyiségű ötvözőtartalom viszont a martenzites átalakulás befejeződésének hőmérsékletét (M_f) olyan mértékben csökkenti, hogy nem tud az összes ausztenit martenzitté alakulni. A maradék ausztenit csökkenti a keménységet, valamint belső feszültséget okoz a hőkezelt termékben. Ezeken felül belső energiájának növekedésével (pl.: hőközléssel, vagy terhelés hatására) lebomlik ezáltal további méretváltozást és belső feszültségeket okoz, mely a későbbiekben idő előtti szerszámtöréshez vezethet.

A maradék ausztenit csökkentéséhez a legelterjedtebben három megeresztést alkalmaznak, ez további, később részletezett, előnyökkel is jár [14].

Több publikáció szerint mélyhűtéssel tovább csökkenthető a maradék ausztenit [15,16]. Ennek alkalmazásának előfeltétele az ilyen hőmérsékleten is üzemeltethető kemencék, valamint a megfelelő hűtőközeg megléte.

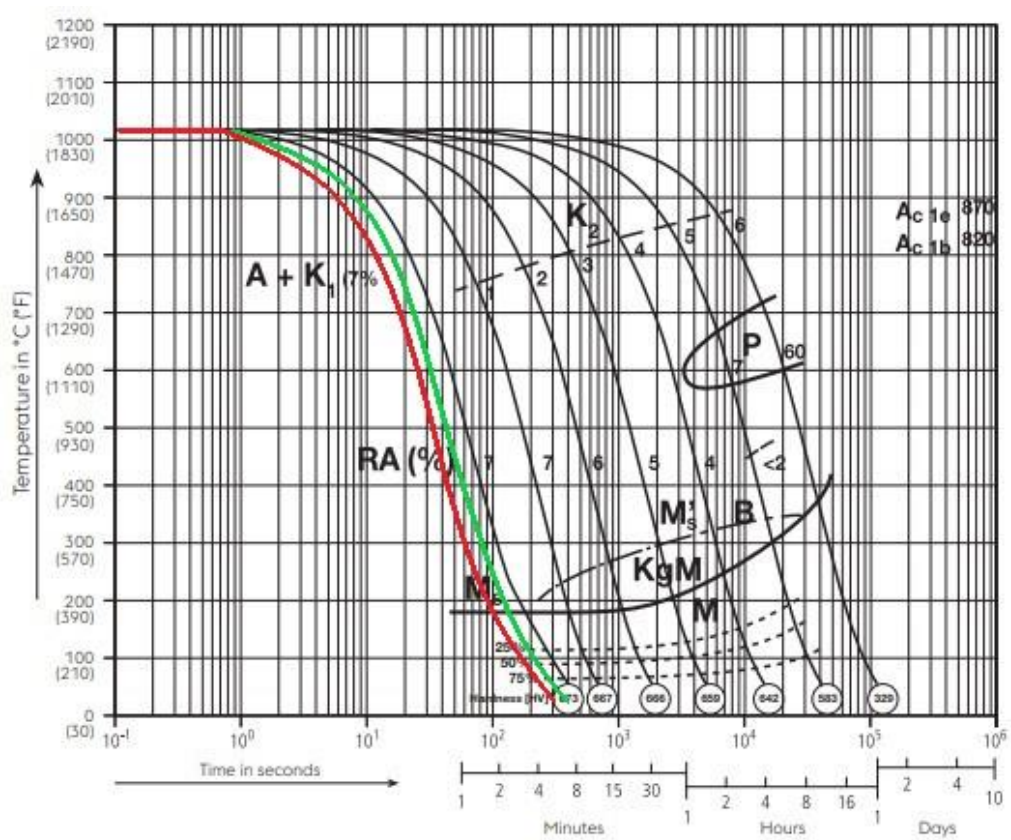


20.ábra. IU72/1F 2RV 60x60x40 10 bar CP Schmetz típusú vákuum kemence és szabályozó berendezése

Az edzéshez és mélyhűtéshez, valamint az első megeresztéshez IU72/1F 2RV 60x60x40 10 bar CP Schmetz típusú vákuum kemencét, a további megeresztésekhez egy Muhel E/NV típusú nitrogén védőgázos megeresztő kemencét (21. ábra) használtam. Az előbbi alkalmas $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet intervallumban működni. Az ausztenitesítési hőmérsékletre hevítés a Schmetz vákuum kemencében három lépcsőben történt, először $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, majd $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A_{c1} és A_{c3} átalakulási hőmérsékletek alatt) és $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on. Ezt követően 9 bar nyomású nitrogén gázban következett az edzés szobahőmérsékletig hat perc alatt, utána a kemence átállási idejét követően megkezdődött a hőmérséklet $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra csökkentése folyékony nitrogén segítségével, majd 70 percig ezen a hőmérsékleten volt tartva (mélyhűtés), hogy a lehető legnagyobb térfogatban bekövetkezzen a martenzites átalakulás. Az első megeresztés után a próbatestet átvittem a Muhel nitrogén védőgázos megeresztő kemencébe.



21.ábra. Muhel E/NV típusú nitrogén védőgázos megersztő kemence



22.ábra. Böhler M340 ISOPLAST szerszámacél folyamatos hűtési diagramja („C” görbéje) [5]

A 22.ábrán megfigyelhető a Böhler M340 ISOPLAST szerszámacél folyamatos hűtési diagramja, amelybe belerajzoltam az általam hőkezelt próbatestek lehűlési görbéit. Zölddel a mag lehűlési görbáját, pirossal a felület lehűlési görbáját ábrázoltam. Ugyanis a hőkezelések során a kemence hőmérsékletét egy hasonló méretű, tömegű és hőtani tulajdonságokkal rendelkező próbatest furatában lévő termoelem szabályozta. Ezáltal biztosítva, hogy a teljes keresztmetszetben a megfelelő hőmérsékletűek legyenek a próbatestek.

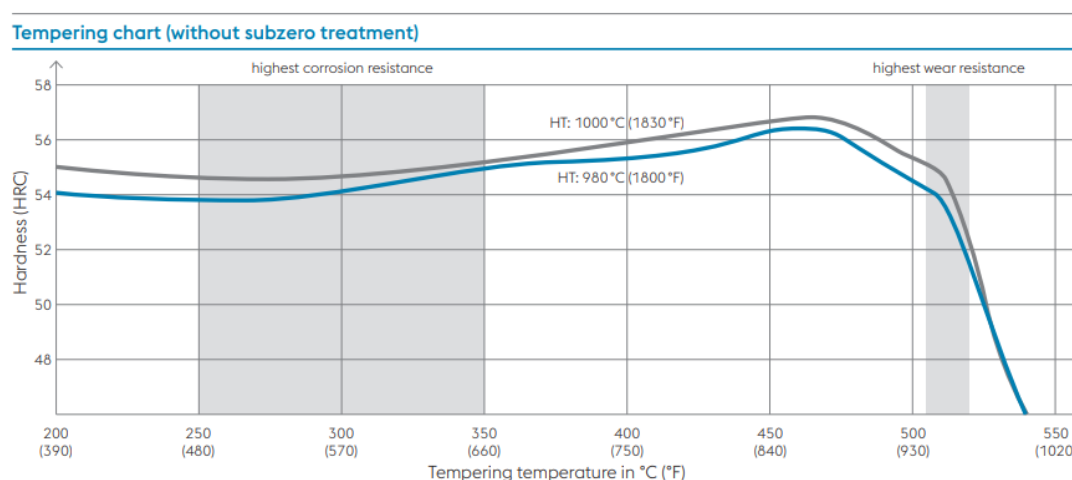


23.ábra. Cseppfolyós nitrogén tárolók a Titán 94 Kft -nél, bal (4 bar) cseppfolyós alkalmazáshoz, jobb (14 bar) gáz halmazállapotú használatra

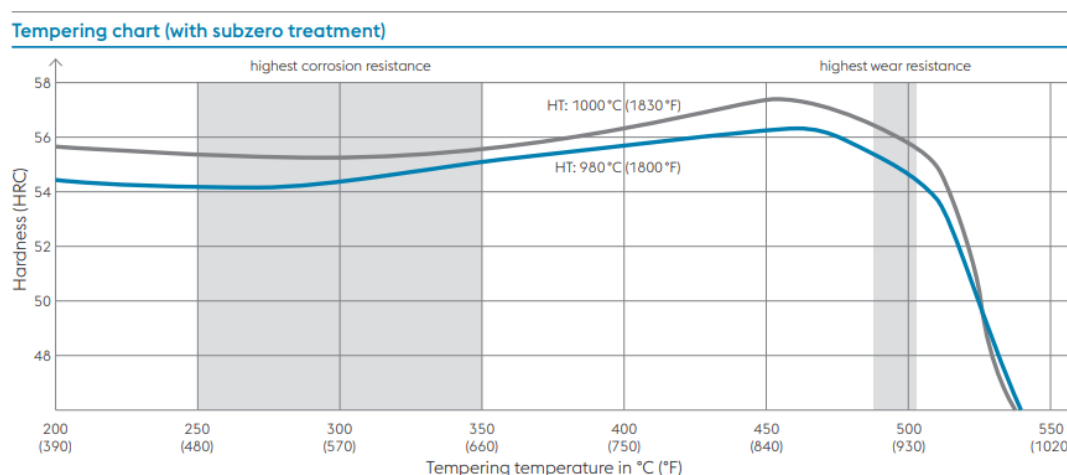
A hűtésekhez használt nitrogént a gyárépület oldalánál elhelyezett tartályokban tárolják (23. ábra.) A cseppfolyós halmazállapotú felhasználás során az alacsonyabb nyomású (4 bar) tartályból, közvetlenül a folyadéktérbe kötött csokon keresztül, áramlik a csőhálózat többi részébe a folyékony nitrogén. Erre a folyadék melegedésének minimalizálása érdekében van szükség. A gázhalmazállapotú felhasználáshoz a szintén cseppfolyós közeget tartalmazó tartály nyomása nagyobb (14 bar). Ebből a tartályból az elvétel szintűgy a folyadéktérből közvetlenül történik, de az elvételi csővezeték „U” alakban a

folyadékszint fölé emelkedik, ezáltal közlekedő edényként működik nyugalmi állapotban. Az elgázosítás a kriogén tartályhoz tartozó elpárolgatóban megy végbe.

Három eltérő hőmérsékletű megeresztés szükséges. Az egyes megeresztések hőmérsékleteit az elérni kívánt tulajdonság (magas korrózióállóság melletti kopásállóság) függvényében választottam ki az acél, gyártó által biztosított, megeresztési diagramjai alapján (24-25. ábra).



24.ábra. A Böhler M340 ISOPLAST szerszámanyag megeresztési diagramja mélyhűtés nélküli, hagyományosan hőkezelt próbatesteket feltételezve [5]



25.ábra. A Böhler M340 ISOPLAST szerszámanyag megeresztési diagramja mélyhűtött próbatesteket feltételezve [5]

Az első megeresztés során 335 °C -ra hevítünk. Ez azt a célt szolgálja, hogy az edzés során az anyagban létrejött feszültségeket csökkentse, illetve a maradék ausztenitet destabilizálja. A második megeresztést 345 °C -on végeztem. Ez a legmagasabb alkalmazott megeresztési hőmérséklet. Tovább segíti a maradék ausztenit martenzitté alakulását, illetve ezzel állítjuk be a kívánt keménységet, és kopásállóságot. Ahogy a diagramokról (24-25. ábra) is leolvasható, a 250 - 350 °C hőmérséklet-tartományon végzett megeresztéssel tudjuk elérni a legjobb korrózióállóságot, ezen belül, a 350 °C -hoz közel pedig a legnagyobb keménységet, ami a kopásállóságot javítja. A harmadik megeresztés 325 °C -on történt. Lényege a feszültségcsökkentés és hogy az előző megeresztés során kialakult szerkezetet stabilizálja és hogy létrejöjjön egy diszperz, homogén karbid-eloszlású szövet.

Mivel az ebben a dolgozatban ismertetett mindkét munkadarab azonos hőmérsékleteken volt megeresztve, így ezt most nem tudtam vizsgálni, de a megeresztés hőmérséklete mégis egy fontos tényező mind a korrózióállóság, mind a kopásállóság szempontjából. Jelen szerszámanyag, mint minden nagy mennyiségű karbidképző ötvözt tartalmazó acélminőség, szekunder keményedésre hajlamos. Az ezzel elérhető keménységnövekedés, és intenzívebb karbidkiválások jobb kopásállósági tulajdonságokat biztosítanak, de ekkor az anyagban lévő króm nagy része ezekben a karbidokban fog elhelyezkedni, így nem tud a felületen egy passzív oxidhártyát alkotni. Ekkor a korrózióállósága jelentős mértékben romlani fog. A választott 345 °C -os, legmagasabb, megeresztési hőmérséklettel az volt a célom, hogy a gyártó által ajánlott legjobb korrózióállóságú tulajdonságokkal rendelkező tartományban maradván ugyan, a lehető legnagyobb keménységet érjem el. Ezáltal jobb kopási tulajdonságokkal rendelkező szövetet kapjak a jó korrózióállósági tulajdonság megtartása mellett.

5. Vizsgálatok

Az eredmények kiértékeléséhez keménységmérést, valamint kopásállósági, korrózióállósági, és mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálatokat végeztem. Ezek teszik lehetővé, hogy az elért tulajdonságokat a megfelelő módon ellenőrizhessem [17]. A keménységmérés és a mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálat a Titán 94 Kft. Lőrinci üzemében található laborjában történt. A koptatóvizsgálatot az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar anyagvizsgáló laborjában végeztem. A korrózióállósági vizsgálat az egyetem Fizika-kémia laboratóriumában készült. Az utóbbi két vizsgálathoz 4-4 próbatestet a Duna Precíziós Kft. szerezte le egy Charmilles FI 240 SLP típusú huzalszikra forgácsoló gép segítségével.

A huzalszikra forgácsolással kellően alacsony felületi érdességet érhetünk el a vágott felületeken [18]. Emellett a megmunkálás során alkalmazott hűtő közeg biztosítja, hogy a levágott próbatestek tulajdonságai (keménysége, kopásállósága, szövetszerkezete) ne változzanak meg. Egy ilyen huzalszikra forgácsoló gép munkaterét szemlélteti az alábbi 26.ábra:



26.ábra. Charmilles FI 240 SLP huzalszikra forgácsoló gép

5.1. Keménységmérés

Dr. Tóth László Tanár Úr segítségével a Rockwell C típusú keménységmérést egy Ernst AT130 D típusú (27.ábra.) univerzális keménységmérővel végeztem. A Brinell keménység-mérésnél edzett acélgolyó, a Rockwell mérésnél gyémántkúpos szűrő szerszámot használtam.



27.ábra. Ernst AT130 D típusú keménységmérő gép

A lágyított állapotban szállított rúdanyagból levágott próbatestek keménységértékei: 251-252-252 HB, átlagosan 252 HB voltak.

A két hőkezelési eljáráson átesett próbatestek felületén három - három mérés készült, rendre a hagyományosan hőkezelt próbatesten 55-55-54 HRC, a mélyhűtött próbatesten 56-55-56 HRC értékeket olvastam le a keménységmérőről.

Az átlagolt eredményeket az alábbi táblázat (2. táblázat) tartalmazza.

2.táblázat. Keménységmérési eredmények átlaga

	Szállítási állapotban	Hagyományosan hőkezelt	Mélyhűtött
Brinell keménység (HB)	252	-	-
Rockwell keménység (HRC)	-	55	56

A keménységmérés során elért értékek alapján az a következtetés vonható le, hogy a mélyhűtéssel, kis mértékben ugyan, de sikerült növelni a keménységet.

5.2. Mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálat

A vizsgálathoz a próbatesteket megfelelő módon ki kellett munkálni (28. ábra) a hőkezelt darabokból. Semmilyen hatás nem érheti őket eközben, ami az acél szövetszerkezetét megváltoztatná (termikus, mechanikai behatások). Az optikai fénymikroszkóppal történő vizsgálathoz egyenletes síkfelületet kell képezni, ami a róla visszaverődő fényt torzítás, szóródás nélkül vissza tudja adni. Ehhez célszerű a próbatestek műgyantába történő beágyazása, a könnyebb kezelhetőség miatt, és hogy elkerüljük a minták széleinek lekerekedését.



28.ábra. Metkon Servocut 302 típusú vágógép

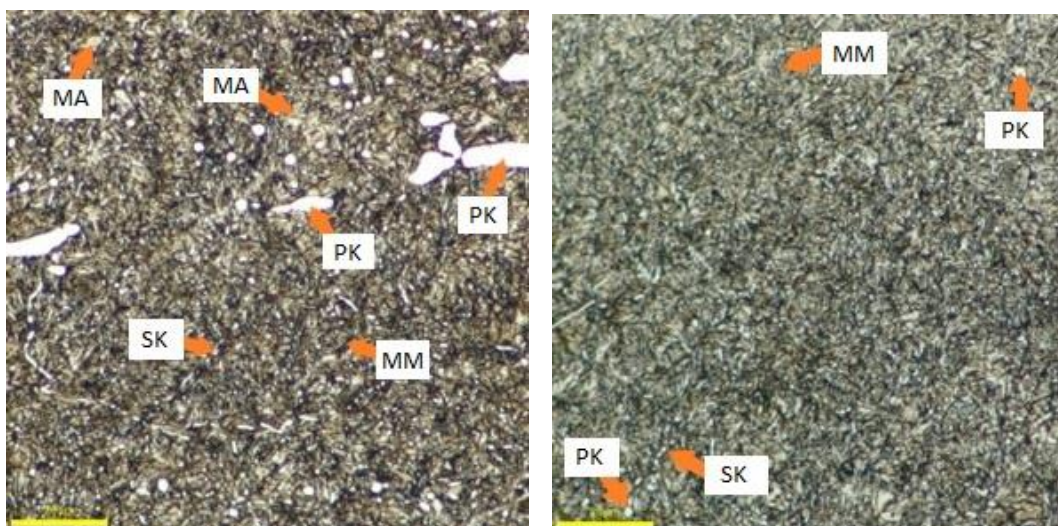


29.ábra. Csiszoló/polírozó gép (Metcon Forcipol 102) (bal), mikroszkóp (Olympus CKX53) (jobb)

A beágyazás után csiszolni, polírozni kell, odafigyelve a megfelelő hűtésre is eközben. Ezután maratni kellett a felületet, hogy láthatóvá tegyük az acél szövetszerkezetét. A maróanyag 5 % -os Nital oldat volt (alkohol és salétromsav oldata).

Az előkészített csiszolatokról mikroszkópos felvételeket készítettem egy Olympus CKX53 mikroszkóppal, és a hozzá kapcsolt számítógéppel, Dr. Tóth László Tanár Úr segítségével.

A képeken jól láthatóak az eltérő hőkezelések hatásai. A 30. ábra bal oldalán a hagyományos hőkezeléssel készült próbatest szövete látható. Könnyen kivehetőek rajta a nagy méretű primer karbidok, és a maradék ausztenit jelenléte. A jobb oldali képen a mélyhűtéssel hőkezelt próbatest szövetképét figyelhetjük meg. Feltűnik a szekunder karbidok finom diszperz eloszlása, és a maradék ausztenit minimalizálódása.



30.ábra. Szövetképek: hagyományos hőkezelés eredménye (bal), mélyhűtés közbeiktatásával kezelt (jobb) (lépték 20 μm)

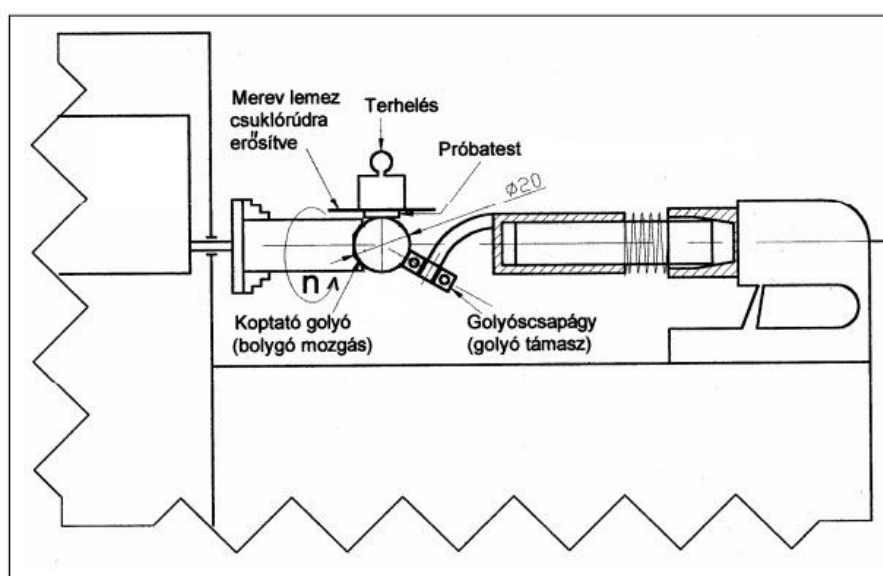
Az ábrán alkalmazott jelölések:

- MA: maradék ausztenit
- PK: primer karbid
- SK: szekunder karbid
- MM: megeresztett martenzit

Ezek a megfigyelések magyarázatot nyújtanak a későbbiek folyamán bemutatott, vizsgálatok során kapott eredményekre.

5.3. Koptatóvizsgálat

A koptatóvizsgálathoz a kétféleképpen hőkezelt munkadarabokból a Duna Precíziós Kft. - Dr. Tóth László közbenjárásával - kérésemre 1,5 mm vastag 35 mm x 18 mm -es téglatesteket vágott le, kettőt - kettőt. A próbatestek kopásának mértékét az egyetem tulajdonában lévő koptató berendezésen ellenőriztem. A koptató berendezés elvi elrendezése az alábbi ábrán (31.ábra) látható.



31.ábra. A koptató berendezés elvi elrendezése [19]

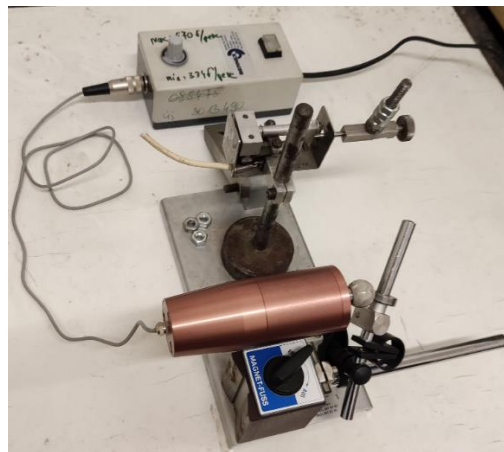
A fenti ábrán látható berendezés gömb- és síkfelület érintkezésének kölcsönhatásán alapszik [19]. Kezdeti állapotban érintkezésük pontszerű. A kopási folyamat előrehaladtával a próbatesten egy gömbsüveg alakú kráter keletkezik. Ez a felület a koptatógolyó formáját követve másolódik rá a próbatestre, miközben anyagot választ le róla. A kopás intenzitását így a koptatóvizsgálat során levált anyagmennyiség meghatározásával írhatjuk le leginkább [20].

A kísérlet során a koptató golyó felületi érdessége szinte nem változik, mivel a golyó bolygó mozgást végez, ezáltal nem mindig ugyan azon a felületen érintkezik a próbatesttel [21]. Ahogy telik az idő, a kopási kráter egyre mélyül, és az érintkező felületek is egyre nagyobbak lesznek. Ezáltal a fajlagos felületi terhelő erő az idő függvényében, a kopás mértékének megfelelően, folyamatosan változik, csökken [22,23].

A négy darab, csiszolt felületű, vizsgált próbatesten (32.ábra), darabonként három ponton, 5 perces koptatást hajtottam végre, mivel, mint azt az előbb részleteztem, a koptató hatás az idő előrehaladtával egyre inkább csökken. A koptató golyó rögzítése és a meghajtás kialakítása a 33. ábrán látható. A próbatestek befogását, és a terhet pedig a 34. ábra szemlélteti.



32.ábra. A koptatóvizsgálat próbatestei (jobb oldali kettő a mélyhűtött)



33.ábra. A koptató golyó rögzítése, meghajtásának kialakítása



34.ábra. Próbatest befogó

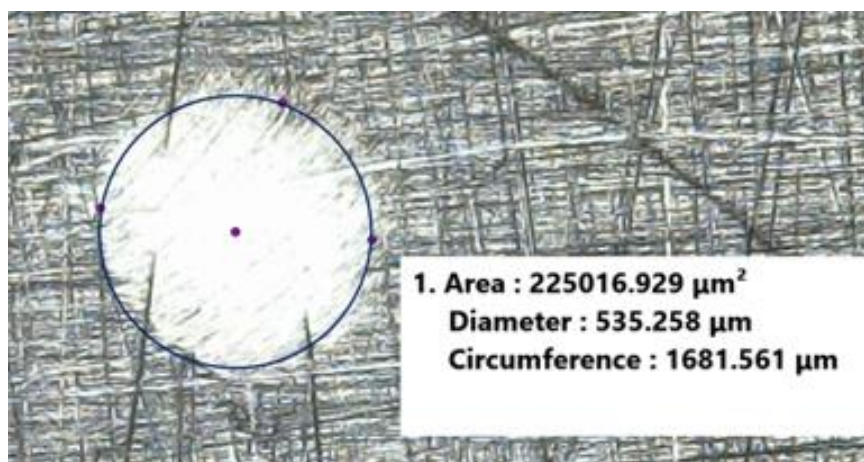
A vizsgálat során a hajtás állandó fordulatszáma $n = 570$ [1/ min] volt. A próbatest befogón keresztül a golyóra nehezedő teher 78,0 g, ezt az anyagvizsgáló laborban lemértem, ehhez hozzájön a befogott próbatest saját tömege, ami 7 g. Így összesen 85 g a terhelő tömeg. A kerámia golyó anyagminősége Al_2O_3 , átmérője 20 mm. A szoba hőmérséklete $21\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ volt. A kísérlet során nem alkalmaztam kenőanyagot, minden vizsgálat előtt alkoholba mártott kendővel megtöröltem a próbatesteket, és forgás közben finoman a golyót, a támasztócsapágyat, és a meghajtás tengelyvégződését is, majd megvártam, amíg elpárolog a használat előtt. Ezzel a zsírtól, és egyéb szennyezőelemektől is megtisztítottam az érintkező felületeket.

A kopásminták lemerése az Olympus DSX10-BSW típusú optikai elven működő mikroszkóppal, és a hozzá tartozó számítógépes program segítségével történt (35.ábra.). Minden alkalommal 3 pont kijelölésével határoztam meg a kopásmintára illesztett kört, aminek átmérőjét felhasználtam a későbbi számítások során.

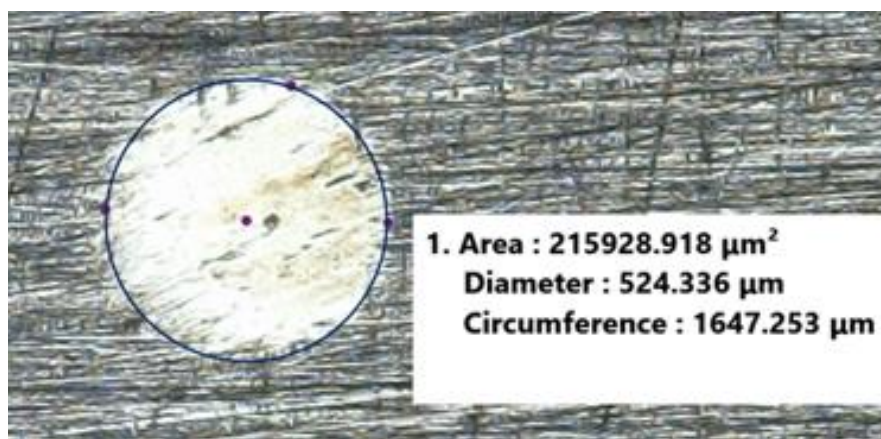


35.ábra. Olympus DSX10-BSW típusú mikroszkóp és szoftvere

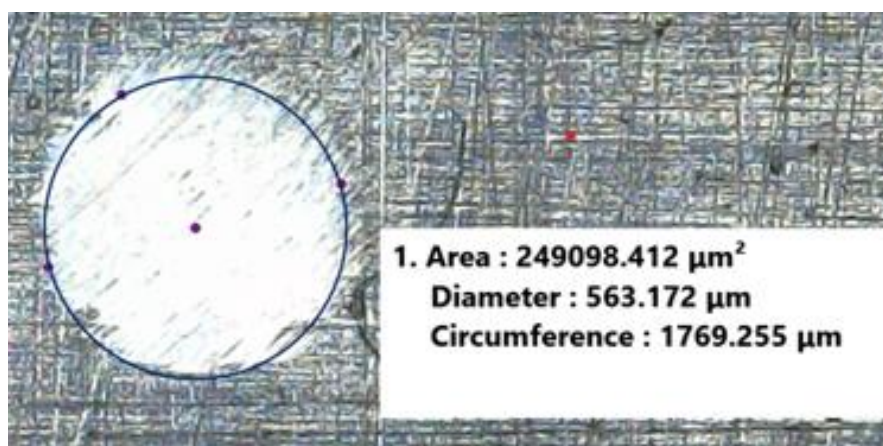
Az alábbiakban megmutatom a mintákról készített felvételeket, majd utánuk a kopási tényező meghatározásához szükséges számításokat ismertetem. Végül táblázat formájában (3. táblázat) összegzem a számított értékeket.



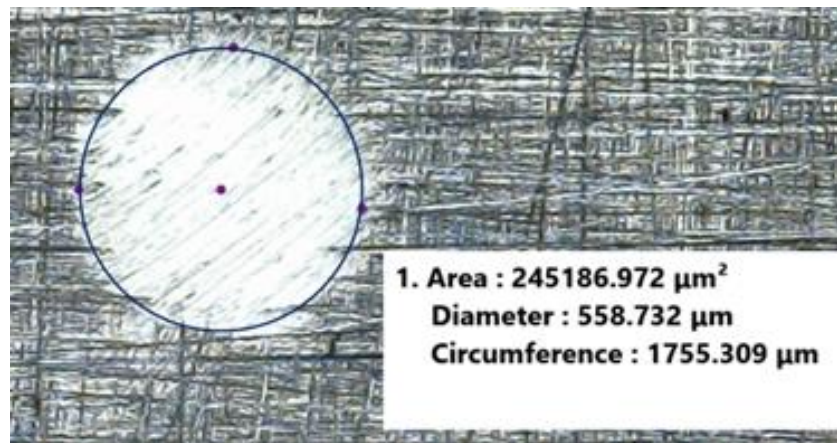
36.ábra. Az első minta 1. kopási képe



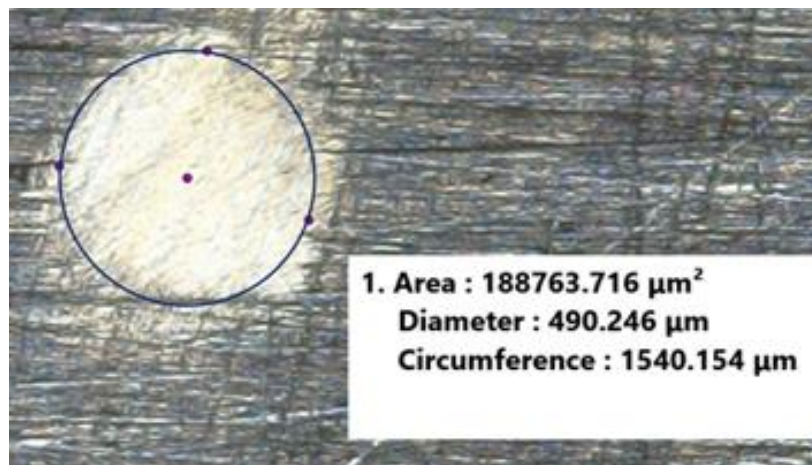
37.ábra. Az első minta 2. kopási képe



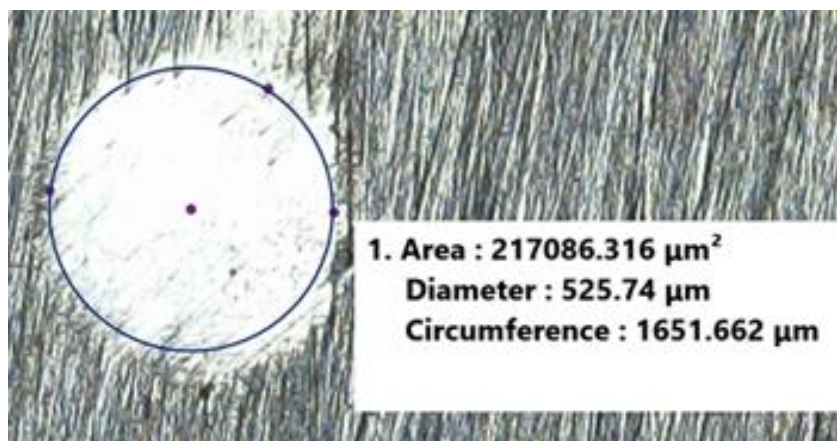
38.ábra. Az első minta 3. kopási képe



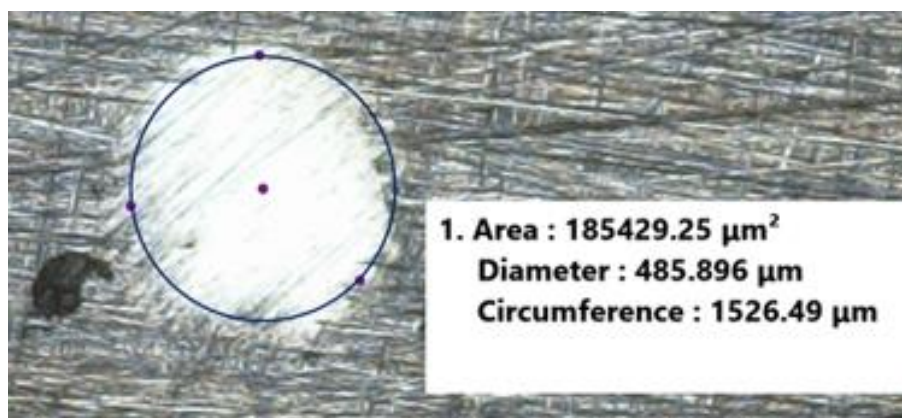
39.ábra. A második minta 1. kopási képe



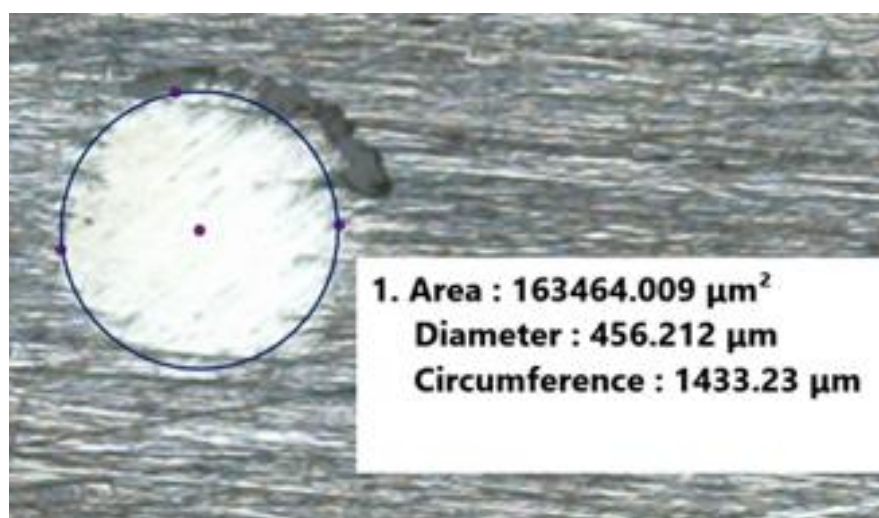
40.ábra. A második minta 2. kopási képe



41.ábra. A második minta 3. kopási képe



42.ábra. A harmadik minta 1. kopási képe



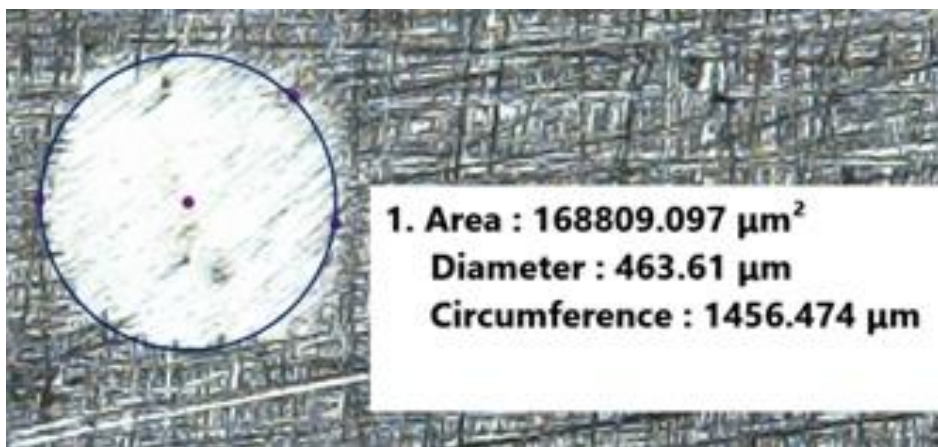
43.ábra. A harmadik minta 2. kopási képe



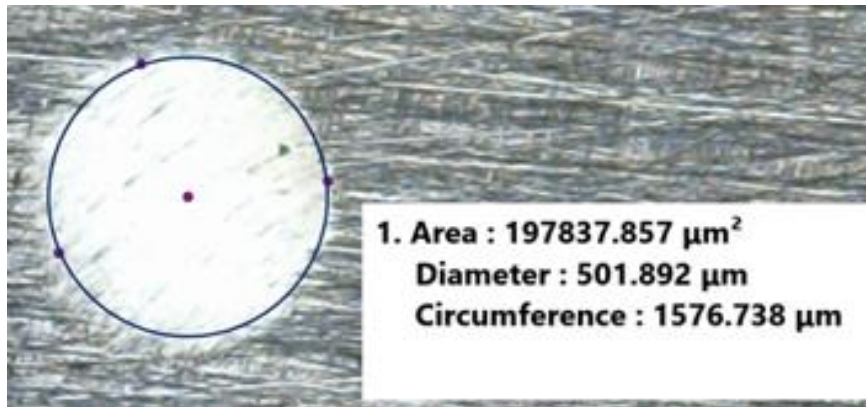
44.ábra. A harmadik minta 3. kopási képe



45.ábra. A negyedik minta 1. kopási képe



46.ábra. A negyedik minta 2. kopási képe



47.ábra. A negyedik minta 3. kopási képe

A kopási tényező (K) az (5.3.1) -es egyenlet szerint [19] a leválasztott térfogat (V_v), valamint a kopási úthossz (S) és a terhelő normálerő (N) ismeretében kiszámítható.

$$K = \frac{V_v}{S \times N} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right] \quad (5.3.1)$$

A kopásmélység (h), a kopási térfogat (V_v), és a kopási úthossz (S) meghatározásához rendre a (5.3.2), (5.3.3), (5.3.4) egyenleteket használtam [19].

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad [mm] \quad (5.3.2)$$

$$V_v = \frac{h \times \pi}{6} \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right) [mm^3] \quad (5.3.3)$$

$$S = n \times 2R \times \pi \times t [m] \quad (5.3.4)$$

Amelyekben:

- R : a golyó sugara [mm]
- r : a kopásnyomra illesztett kör sugara [mm]
- d : a kopásnyomra illesztett kör átmérője [mm]
- n : a golyó fordulatszáma [1/min]
- t : a koptatás időtartama [min]

Az alábbiakban levezetek egy számítást az 1,1 -es kopásmintán, majd a további számítások eredményeit táblázatos formában összesítve közlöm a 3. táblázatban.

A kopásnyomra illesztett körnek a mikroszkóp szoftverének segítségével mért átmérője:

$d = 0,535258 \text{ mm}$

A koptatógolyó átmérője:

$D = 20 \text{ mm}$

A kopásnyom mélysége az 5.3.2 képletet használva:

$$h = \left(\frac{20 \text{ mm}}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{20 \text{ mm}}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,535258 \text{ mm}}{2} \right)^2} = 0,0036 \text{ mm}$$

Tehát a gömbsüveg mélysége:

$h = 0,0036 \text{ mm}$

Innentől már kiszámítható a kopási térfogat az 5.3.3 képletet alkalmazva:

$$V_v = \frac{0,0036 \text{ mm} \times \pi}{6} \left(\frac{3}{4} (0,535258 \text{ mm})^2 + (0,0036 \text{ mm})^2 \right) = 0,4031 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$$

Ez alapján a kopási térfogat:

$V_v = 0,0004031 \text{ mm}^3$

A kopási úthossz számításához az 5.3.4 egyenletet, valamint az állandó fordulatszámot és koptatási időt felhasználva:

$$S = 570 \frac{1}{\text{min}} \times 2 \frac{(20 \text{ mm}) \times 10^{-3}}{2} \times \pi \times 5 \text{ min} = 179,07 \text{ m}$$

A kopási úthossz így:

$$S = 179,07 \text{ m}$$

Itt megjegyezném, hogy a kopási úthossz minden egyes mintánál megegyezik, mivel a fordulatszám (n), a koptató golyó átmérője (D) és a koptatás időtartama (t) minden mérésnél azonos volt.

A terhelő normálerő számítása az alábbi (5.3.5) képlet szerint történt, ahol

- m_b : a befogó kialakítása által átadott tömeg;
- m_p : az egyes próbatestek saját tömege (állandó);
- g : a gravitációs gyorsulás

$$N = (m_b + m_p) \times g \text{ [N]} \quad (5.3.5)$$

$$N = \frac{78 \text{ g} + 7 \text{ g}}{1000} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,834 \text{ N}$$

Tehát a koptatás során az állandó terhelő erő:

$$N = 0,834 \text{ N}$$

Mindezek ismeretében számítható a kopási tényező az 5.3.1 képlet szerint:

$$K = \frac{0,4031 \times 10^{-3} \text{ mm}^3}{179,07 \text{ m} \times 0,834 \text{ N}} = 2,6991 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$$

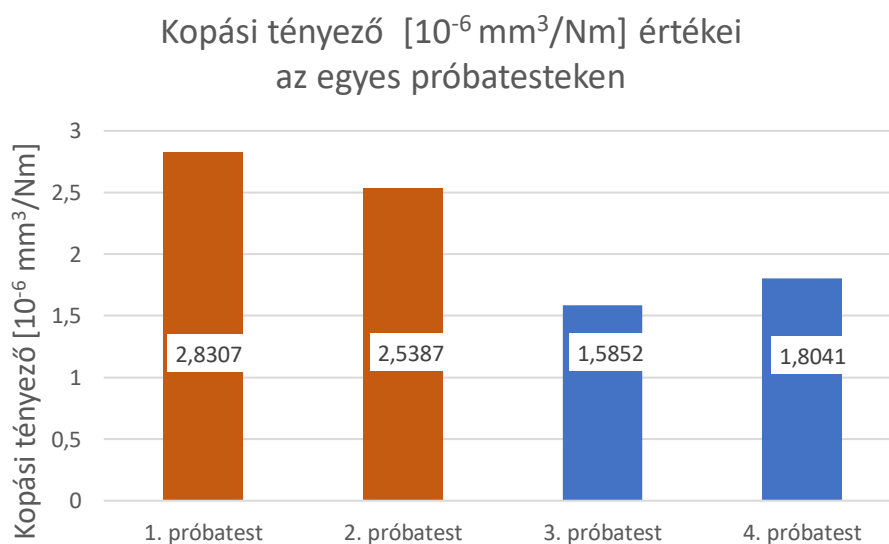
A végeredményként kapott kopási tényező értéke:

$$K = 0,0000026691 \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

A mért és számított adatok összegezve:

3.táblázat. Koptatási eredmények táblázata

Próbatest száma, rajta lévő kopási minta száma	Kopási idő (t) [min]	Kopás mélység (h) [mm]	Kopási térfogat (V_v) [mm ³]	Kopás-nyom (d) [mm]	Kopási út (S) [m]	Kopási tényező (K) [mm ³ /Nm]
1,1	5	0,0036	$0,4031 \cdot 10^{-3}$	0,535258	179,07	$2,6991 \cdot 10^{-6}$
1,2	5	0,0034	$0,3711 \cdot 10^{-3}$	0,524336	179,07	$2,4853 \cdot 10^{-6}$
1,3	5	0,0040	$0,4939 \cdot 10^{-3}$	0,563172	179,07	$3,3077 \cdot 10^{-6}$
2,1	5	0,0039	$0,4785 \cdot 10^{-3}$	0,558732	179,07	$3,2046 \cdot 10^{-6}$
2,2	5	0,0030	$0,2836 \cdot 10^{-3}$	0,490246	179,07	$1,8993 \cdot 10^{-6}$
2,3	5	0,0035	$0,3751 \cdot 10^{-3}$	0,52574	179,07	$2,5121 \cdot 10^{-6}$
3,1	5	0,0030	$0,2736 \cdot 10^{-3}$	0,485896	179,07	$1,8328 \cdot 10^{-6}$
3,2	5	0,0026	$0,2126 \cdot 10^{-3}$	0,456212	179,07	$1,4242 \cdot 10^{-6}$
3,3	5	0,0027	$0,2237 \cdot 10^{-3}$	0,462048	179,07	$1,4985 \cdot 10^{-6}$
4,1	5	0,0029	$0,2697 \cdot 10^{-3}$	0,484158	179,07	$1,8067 \cdot 10^{-6}$
4,2	5	0,0027	$0,2268 \cdot 10^{-3}$	0,46361	179,07	$1,5189 \cdot 10^{-6}$
4,3	5	0,0031	$0,3115 \cdot 10^{-3}$	0,501892	179,07	$2,0863 \cdot 10^{-6}$



48.ábra. A kopási tényező próbatestenként átlagolt értékei diagramban

A diagramon rozsdás színnel ábrázoltam a hagyományosan hőkezelt, kékkel a mélyhűtött próbatesteket.

A 4. táblázatban átlagoltam a kapott eredményeket:

4.táblázat. Átlagolt kopási értékek

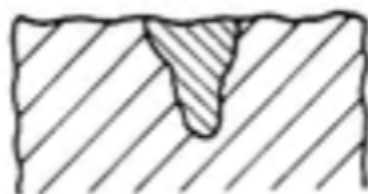
Kopási tényező átlagok		
1. próbatest	2,8307*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm
2. próbatest	2,5387*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm
3. próbatest	1,5852*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm
4. próbatest	1,8041*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm
Nem Mélyhűtött	2,6847*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm
Mélyhűtött	1,6946*10 ⁻⁶	mm ³ /Nm

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a mélyhűtéssel javítható a szerszámanyag kopásállósága. Ez a diszperz, homogén karbideloszlásnak tulajdonítható, amit a szövetszerkezetről készült felvételen is láttunk.

5.4 Korrózióállósági vizsgálat

A korrózióállósági vizsgálatához Haraszti Ferenc Tanár Úr segítségét kértem. A vizsgálat során az ASTM G48-11R20E01 szabvány [24] előírásait követtük (American Society for Testing and Materials). Ez egy egyszerű merítési teszt, amely során a rozsdamentes acélok és nikkeltövezetek lyuk- és réskorrózióval szembeni ellenállását értékelik. A szabvány szerint a teszt során az előzetesen lemerített felületű, és tömegű próbatesteket vas-klorid (FeCl_3) oldatban állandó hőmérsékleten 72 óráig állni hagyjuk. A vas-klorid oldat egy kellően agresszív környezetet teremt a korrózió elősegítésére, a kloridionok jelenléte, az oxidáló körülmények, és az alacsony pH értéke miatt [25]. A szabvány hat módszert tartalmaz, A -tól F -ig. Az A és B módszer meghatározza a súlycsökkenést állandó hőmérsékletű ($22\text{ }^\circ\text{C}$, vagy $50\text{ }^\circ\text{C}$ az ajánlott), 6 %-os vas-klorid (FeCl_3) oldatban. Az A módszer a lyukkorróziót vizsgálja, a B módszer pedig a réskorróziót.

Én az A módszert választottam az újrahasznosított PVC alapanyagból készülő granulálás során jelen lévő körülmények miatt.



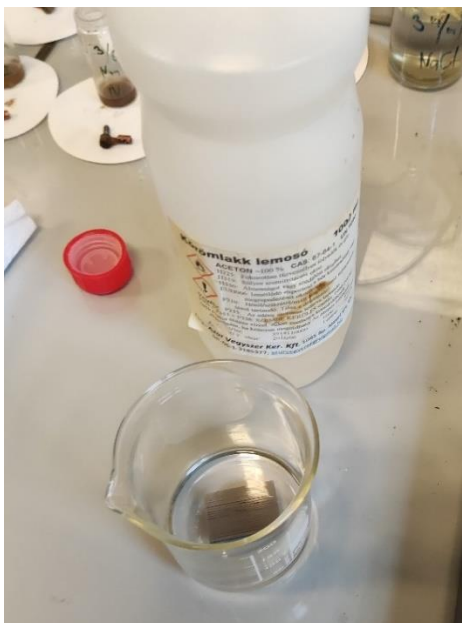
49.ábra. Lyukkorrózió szemléltetése [26]

A lyukkorrózió (pitting) az egyik legveszélyesebb és leggyakrabban előforduló korróziófajta. Az idő előrehaladtával szabálytalan alakú lyukak alakulnak ki a korrózióknak kitett felületen. Ezt követően egyre intenzívebbé válik a folyamat. Kis felületű, nagy mélységű korróziós károsodást hoz létre (49. ábra) [26].

A próbatestek:

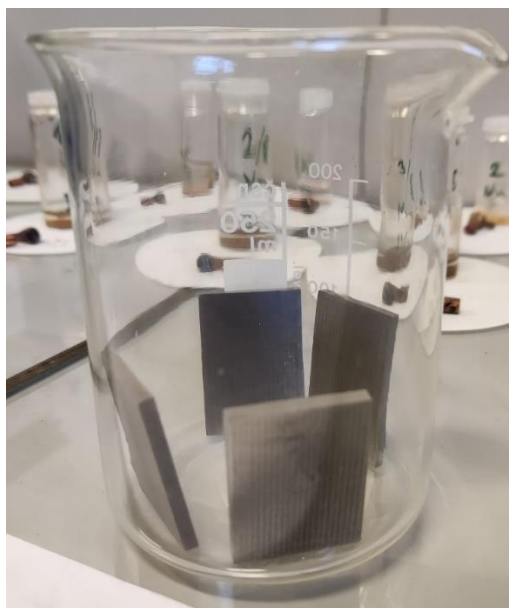
- az 1. és 2. sorszámmal ellátottak hagyományos hőkezelésen átesettek
- a 3. és 4. sorszámúak a mélyhűtés közbeiktatásával hőkezelték

A vizsgálat előtt a csiszolt felületű próbatesteket megjelöltem, majd lemértem a próbatestek méreteit, és tömegüket (három mérés átlaga) Kern ALJ 220-4NM analitikai mérlegen. Ezután 100 % -os acetonnal zsírtalanítottam felületüket.



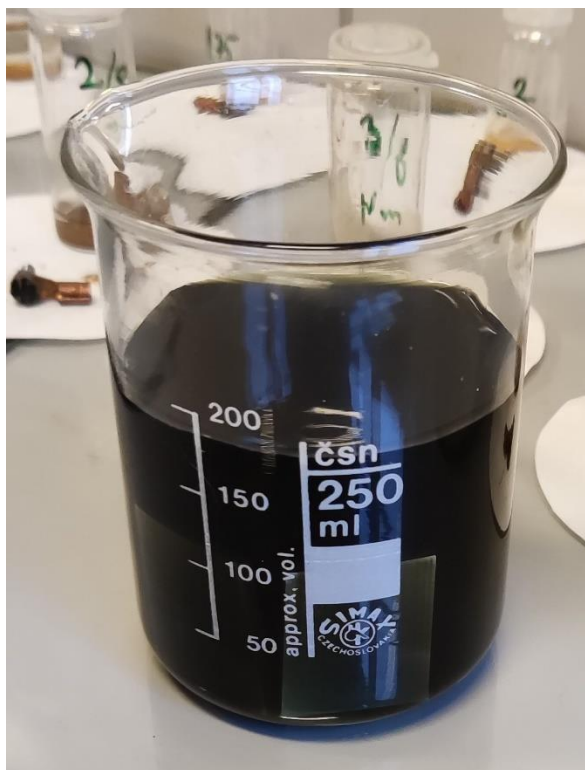
50.ábra. Zsírtalanítás

Ezt követően egy átlátszó mérőedénybe helyeztem őket egy csipesz segítségével úgy, hogy a lehető legnagyobb felületen érintkezhessenek a vas-klorid oldattal.



51.ábra. Próbatestek az edényben

Ezután feltöltöttem az edényt, hogy bőven ellepje a próbatesteket.



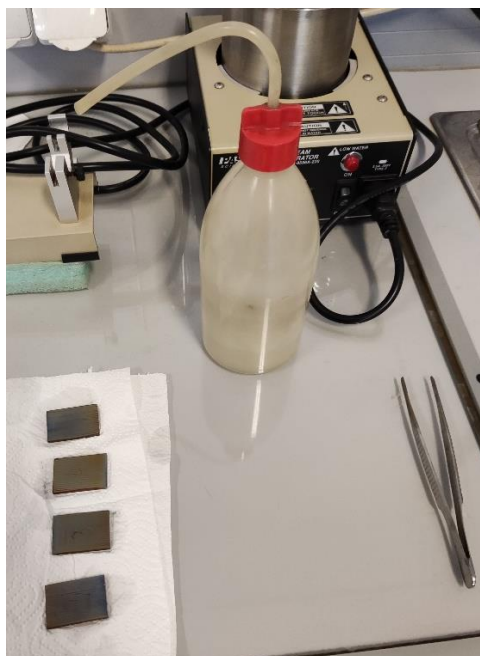
52.ábra. Próbatestek az oldatban

Majd lefedtem a tetejét, és egy erre a célra kialakított klímasekrénybe zártam, ahol garantálni tudtam az állandó hőmérsékletet.



53.ábra. Zárt klímasekrény

72 óra elteltével csipesszel egyenként kivettem az oldatból őket, és desztillált vízzel leöblítettem a felületüket.



54.ábra. Tisztítás desztillált vízzel

Száradásuk után újra lemértem őket (három mérés átlagát vettem).



55.ábra. Mérés a vizsgálat után (Kern ALJ 220-4NM analitikai mérleg)

A korróziós tömegvesztés megállapítása az (5.4.1) képlettel történt [5].

$$\text{Korróziós tömegvesztés} = \frac{\Delta m}{A \times t} \left[\frac{g}{m^2 h} \right] \quad (5.4.1)$$

ahol:

- Δm : a korrodálódás következtében létrejövő tömegcsökkenés [g]
- A : a próbatest oldattal érintkező felülete [m^2]
- t : az oldatban eltöltött órák száma [h]

Az alábbiakban az első próbatesten szemléltetem a számítás menetét, majd az 5. táblázatban összefoglalom az összes további próbatestre kiszámított értéket:

A korrodálódás következtében létrejött tömegcsökkenés mértéke a kiinduló- és a vizsgálat után mért tömeg különbsége:

$$\Delta m = m_0 - m_1 [g] \quad (5.4.2)$$

$$\Delta m = 18,691 \text{ g} - 18,594 \text{ g} = 0,097 \text{ g}$$

Tehát a tömegcsökkenés:

$$\Delta m = 0,097 \text{ g}$$

A korróziós tömegvesztést az 5.4.1 egyenletbe helyettesítéssel kaphatjuk meg:

$$\text{Korróziós tömegvesztés} = \frac{0,097 \text{ g}}{0,001967 \text{ m}^2 \times 72 \text{ h}} = 0,685 \left[\frac{g}{m^2 h} \right]$$

A mért és számított eredményeket az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat. A korróziós kísérlet mért és számított értékei

Próbatestek sorszáma	Érintkező felület (A) [m^2]	Kiinduló tömeg (m_0) [g]	Vizsgálat utáni tömeg (m_1) [g]	Tömegcsökkenés (Δm) [g]	Korróziós tömegvesztés [$g/(m^2 h)$]
1	0,001967	18,691	18,594	0,097	0,685
2	0,001967	18,644	18,551	0,093	0,657
3	0,002185	18,901	18,826	0,075	0,477
4	0,002164	18,7219	18,655	0,067	0,429

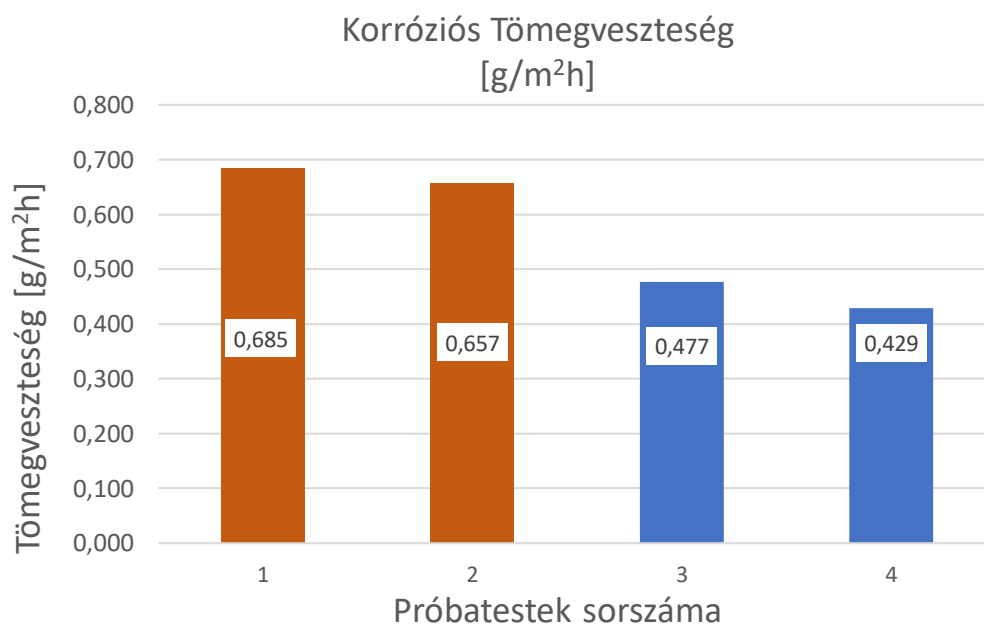
Az eredményeket a hőkezelések szerint is átlagoltam:

A nem mélyhűtött anyagból készült próbatestek átlagos korróziós tömegvesztése:

$$0,671 \left[\frac{g}{m^2 h} \right]$$

A mélyhűtésen átesett próbatestek átlagos korróziós tömegvesztése:

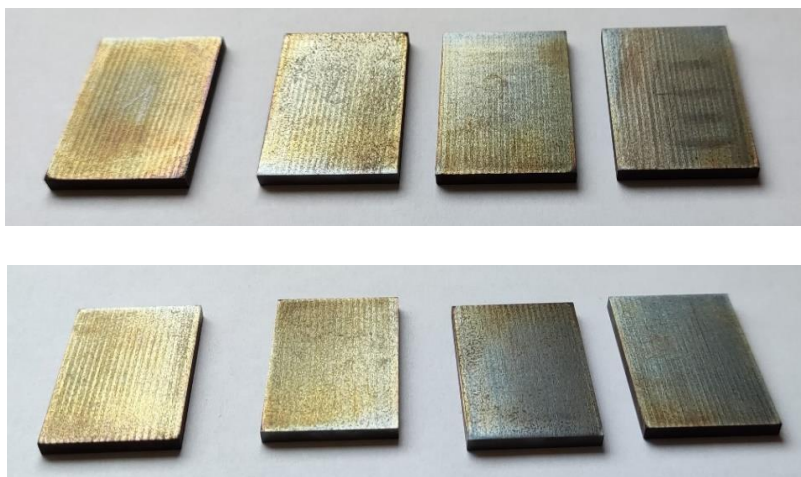
$$0,453 \left[\frac{g}{m^2 h} \right]$$



56.ábra. Korróziós tömegvesztés diagramja

A fenti diagramon megfigyelhető eredményekből is egyértelműen látható, hogy a mélyhűtött próbatestek kevesebb tömegvesztést szenvedtek el. Így ebből arra lehet következtetni, hogy a mélyhűtés javított a korrózióállóságon, valószínűleg a szabad króm homogénebb eloszlása miatt nagyobb összefüggő felületen képződhetett króm-oxid hártva [27].

Az a próbatestek felületéről készült képeken is megfigyelhető, hogy a mélyhűtött próbatesteken kevesebb korrózió okozta elszíneződés jelentkezett (57.ábra).



57.ábra. Próbatestek mindkét oldalának felülete a vizsgálat után. A minták sorszáma
rendre: 1. 2. 3. 4.

6. Összefoglalás

A szerszámok élettartama az egyik legfontosabb gazdasági paraméter a gyártás során, ami nagy mértékben befolyásolja a gépleállások időtartamának hosszát, ezáltal a gyártási határidők betartását is veszélyezteti. Ez különösen igaz az újrahasznosított PVC anyagok feldolgozása során, ahol nemcsak kopásállónak kell lennie az alkalmazott szerszámoknak, a nehezen kiszűrhető erősen koptató hatású idegen anyagok miatt, de nagy mértékben korrózióállónak is, az erősen korrodáló klór miatt, ami a PVC polimer egyik fő alkotóeleme. A dolgozatomban az újrahasznosított PVC anyagok granulálásakor alkalmazott szerszámok élettartamának növelését tűztem ki célul. Ezt egyrészt a szerszám anyagminőségének megfontolt kiválasztásával, másrészt hőkezelési paramétereinek optimalizálásával szeretném elérni, ami a kopásállóság melletti kiváló korrózióállóság követelményét a lehető legnagyobb mértékben ki tudja elégíteni, ezáltal növelve a szerszám élettartamát. A hőkezelés nagyon fontos szerepet játszik ezen tulajdonságok elérésében az anyag mikroszerkezetének megfelelő kialakításával.

A dolgozatom első felében bemutattam a Rolló Kft -nél a PVC granulálása során alkalmazott szerszámokat, valamint a granulátum készítésének teljes gyártási folyamatát. Ezután felvázoltam az eddig alkalmazott szerszámanyagokat és azok gyártási technológiáit, valamint a velük szemben támasztott követelményeket. Bemutattam egy konkrét granuláló szerszámot. Ezt követően az általam választott szerszámanyagot ismertettem, valamint a választásom szempontjait.

A hőkezelést a Titán 94 Kft -nél Dr. Tóth László Tanár Úr támogatásával végeztem, aminek eredményességét kopás- és korrózióállósági vizsgálattal ellenőriztem. Kétféle hőkezelési eljárással hőkezeltém próbatesteket. Egyszer hagyományos módon, edzve, majd háromszor megeresztve; illetve egy másik módon, edzés után mélyhűtve, majd háromszor megeresztve a szerszámanyagot. A hőkezelt anyagokból a Duna Precíziós Kft. huzalszikra forgácsoló eljárással a kopás- és korróziós vizsgálathoz 4-4 próbatestet munkált ki.

A kopásvizsgálatnál 2 hagyományosan hőkezelt, és két mélyhűtött próbatestet koptattam az egyetem anyagvizsgáló laborjában található készülékkel. A kopásnyomokat mikroszkóp segítségével megmértem, amikből számíthatóak a kopási tényezők.

A korróziós vizsgálat közben a próbatesteket az ASTM G48 szabvány szerint 72 órára 6 %-os vas-klorid oldatba merítettem állandó 22 °C -os hőmérsékleten. A tömegvesztésük mértékével jól jellemezhető korrózióállóságuk.

Az elvégzett kísérletek után le tudom vonni a végső következtetéseket. Megállapíthatom, és a vizsgálataimmal, számításaimmal alátámaszthatom, hogy az ajánlott szerszámanyag a mélyhűtési technológia alkalmazásával jobb kopási tulajdonságokat mutatott, mint a hagyományos hőkezelési eljárással kezelt munkadarab. Ez részben a nagyobb keménységének, és részben a finomabb karbideloszlásnak is köszönhető. Az acél korrózióállóságán is javított a mélyhűtés, ami fontos szempont a PVC granulálása során. Ezek alapján azt várom, hogy a szerszám élettartama is hosszabb lesz.

7. Idegen nyelvű tartalmi összefoglaló

Tool life is one of the most important economic parameters in manufacturing, which has a major impact on the length of machine downtime, thus jeopardising the ability to meet production deadlines. This is particularly true in the processing of recycled PVC materials, where the tools used must not only be wear-resistant, due to the difficulty in filtering out highly abrasive foreign matter, but also highly corrosion-resistant, due to the highly corrosive chlorine, which is one of the main components of the PVC polymer. In my thesis I aimed to increase the lifetime of tools used in the granulation of recycled PVC materials. I would like to achieve this by choosing the appropriate steel grade and by optimising its heat treatment parameters to maximise the requirement for excellent corrosion resistance along with abrasion resistance, thus increasing the lifetime of the tool. The heat treatment plays a very important role in achieving these properties by properly shaping the microstructure of the material.

In the first part of my thesis, I presented the tools used during the granulation of PVC, as well as the entire production process of making the granulates at Rolló Kft. Then I outlined the materials, that are used for the tools, as well as the requirements imposed on them. I presented a specific granulating tool, then described the steel grade I chose and the criteria for my choice.

The heat treatments were carried out at Titán 94 Kft. with the support of Dr. László Tóth. The effectiveness of the treatments was verified by wear and corrosion resistance tests. I heat treated the test specimens with two types of heat treatment procedures. Once conventionally heat treated: quenched, then three times tempered; and once using cryogenic treatment after the quenching, followed by three times tempering. From the heat treated materials, Duna Precíziós Kft. produced 4-4 specimens for the wear and corrosion tests via wire electrical discharge machining.

During the wear test, I wore 2 conventionally heat treated and 2 cryogenically treated specimens with the equipment located in the material testing laboratory of the university. The wear marks were measured using a microscope, from which the wear factors can be calculated.

During the corrosion test, the specimens were immersed in a 6 % ferric chloride solution at a constant temperature of 22 °C for 72 hours, according to the ASTM G48 standard. Their corrosion resistance can be well characterized by the degree of their mass loss. I can conclude and confirm with tests and calculations that the recommended steel grade, treated by cryogenic heat treatment, showed better wear properties than the workpiece treated with the conventional heat treatment process. This is partly due to its higher hardness and partly due to a finer carbide distribution. The corrosion resistance of the steel was also improved by cryogenic treatment, which is an important consideration in the granulation of PVC materials. Based on these findings, I expect that the tool life will also be longer using this heat treatment technology.

Felhasznált irodalom

- [1] Ronkay Ferenc, Dobrovsky Károly, Toldy Andrea: Műanyagok újrahasznosítása. Printer Kiadó. Budapest, 2014.
- [2] Dr. Molnár Kolos: Anyagismereti alapok. BME Polimertechnika Tanszék, oktatási segédanyag, 2019.
- [3] Rolló Kft. weboldala <https://www.rollo.hu/>
- [4] BÖHLER Szerszámacélok, Nemesacélok katalógus. voestalpine Böhler kereskedelmi Kft. 2009.
- [5] Böhler M340 ISOPLAST szerszámanyag adatlapja
<https://www.boehler.hu/app/uploads/sites/92/2020/12/productdb/api/m340en.pdf>
- [6] Dr. Szombatfalvy Árpád: A hőkezelés technológiája. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1985.
- [7] Dr. Artinger István: Szerszámacélok és hőkezelésük. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1978.
- [8] Dr.Kisfaludy Antal, Réger Mihály, Tóth László: Szerkezeti Anyagok II. Óbudai Egyetem, ÓE BL 320, Budapest, 2010.
- [9] Edgar Apaza Huallpa, J. Capó Sánchez, L.R. Padovese, Hélio Goldenstein: Determining Ms temperature on a AISI D2 cold work tool steel using magnetic Barkhausen noise. Journal of Alloys and Compounds 577S, 2013. p. S726-S730.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.02.032>
- [10] M. Arbab Rehan, Anna Medvedeva, Lars-Erik Svensson, and Leif Karlsson: Retained Austenite Transformation during Heat Treatment of a 5 Wt Pct Cr Cold Work Tool Steel. Metallurgical and Materials Transactions A 48, 2017. p. 5233-5243.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11661-017-4232-5>

- [11] Muneo Yaso, Shuhei Hayashi, Shigekazu Morito, Takuya Ohba, Kunichika Kubota and Kouji Murakami: Characteristics of Retained Austenite in Quenched High C-High Cr Alloy Steels. Journal of the Japan Institute of Metals Vol. 50. No. 2, 2009. p. 275-279. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008161>
- [12] Hoyoung Kim, Jun-Yun Kang, Dongmin Son, Tae-Ho Lee, Kyung-Mox Cho: Evolution of carbides in cold - work tool steels. Materials Characterization Journal 107, 2015. p. 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.08.001>
- [13] A. Oppenkowski, S. Weber, W. Theisen: Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels. Journal of Materials Processing Technology 210, 2010. p. 1949-1955. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.007>
- [14] V. G. Gavriljuk, V. A. Sirosh, Yu. N. Petrov, A. I. Tyshchenko, W. Theisen, and A. Kortmann: Carbide Precipitation During Tempering of a Tool Steel Subjected to Deep Cryogenic Treatment. Metallurgical and Materials Transactions A 45, 2014. p. 2453-2465. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-014-2202-8>
- [15] B. Podgornik, I. Paulin, B. Zajec, S. Jacobson, V. Leskovšek: Deep cryogenic treatment of tool steels. Journal of Materials Processing Technology 229, 2016. p. 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.045>
- [16] Dr. Tóth László: Mélyhűtéssel a maradék ausztenit ellen. Mérnöki Szimpózium a Bánkin Előadásai, Óbudai Egyetem, 2021. p 181-186.
- [17] X.G. Yan, D.Y.Li: Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel. Wear, Vol. 302, Issues 1-2, 2013. p. 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.037>
- [18] László Tóth: Investigation on the Surface Quality of Böhler S290 Powder Metallurgical Tool Steel After WEDM Machining. European Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 6. Issue 2. 2021. p. 75-82. <http://dx.doi.org/10.36868/ejmse.2021.06.02.075>

[19] Kovács Tünde, Dr. Dévényi László: Kopásvizsgálati eljárás fejlesztése. Anyagok Világa, V. évfolyam 1. szám, 2004. december

http://anyagokvilaga.hu/tartalom/2004/dec/05_KT_DL.pdf

[20] Haidong Zhang, Xianguo Yan, Qiang Hou, and Zhi Chen: Effect of Cyclic Cryogenic Treatment on Wear Resistance, Impact Toughness, and Microstructure of 42CrMo Steel and Its Optimization. Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2021, Article ID 8870282, 2021

<https://www.hindawi.com/journals/amse/2021/8870282/>

[21] Daniel Toboła, Witold Brostow, Kazimierz Czechowski, Piotr Rusek: Improvement of wear resistance of some cold working tool steels. Wear Vol. 382-383. 2019. p.29-39. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.023>

[22] Némethi Gergő: Hőkezelési technológia optimalizálása szerszámacél kopásállóságának növelésére. Szakdolgozat, ÓE BGK, 2018.

[23] Varga Márton Zsolt: Hidegalakító szerszám költséghatékonyságának javítása optimális alapanyag és hőkezelési technológia választásával elért élettartam növeléssel. Diplomamunka, ÓE BGK 2020.

[24] ASTM G48-11R20E01 szabvány <https://www.astm.org/g0048-11r20e01.html>

[25] Sandra Brajčinović, Anita Begić Hadžipašić, Ljerka Slokar Benić: Influence of Medium on Corrosion and Microstructural Properties of K110 Tool Steel for Cold Work. Proceedings of 29th International Conference on Metallurgy and Materials, 2020. <http://dx.doi.org/10.37904/metal.2020.3558>

[26] Kép lyukkorrózióról és réskorrózióról <https://cromkontakt.hu/blog/tag/reskorrozio/>

[27] László Tóth, Ferenc Haraszti, Tünde Kovács: Heat Treatment Effect for Stainless Steel Corrosion Resistance. European Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 3. Issue 2. 2018. p. 98-102.

https://www.researchgate.net/publication/329625016_HEAT_TREATMENT_EFFECT_FOR_STAINLESS_STEEL_CORROSION_RESISTANCE

Saját kezűleg, illetve az általam használt készülékek által készített képek nincsenek megjelölve

A hivatkozások linkjeinek utolsó ellenőrzése: 2022.12.09.