

KORRÓZIÓÁLLÓ DUPLEX ACÉLOK FORGÁCSOLHATÓSÁGI PROBLÉMÁI

THE MACHINABILITY PROBLEMS OF DUPLEX STAINLESS STEELS

Horváth Richárd, PhD; Fábrián Enikő Réka, PhD; Nagy András István, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Terek Pál, PhD, Újvidéki Egyetem, Műszaki Tudományi Kar

ÖSSZEFOGLALÁS.

A korrózióálló duplex acélok elterjedése az utóbbi években jelentősen megnőtt (vegyipar, olajipar, orvostechnikai felhasználás), újabb minőségek kerültek piacra. Kedvező tulajdonságait a ferrites/ausztenites szövetszerkezetének köszönheti. Az ilyen acélok készre munkálása nagyon gyakran történik forgácsoló technológiák alkalmazásával. A korrózióálló duplex acélok szövetszerkezetének ismertetésén keresztül ismertetjük a duplex acélok forgácsolásának nehézségeit. Napjainkban számos kutatás foglalkozik a duplex acélok forgácsolásával, mely kiterjed a forgácsképződés mechanizmusára, a megmunkálás szerszámra gyakorolt hatására, és a bevonatok teljesítőképességére, valamint a forgácsoló szerszámok élettartamára és a gyártott felületi érdesség jellemzésére. Duplex acéloknál forgácsolási vizsgálataink eredményei (forgács és lapkakopás elemzése) arra utalnak, hogy a lapkakopások részben a szuperduplex korrózióálló acélok összetételéből fakadó kiválások jelenlétére, részben ezen acéltípus előállítási, öntési jellegzetességeivel hozható kapcsolatba.

ABSTRACT.

Duplex stainless steels (DSS) are widely used in the oil-, chemical- and medical industry due to favourable microstructure and chemical composition. Frequent industrial applications of such steels provides research and development for the economical cutting technologies and technology optimization. Numerous contemporary works are performed on the machinability of duplex steels: evaluation of cutting force components, measurements and evaluation of surface roughness, and development of roughness models, correlation of roughness and the cutting parameters. In this work the difficulties of machinability of duplex stainless steels were described by point of view of microstructure. The results of our cutting tests in the case of duplex steels (chip and worn coated tool analysis) suggest that the wear are partly related to the presence of precipitations resulting from the superduplex corrosion-resistant steels and partly

to the production and casting characteristics of this steel type.

1. DUPLEX ACÉLOK RÖVID TÖRTÉNETE ÉS ALKALMAZÁSA NAPJAINKBAN

A korrózióálló acél családokat a XX. század elején kezdték fejleszteni, hiszen a fejlődő vegyipar és gépipar számos helyen igényelte ezen acélok széles választékát. A korrózióálló acélcsalád tagjait szövetszerkezetük alapján megkülönböztetve: ausztenites-, ferrites-, ferrit-martenzites acélokról beszélhetünk [1].

A folyamatos minőségi javulást a kohászati technológiában nyert egyre nagyobb tapasztalat segítette. Igazán nagy előrelépést az 1968-as év hozta, amikor megjelent az ún. AOD (Argon-Oxogem Decarburization) technológia, mely a karbon tartalom megfelelően alacsony szintre való beállítását hozta meg gazdaságosan (0,02-0,03%). Erre amiatt volt szükség, mert az ellenálló képességekhez magas ötvöző tartalom szükséges, ez főként a króm (Cr), Nikkel (Ni), Molibdén (Mo). Viszont a magas karbon tartalom esetén az affinitási hajlamokból adódóan karbidkiválások keletkeztek, melyek a korróziós tulajdonságok (rezisztencia határ visszaugrás (1. ábra)), mechanikai tulajdonságok erős romlását okozta [2].



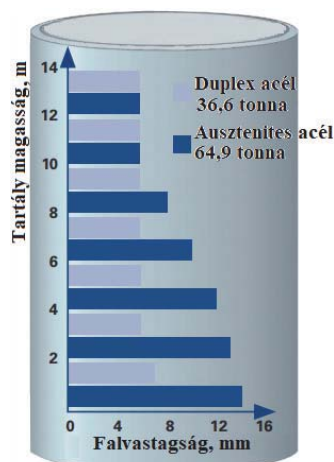
1. ábra. Rezisztencia határok [2 alapján]

Az első duplex rozsdamentes acélokat Svédországban 1930-ban gyártották. A magas króm és nikkel tartalmú acélnál ausztenites-ferrites szerkezet jött létre [3]. A későbbi kutatások nyomán a szuper duplex és hyper duplex korrózióálló acélok is megjelentek, melyek még nagyobb ellenállóságot mutattak a korrózióval szemben, az úgynevezett PRE_N értéket (pitting index) [4]:

$$PRE_N = Cr(\%) + 3,3 \cdot Mo(\%) + 16 \cdot N(\%) \quad (1)$$

jelentősen megnövelve. A sovány (lean) és sima duplex acélok 25-38-as PRE_N értékkel, a szuper duplex acélok 40 feletti PRE_N értékkel, a hyper duplexek 48 feletti PRE_N értékkel rendelkeznek. (Bár PRE_N index nem ad abszolút értéket a korrózióállóságról, és nem alkalmazható minden körülmény között, de korrekt összehasonlíthatóságot nyújt a korrózióval szembeni várható ellenállásról. [3]).

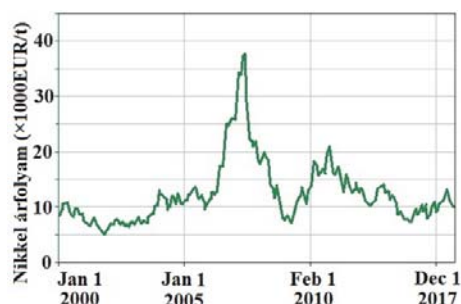
A duplex acélok nagyobb mértékű alkalmazhatóságát tovább erősíti, hogy 2-3-szoros szilárdsági tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a tisztán ausztenites szövetszerkezetűek. Ezen tulajdonságot a kétalkotós szövetüknek köszönhetik, mely ötvözi a ferrites szerkezet és az ausztenites szerkezet tulajdonságait. A ferritnek köszönhetően jobb ellenállást tanúsítanak a pittinggel és a réskorrózióval szemben és az ausztenit jó alakíthatóságot, hegeszthetőséget, szívósságot és ellenállást biztosít a hidrogénes elridedéssel szemben. A mai gazdaságossági szemlélet és az energiatakarékosság tovább szilárdítja a duplex acélok alkalmazását az iparban. Az energiatakarékosság az ilyen acélok felhasználásánál abból ered, hogy pl.: a nagyobb szilárdságú duplex acélból sokkal vékonyabb falvastagságot kíván meg egy nagy vegyi hatást szenvedő tartályfal (2. ábra).



2. ábra. A falvastagság és a tömeg lehetséges csökkentése duplex acél használatával [5]

Példaként említhetők még a szivattyú-lapátok, melyeknél kisebb lesz a mozgatott tömeg. Másik kiemelkedő példa a hajózási felhasználás, amikor szállító és tanker hajókat készítenek duplex ötvözetből, itt is érvényesül a súlycsökkentés, jó ütmunka az alacsonyabb hőmérsékleteken is, és a sós közegeknek való

ellenállás [5]. A duplex acélok növekvő felhasználási arányát gazdasági változás is nagyban befolyásolta (3. ábra). Az kétezres évek elején, a piacon 2-3-szoros (nikkel árfolyam növekedés) volt tapasztalható, mely a nikkellel való takarékosagra sarkallta a gyártókat. A duplex korrózióálló acélok jóval kevesebb nikkelt igényelnek a hasonló ellenálló képességű ausztenites csoporthoz képest.



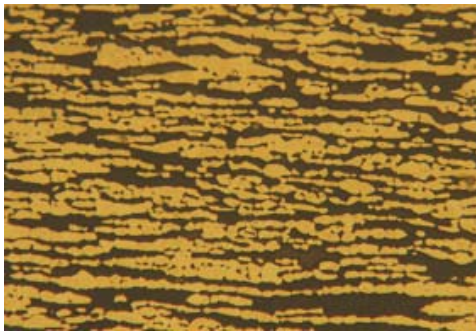
3. ábra. Nikkel árfolyam változása [6 alapján]

A duplex acélokból készült szerkezetek megfelelő és tartós működéséhez forgácsoló megmunkálásra van szükség. Jelenleg a forgácsoló technológia biztosítja azt a megfelelő illesztési pontosságot, felületi minőséget mely az összeszerelendő, működő alkatrészekhez szükséges. A magas forgácsolási költségek miatt törekedni kell a minél gazdaságosabb megmunkálásra. Fontos a duplex acélok forgácsolásának kutatása, mely kiterjed az előállítható felületi érdességre, a szerszám éltre gyakorolt hatására, erőtani viszonyokra és a forgácsolás során lejátszódó folyamatokra. A mai megmunkálási stratégiák és környezettudatos megmunkálás a hűtőfolyadékok alkalmazását is visszaszorítja, mely által további szerszámterhelés keletkezik. Fontos, a forgácsoláskori hőmérséklet is, mert a duplex acéloknak korlátozott a felhasználhatósági hőmérséklet tartományuk. A magas hőmérsékletek anyagszerkezeti változásokat váltanak ki, meggyorsítva a diffúziós folyamatokat, melyek kiválásokat eredményeznek, ezáltal a szerszám igénybevétele, kopása is növekszik. Szuperduplex acéloknál különösen problémát okozhatnak a 450°C körüli hőmérsékleten relatív rövid idő alatt létrejövő kiválások [1, 4].

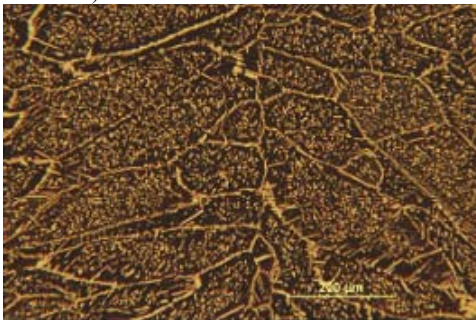
2. DUPLEX ACÉLOK ANYAGSZERKEZETI JELLEMZŐI

A korrózióálló duplex acélok, kettős szövet szerkezettel rendelkeznek, ausztenit és ferrit (4. ábra) és az eredő tulajdonságot az arányuk adja. Beraha'l reagenssel maratva a metallográfia csiszolatként előkészített mintákat a ferrit az

ausztenittől jól elkülöníthető. Maratás után a ferrit sötét az ausztenit világos marad.



a) lemez alakban szállított



b) öntött szerkezet hőkezelés nélkül. Marószer Beraha'1 reagens

4. ábra. Duplex acél szövete

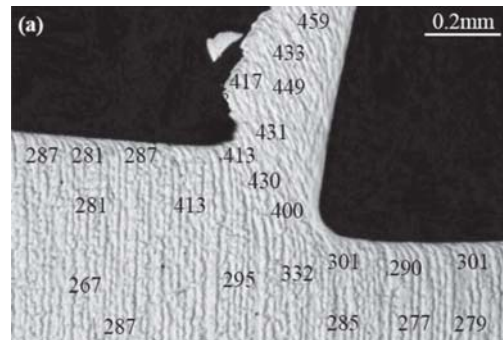
A standard duplex acélok 50-50% ferrit-ausztenit összetételűek, de a különböző típusú duplexek ausztenit-ferrit aránya ettől eltérő lehet. Az ausztenit biztosítja a jó alakíthatóságot, a szívósságot, a jó hegeszthetőséget, a hidrogén elridegesséssel szembeni ellenállást, míg a ferrit a megfelelő korrózióállóságot főleg a klorid ionok által indukált pittinggel, réskorrózióval és feszültségi korrózióval szemben.

3. DUPLEX ACÉLOK FORGÁCSOLHATÓSÁGA ÉS ANNAK PROBLÉMÁI

3.1. A forgácsképződés mechanizmusa

A duplex acélok forgácsolása nehézkes. Az egyik elsődleges probléma a nagy felkeményedési hajlamuk. J. Nomani és társai [8] két duplex acél (SAF 2205 standard duplex és SAF 2507 szuperduplex) forgácsolhatósági vizsgálatát végezte el. Az elsődleges alakváltozási zónában mindenhol felkeményedést tapasztaltak, mindkét duplex ötvözetnél. Vizsgálataik alapján a felkeményedés függ a forgácsoló sebességtől (alakítási sebesség), valamint az eltérő ötvözettségtől (Hasonló eredményre jutottak G.M. Krolczyk és társai [10] is.) A 2507 típusú szuperduplex acél nagyobb érzékenységet mutat a sebesség növekedésével a felkeményedésre a nagyobb ötvözet tartalom (Ni, Mo és Cr) jelen-

léte miatt. A forgácstöben J. Nomani és társai [8] a megfigyelési alapján az ausztenit és a ferrit mezők is torzultak, az alakváltozás irányának megfelelően.



5. ábra. Knoop mikrokeménység mérések eredményei (SAF 2205, $v_c = 94$ m/min) [8]

3.2. A duplex acélok forgácsoló szerszámra gyakorolt hatása

A duplex acélok forgácsolása nagyon igénybe veszi az alkalmazott forgácsoló szerszámokat. A ferrit biztosította pittinggel szembeni jó ellenállás a forgácsolás során negatívan utközik ki. A nagy forgácsoló erőszükséglet pedig a viszonylag magas szakítószilárdságból és a felkeményedési hajlamból adódik.

A jellemző szerszám kopásformák az adhéziós [7] és intenzív abrazív kopások [8, 10]. A Diniz és társai [9] azt figyelték meg, hogy a szerszám bevonat lekopása után (a szerszám kopott területein) megnövekedett a diffúziós kopás, sőt nagyobb forgácsoló sebességeknél is (a nagyobb forgácsolási hőmérséklet hatására) erőteljesebb a diffúziós kopási jelenség. Az erős kopási jelenségeknek köszönhetően kismértékű forgácsoló sebesség növekedés nagy szerszáméltartam csökkenéssel jár. A szerszám éltartama rendkívül érzékeny a forgácsoló sebesség változásra [9,10]. A Diniz és társai [9] továbbá számos hűtő-kenő-öblítő módszert vizsgáltak a kísérleteik során a száraz forgácsolás mellett (árasztásos forgácsolás, tiszta növényi olaj, minimál kenés) a szerszámkopásra való hatásuk miatt. A vizsgált forgácsolási körülmények közül csak a tiszta olajjal való kenés csökkentette érdemben a szerszámkopást.

A duplex acélok forgácsolásakor számos esetben megfigyelhető az élrátét képződés jelensége, mely nagyban rontja a forgácsolás körülményeit [8, 10]. Megállapították, hogy a kialakuló élrátét csak az α -ferritből, az anyag lágyabb fázisából áll. A keményebb fázisú γ -

ausztenit valószínűleg „tovább áramlik” a kialakulás helyétől, a torlóponttól [8].

3.3. Duplex korrózióálló acélok szerszám éltartammal kapcsolatos tapasztalatai

J. de Paiva Jr és társai [7] háromféle bevonattípus viselkedését vizsgálták UNS S32750 típusú superduplex forgácsolásokor (TiCN+Al₂O₃, TiCN, nano-kristályos AlTiN). Forgácsolás közben szintetikus olaj alapú hűtő közeget alkalmaztak. Éltartam szempontjából az AlTiN bevonatot találták kiemelkedőnek. Ez annak tulajdonítható, hogy jó tribológiai tulajdonságokkal rendelkező alumínium-oxid film réteg alakul ki az AlTiN bevonaton, mely csökkenti a súrlódást és megkönnyíti a forgács leválását a szerszám homlokfelületén.

A hűtőközegek használatának vizsgálata duplex acélok esetén napjaink egyik fő kutatási területe. G.M. Krolczyk és társai [10] kutatásai során száraz forgácsolási körülmények között alkalmazott CVD befonatos keményfém szerszám lényegesen jobban teljesített, mint hűtőközeg alkalmazása során. Ez talán annak köszönhető, hogy száraz forgácsolásnál magasabb hőmérsékleten kilágyult a forgácsolt munkadarab felülete és ez megkönnyítette a forgácsképződést, illetve a szárazforgácsoláskor erősen fellépő élrátét okozhatta.

3.4 Duplex korrózióálló acélok forgácsolt felületi érdességével kapcsolatos tapasztalatok

Természetesen a forgácsolt felületek minősége is fontos szempont. Ezért a forgácsolt felületek érdessége is fontos kutatási téma. Számos kutatás foglalkozik ezzel a témakörrel. D. Selvaraj és társai [11] Taguchi módszerrel optimalizálták a felületi érdességet kétféle duplex acélon (ASTM A 955 5A, és 4A) száraz forgácsolási körülmények között. Szintén a felületi érdességet vizsgálták duplex (UNS S3220) acélnál M. Policena és társai [12] marási technológiánál száraz körülmények között. Vizsgálatukban ún. Box-Behnken kísérlettervet alkalmaztak. Az esztergált felület morfológiáját elemezték G.M. Krolczyk és társai [13] duplex acélnál PSD analízissel száraz és minimálkenéssel történő forgácsolás után.

3. KÍSÉRLETBEN HASZNÁLT ANYAGOK ÉS ESZKÖZÖK

3.1 Kísérletben használt duplex korrózióálló acél

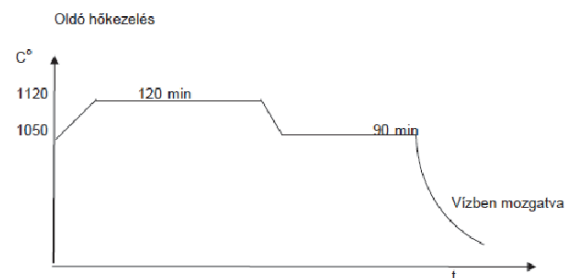
A kísérletben használt duplex acél 1.4517 (GX2CrNiMoCuN25-6-3-3) kémiai összetételét

az 1. táblázat tartalmazza. Szakitószilárdsága, $R_m = 650-850$ MPa, egyezményes folyáshatára, $R_{p0,2} = 480$ Mpa. Ezt az acél típust klorid tartalmú és tengervizes és petrokkémiai rendszerekhez alkalmazzák elsősorban. Ennek az acél-típusnak kiemelendő tulajdonsága még, hogy jó a kavitációs erózióval szembeni tűrése. Ezért számos iparvállalat (szivattyúgyártó) alkalmazza szivattyúház vagy járókerék alapanyagként.

1. táblázat. A kísérletben használt duplex acél kémiai összetétele, %

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N	Cu
max. 0,03	max. 1	max. 1,5	5-7	max. 0,035	max. 0,025	24,5-26,5	2,5-3,5	0,12-0,22	2,75-3,5

A vizsgálandó duplex acél szerkezetét (6. ábra) oldó izzító hőkezeléssel érik el, majd gyors hűtést alkalmaznak, hogy megtartsák „befagyasszák” a kialakult kétfázisú szövetet. Ezt a hőkezelést általánosan 1050-1150°C hőmérséklet tartományban végzik, erre hevítik fel az öntés után kialakult ferrites szövetet. A hűtést nagysebességgel végzik, a befagyasztáshoz és a kiválások elkerüléséhez.



6. ábra. Vizsgált duplex acél hőkezelése

3.2 Kísérletben használt forgácsoló szerszám és vizsgálati eszközök

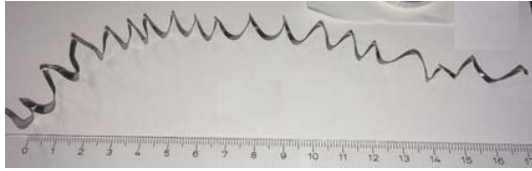
Az esztergálási kísérletet WNMG-FM 080408 befonatos lapkával végeztük. A forgácsolási paraméterek: forgácsoló sebesség, $v_c = 100$ m/min; előtolás, $f=0,15$ mm; fogásmélység, $a_p=0,5$ mm.

A vizsgálatba vont elemző eszközök: Panasonic DMC-G7 fényképezőgép+ 28mm-es objektív, Nikon sztereómikroszkóp, Jeol JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkóp.

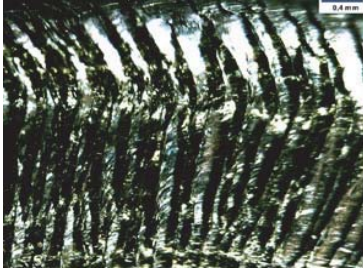
4. DUPLEX ACÉL FORGÁCSOLÁSÁNAK KEZDETI EREDMÉNYEI

4.1 Forgács vizsgálata

A vizsgált forgácson megfigyelhető az ausztenites korrózióálló acélokra jellemző folyó, tagolt forgács típus (7. ábra).



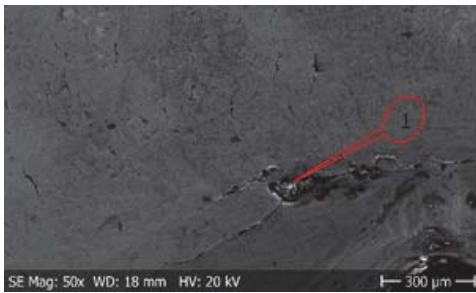
a) *Folyóforgács*



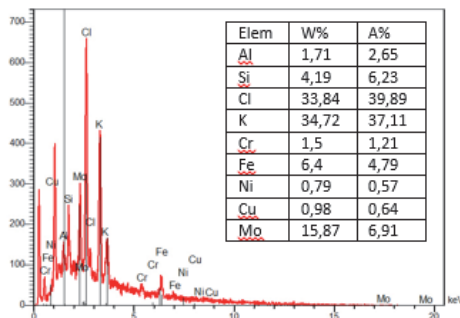
b) *Forgácstagoltság*

7. ábra. Duplex acél esztergálásának forgácsa

A szemcsehatárookra beült szennyeződések (8.a ábra) további elemzések (8.b ábra), a réz és jelentős mennyiségű molibdén mellett klór és kálium maradványokat is találtunk, melyek a hűtőfolyadékából származhatnak.



a) *Forgács szemcsehatárnál beékelődő kiválás + szennyeződés (SEM felvétel)*



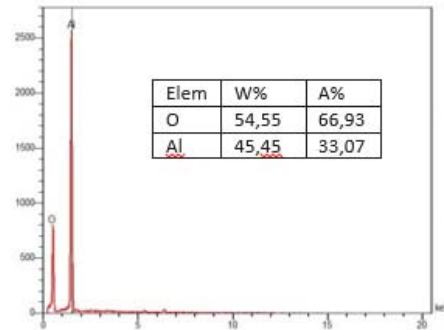
b) *Kiálló anyagrézsz anyagösszetétel vizsgálata 8. ábra. Forgács vizsgálata*

A forgács szerszám homloklapjával érintkező felének további elemzése, hogy a szemcsehatárok között üreget találtunk (9.a ábra), mely feltételezhetően egy mikro zsugorodási üreg, melybe Al_2O_3 szemcse ült be (9.b ábra). Ez egy kemény vegyületfázis, mely abráziós koptató hatást fejt ki a szerszámra. Az Al_2O_3 szemcse az alkatrész öntött jellegéből fakadóan kerülhetett az anyagba. A duplex acé-

lok igen kis széntartalmúak, a dezoxidáláshoz a szilícium mellett szükség van az alumíniumra is. A vizsgálatok szerint az alumínium oxid nem került a salakba teljes mértékig a gyártás során, hanem az öntött szerkezetnek megfelelően a szemcsehatárokon is megjelent.

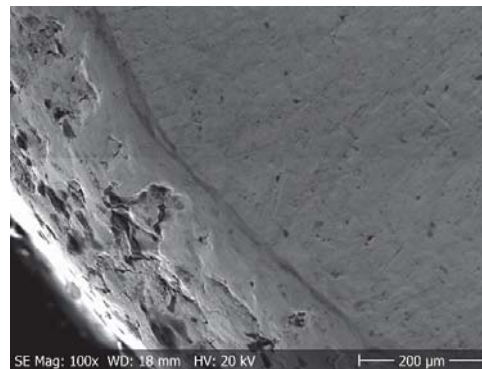


a) *Szemcsehatár üregbe ékelődött Al_2O_3 szemcse (SEM felvétel)*



b) *Szemcse határmenti üregbe beült szennyeződések anyagösszetételének vizsgálata 9. ábra. Forgács szemcsehatármenti üregben lévő szennyeződés*

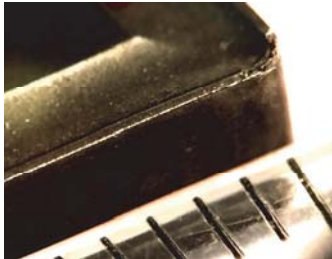
A forgács szerszám homloklapjával érintkező felületén (másodlagos alakváltozási zóna) számos kiálló anyagrézsz látható (10. ábra), melyek élesek és karcoló hatást gyakorolnak a szerszámra amennyiben alumínium oxidok, illetve réztartalmú ϵ -fázis.



10. ábra. *Forgács SEM képe mely a szerszám homloklapfelületével érintkezett (másodlagos alakváltozási zónából)*

4.2 A forgácsoló lapka kopásainak kezdeti elemzése

A forgácsoláshoz alkalmazott lapkákat nagyon igénybe vette a megmunkálás. A lapkákon nagy hátkopás és élkopás figyelhető meg (11. ábra). Az intenzív kopások az anyagba ékelődött kemény oxidszemcséknek és az anyag szívós viselkedésének következménye.



11. ábra. Forgácsoló lapka kopása

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben röviden áttekintettük a duplex acélokat és azok felhasználási fontosságát napjainkban. Bemutattuk a duplex acélok forgácsolhatósági problémáit. A szakirodalom és az esztergálási kísérleteinkből az alábbi következtetések vonhatóak le:

- A superduplex acél forgácsolása közben igen nagyarányú az abrúziós kopás.
- Az abrúziós kopást a forgácsban lévő kemény kiválások okozzák. Ezt bizonyítottuk a forgács szemcsehatár üregbe ékelődött elektronmikroszkópos képeivel és anyagösszetétel vizsgálataival.
- A lapka kopás előzetes vizsgálatai bizonyították a szakirodalomban tapasztaltakat, a kopás intenzív és nagyon érzékeny a forgácsolási körülményekre.

További kutatási célokban megfogalmazható a kiválasztott superduplex acél típus forgácsolhatóságának átfogó vizsgálata. Erőtani viszonyok feltérképezése, forgácsolt felület elemzése, valamint a forgács és a lapkakopás, esetlegesen létrejövő élrátét átfogó anyagtudományi vizsgálata.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyarmet Finomöntőde Kft.-nek a forgácsolási kísérletre öntött és hőkezelt munkadarabok gyártásáért.



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-I-OE-37 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának, valamint az EFOP-3.6.1-16-2016-00010 számú projekt támogatásával készült.

6. IRODALOM

- [1] Bődök, K. (1997). Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére. *Corweld, Budapest*.
- [2] Antal, K., Réger, M., Tóth, L. (1995). Szerkezeti anyagok I., BDMF, *Budapest*.
- [3] Alvarez-Armas, I. (2008). Duplex stainless steels: brief history and some recent alloys. *Recent Patents on Mechanical Engineering, 1(1)*, 51-57.
- [4] Gunn, R. (Ed.). (1997). *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. Woodhead Publishing.
- [5] Duplex stainless steel for storage tanks Brochure (<https://otk-sitecore-prod-v2-cdn.azureedge.net/-/media/files/products/forta/duplex-for-storage-tanks-brochure.pdf>)
- [6] <http://www.infomine.com>
- [7] de Paiva, J. M., Torres, R. D., Amorim, F. L., Covelli, D., Tauhiduzzaman, M., Veldhuis, S., ... & Fox-Rabinovich, G. (2017). Frictional and wear performance of hard coatings during machining of superduplex stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(1-4)*, 423-432.
- [8] Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T., & Littlefair, G. (2015). Chip formation mechanism and machinability of wrought duplex stainless steel alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(5-8)*, 1127-1135.
- [9] Diniz, A. E., Machado, Á. R., & Corrêa, J. G. (2016). Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(9-12)*, 3157-3168.
- [10] Krolczyk, G. M., Nieslony, P., & Legutko, S. (2015). Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(2)*, 347-354.
- [11] Selvaraj, D. P., Chandramohan, P., & Mohanraj, M. (2014). Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement, 49*, 205-215.
- [12] Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R. F., & Souza, A. J. (2018). Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-9*.
- [13] Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., Nieslony, P., & Wieczorowski, M. (2016). Surface morphology analysis of duplex stainless steel (DSS) in clean production using the power spectral density. *Measurement, 94*, 464-470.