

Kerámia marás optimalizálása és a megmunkálás aktuális trendjei

Optimization of ceramic cutting, and trends of machinability

Szerzők: Móricz László(1), Dr Viharos Zsolt János(2,3)

(1) Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Mechatronikai Képzési és Kutatási Intézet
H-8900 Zalaegerszeg, Gasparich Márk u. 18/A.

Tel: +36 88 624 000 / 6199, e-mail: laszlo.moricz@mk.uni-pannon.hu, web: <http://mechatronikazeg.hu>

(2) Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézete, 1111 Budapest, Kende u. 13-17. Tel.: +36 1 279 6 195, E-mail: viharos.zsolt@sztaki.mta.hu

(3) Kecskeméti Pallasz Athéné Egyetem, 6000 Kecskemét, Izsáki út 10., E-mail: viharos.zsolt@gamf.kefo.hu

Abstract

In this article get to summary the possible kinds of ceramic machinability, and get to details of the ceramic cutting most important influencing factors. In the next part of article get to review cutting technology optimized plan, which aim to revise the thrift of ceramic forming technology in industrial circumstances.

Összefoglaló

Cikkben összefoglalásra kerül a kerámiák megmunkálhatóságának lehetséges fajtái, valamint részletes kifejtésre kerülnek a kerámiák forgácsolhatóságával kapcsolatos legfontosabb befolyásoló tényezők-, és tulajdonságok. A cikk következő részében egy technológia-optimalizálási terv kerül bemutatásra, amelynek hosszútávú célja a kerámia ipari körülmények közötti megmunkálás gazdaságosságának javítása, és robusztussá tétele.

Kulcsszavak: energiatermelés, kerámia, megmunkálhatóság, technológia-optimalizálás, marás

1. BEVEZETÉS

A 21. századi növekvő villamos energiatermelés egyik fontos sarokkövét képezik a gázturbinák. A megfelelő hatásfok elérése érdekében a turbinák szélsőséges működési körülmények között kell, hogy működjenek emiatt a turbinák fejlesztése és előállításuk technológiai kérdései is egyre nagyobb kihívást állítanak a mérnökök elé. Az egyik legnagyobb kihívást okozó problémakör a magas hőmérséklettel szembeni ellenállóság javítása. Napjaink egyik leghatékonyabb hő elleni védelmi megoldása a lapátok kerámia bevonattal történő ellátása, ezzel egyidejűleg hűtőrendszer kialakítása a lapátok belsejében. A bevonat előállításának technológiájából adódik, hogy a lapát kerámia bevonatát minden esetben meg kell munkálni, ami a gyártási folyamat egy jelentős költségnyadát teszi ki. A cikk egyik célja, hogy átfogó képet adjon a kerámiák jelenlegi megmunkálhatóságáról. Bemutatásra kerülnek az alternatív megmunkálási technológiák, kiemelve ezek közül a marást, továbbá a legfontosabb megmunkálási paraméterek, lehetséges megmunkáló szerszámok, a velük szemben támasztott követelmények, valamint egy kísérletterv is, amely célja az optimális és robusztus kerámiamarási körülmények és paraméterek meghatározása. A cikk egyik egyedi részét képezi, hogy görcső alá kerül a megmunkáló szerszám pálya optimalizálása is, ami a kerámia megmunkálás tudományos irodalmában mostanáig hiányként mutatkozott.

2. NEMZETKÖZI ENERGIAFELHASZNÁLÁS

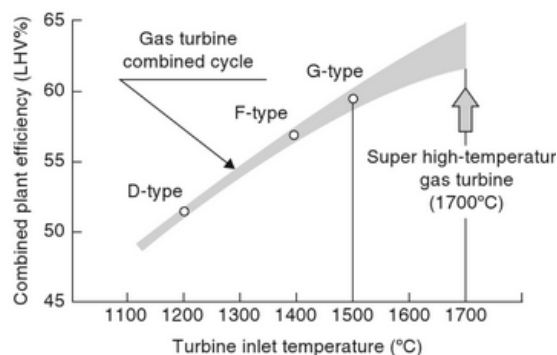
Az emberiség jelenleg tapasztalható technológiai fejlődése közvetlenül magával vonja az energiafelhasználás rohamos növekedését is. Az energiafelhasználás Kínában, és az USA-ba

messze meghaladja a többi ország energiaigényét, viszont a trendből látszik, hogy India, Japán és Oroszország is fokozatosan egyre jelentősebb szeletet vesz ki az energiafelhasználásból (is). [4] A felhasznált energiaformák közül a villamos energia az egyik legmeghatározóbb társadalmunkban. Előrejelzések szerint 2020-ig 206 billió dollárra fog emelkedni a kapcsolódó beruházási összeg, amely a teljes kapcsolódó költség 42%-át fogja kitenni. [1]

A villamos energia előállításnak számos módja van, a nem megújulótól a megújuló energiaforrásokig bezárólag. A tendencia tükrözi, hogy a gázturbinák mind technológiai kidolgozottságban, mind piaci szerepét tekintve is igen meghatározóak, így jelenleg ez tekinthető az egyik legfontosabb villamos energia előállítási eljárásnak. A technikai,- és gazdasági elemzések is tükrözik, hogy napjaink energiaiparának megkerülhetetlen szegmensét képezik a gázturbinák. A trendekben megfigyelhető, hogy a világ folyamatosan növekvő energiafelhasználása megkerülhetlenné teszi a turbinák folyamatos fejlesztését, amely állandó kihívást jelent a jelen mérnökei számára. [1] A cikk a turbinák előállítási folyamatának kisebb, ámde egyik legmeghatározóbb szegmensével foglalkozik: a lapátok bevonatának megmunkálhatóságának kérdéskörével.

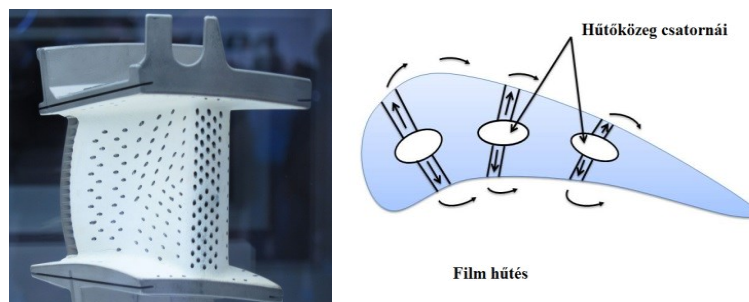
3. GÁZTURBINÁK HATÁSFOKJAVÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A gázturbinák hatásfokjavításának kulcsa két fő tényezőtől függ. Az első a lapátok megfelelő geometriai kidolgozása, a másik a turbinában áramló gáz hőmérséklete. Mivel a geometriából adódó hatásfokjavítás gyakorlatilag ma már teljes mértékben kiaknázott, így sokkal inkább az átáramló hőmérséklettel lehet javítani az energiatermelési folyamat paramétereit. Ennek több megoldási módszere is van (pl. kombinált ciklusú turbinák, ld. 1. ábra). A jelenlegi 1700 °C fok körüli hőmérsékletnél 60-65%-os hatásfok érhető el, azaz még további fejlesztések várhatóak ezen a részterületen. [3]



1. ábra: Turbinák hatásfok javítási lehetőségei [3]

A turbinalapátok működése közben jelentkező hőmérsékleti tartományban elengedhetetlen a turbinalapátok megfelelő hő elleni védelme. A gyakorlat szerint ennek a legjobb módja a lapát körüli filmhűtés, valamint a lapát megfelelő kerámia bevonattal történő ellátása.



2. ábra: Filmhűtés a lapát körül

Gyártástechnológia szempontból a bevonat és a hűtőcsatornák kialakításának napjainkban bevált módja a teljes kerámieréteg felvitele utáni utólagos megmunkálás, anyagleválasztás.

4. TURBINALAPÁTOK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA

A szakirodalom áttekintése az tükrözte, hogy a következő megmunkálások lehetségesek kerámia alakításra:

- megmunkálás EDM-el [8],[10],[11]
- szabályos élgeometriával (marás, esztergálás) [12], [13]
- köszörülés [14]
- lézer [15]
- víz [19]
- kombinált technológiák (vibrációs technika) [10]

A megmunkálások legnagyobb hátránya a viszonylag drága gépidő, valamint a drága technológia. Ezek közül a szabályos élgeometriával történő megmunkálás a napjainkban legegyszerűbben hozzáférhető technológia, viszont a gyors szerszámkopás miatt gazdaságtalan lehet, ha nincs optimalizálva a technológia az adott kerámiára és megmunkálási feladatra. Ezen a területen még számos nyitott elméleti és a gyakorlati kérdés is van, pl. hogy a marási technológia-e a legköltséghatékonyabb ezen kerámia-megmunkálás elvégzésére.

4.1 Megmunkálás szabályos élgeometriával

A marással történő megmunkálást számos paraméter befolyásolja, azonban az irodalom tanulmányozása azt tükrözte, hogy a legjobban befolyásoló tényezők a következők:

Technológiai paraméterek

axiális fogásmélység
radiális fogásmélység
forgácsolási sebesség
előtolás
szerszámdőlési szög

Szerszámgeometria

homlokszög
hátszög
fogszám

Szerszámanyag, bevonat

szerszámtest anyaga
bevonat típusa
bevonat vastagsága
szemcse nagysága
bevonatrétegek száma

Hűtés típusa

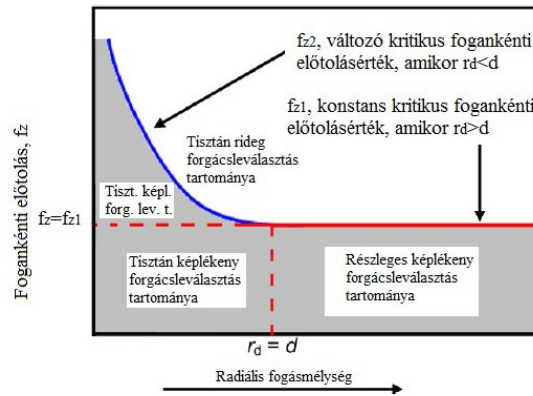
Egyéb változók

kombinált megmunkálási technológiák

4.2 Technológiai paraméterek hatása a megmunkálási folyamatra

A szabályos élgeometriával történő megmunkálhatóságot leginkább befolyásoló munkadarab jellemzők az anyag keménysége, és ridegsége. A kerámiák szabályos élgeometriával történő megmunkálásának egyik kulcs kérdése, hogy a rideg forgácsleválasztási állapotban történő anyagleválasztás elvihető-e a képlékeny forgácsleválasztás tartományába. K. Ueda és munkatársai számos kerámia típust forgácsoltak ennek a kérdésnek a megválaszolása érdekében és arra a megállapításra jutottak, hogy azok a kerámiák, amelyek magas a törési szilárdsággal rendelkeznek, megfelelő forgácsleválasztási paraméterek (vágósebesség, előtolás) mellett elvihetők a képlékeny forgácsleválasztás tartományába. Azonban alacsony törési szilárdság mellett nem találtak olyan paraméterkombinációt, amellyel sikerült volna elmozdítani a folyamatot a képlékeny anyagleválasztás tartományába.[5].

A képlékeny megmunkálhatóságra vonatkozó másik kiemelendő szerzők Muhammad A., és munkatársai, akik arra a kérdésre keresték a választ, melyek azok a forgácsolási paraméterek, amelyek szerepet játszanak a képlékeny forgácsleválasztás elérésében. Megállapították, hogy a fogásmélység-előtolás értékekhez tartozik egy olyan kritikus érték, amely hatással van a kialakuló forgácsleválasztási folyamatra. Eredményeiket a 3. ábra foglalja össze [6]



3. ábra: Kritikus előtolás-fogásmélység a képlékeny alakváltozás tartomány eléréséhez [6]

A kísérletek során arra a következtetésre jutottak, hogy egy kritikus fogásmélység-előtolás alatt a vizsgált anyag mindig a képlékeny forgácsleválasztás tartományában viselkedik. Egy bizonyos fogásmélység alatt az előtolás értéke nagyban növelhető anélkül, hogy a rideg tartományba mozdult volna el a forgácsképződés. A fentiek tükrözik, hogy a képlékeny forgácsleválasztást nagyban befolyásolja a megválasztott fogásmélység értéke. Ezen belül is különbséget kell tenni *axiális és radiális fogásmélység* között. [6] [7][8]

Amíg axiális fogásmélységnél a szerszám tengely menti anyagbemerülését értjük, addig radiális fogásmélységnél a szerszám fogásban lévő átmérője vesz részt a forgácsleválasztás folyamatában. A fogásmélység elsősorban a forgácsolási erő, valamint a képlékeny forgácsleválasztás tartományának behatárolásában játszik szerepet.

A kísérletekhez az irodalom ajánlást ad közelítő képlet formájában az optimális fogásmélység meghatározásához, amely a következő [8]:

$$d_{crit} = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_{Ic}}{H} \right)^2$$

Ahol:

- E: young modulus
- H: keménység
- K_{Ic} : törési szilárdság

Elvégezve a számítást az eredmény adódott, hogy a vizsgálni kívánt anyagnál 1,7um a javasolt fogásmélység a képlékeny forgácsleválasztás tartományában történő megmunkáláshoz.

A technológia egy másik fontos paramétere a szerszám dőlés szöge. [9] Elsősorban a gömbmaróval történő megmunkálás során fontos ez a kérdés, de mivel a kísérletek is ezzel a fajta szerszámmal kerülnek elvégzésre, így kiemelt figyelmet kell fordítani ezen paraméter meghatározására. Az irodalmi áttekintés azt mutatja, hogy a szerszám dőlésszögének optimális értéke 40-60° között keresendő, a kerámia anyagától függően.

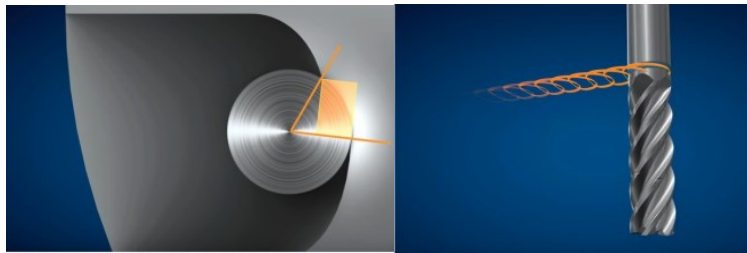
4.2 Szerszámparaméterek hatása a megmunkálási folyamatra

A megmunkálási technológiára vonatkozó másik fontos kutatási terület a megmunkáló szerszámok vizsgálata. E. Ferraris és munkatársai ZnO₂ kerámia megmunkálása során vizsgálták az alkalmazott marószerszám élettartamát. A kísérleteik során arra a következtetésre jutottak, hogy nanoszemcsés gyémánt bevonat alkalmazásával a bevonatolatlan szerszámhoz képest megközelítőleg harmincszoros élettartam növekedés érhető el [8]. A szerszám élettartam növelésének másik ígéretes lehetősége a kombinált megmunkálási folyamat alkalmazása. Toru Kizaki és munkatársai a hagyományos esztergálási technológiát kombinálták lézeres megmunkálással. Kísérletükben lézerral hevítették a vágóél előtti anyagot, így a rideg anyagleválasztási zóna helyett képlékeny anyagleválasztást sikerült elérni. Kutatásaik eredményeként sikerült 35%-al csökkenteni a forgácsolási erő nagyságát. [10]

Összességében azonban elmondható, hogy kerámia megmunkálást csak megfelelő nagyságú gyémánszemcse bevonattal ellátott szerszámmal lehet végezni.

4.3 Szerszámháta hatása a megmunkálási folyamatra

A szerszámháta kerámia megmunkálásra történő optimalizálását a szakirodalom nem tárgyalja kellő mértékben, ezért a cikkben röviden bemutatásra kerül a kísérletek során alkalmazandó szerszámháta, valamint a megmunkálási folyamatot leginkább befolyásoló paraméterek. A kísérletek során használt szerszámháta EdgeCam szoftver segítségével kerülnek legenerálásra, hullámformára a kiinduló szerszámháta. A hullám „ciklois” háta lényege, hogy a megmunkálási folyamat során állandó szerszámátfogással dolgozik (4. ábra). Ennek köszönhetően az irányváltások során is állandó a szerszámterhelés, ami hagyományos szerszámhátnál nem áll fent.



4. ábra: Hullámforma szerszámháta

Az összefüggések tükrözik, hogy a forgácsolási erőt a munkadarab anyaga (k_c), az alkalmazott axiális (a_p) és radiális fogásmélység (h_k), valamint a fogankénti előtolás határozza meg [18]

A háta előnye, hogy bár kis radiális, és axiális fogásmélységgel dolgozik, ellenben nagy előtolás értékkel kompenzál, így összességében csökkenthető a megmunkálási idő a hagyományos technológiával szembe, azonos élettartam mellett. Másik lehetőség a kisebb előtolás érték alkalmazása, a hagyományos technológiával párhuzamba állítva ugyanannyi idő alatt, de lényegesen kisebb szerszámkopás mellett végezhető el a megmunkálás.

5. A TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK LESZŰKÍTÉSE, KÍSÉRLETTERVEZÉS

Az optimumkeresés első lépéseként egy lineáris kísérletterv kerül kidolgozásra. Ennek feladata, hogy megállapítható legyen, mely paraméter van döntő befolyással a megmunkálási folyamatra. A kísérletek ezen fázisában nem várt, hogy az összefüggések függvényszerűen feltárásra kerüljenek. A lineáris kísérletek elvégzése után, a kísérletterv által kijelölt meghatározó változók terében egy újabb iterációs lépés során egy újabb, nemlineáris kísérletterv kerül kidolgozása, amely mérései alapján a folyamatváltozók között már kvalitatív (nemlineáris és multidimenzionális) modell építhető, amely iteratív felhasználásával, nagy pontossággal be lehet határolni a globálisan optimális technológiát [16] A megmunkálás gazdaságossá tétele érdekében a szerszámélettartam és a megmunkálási idő optimumának meghatározására törekszünk, tehát, tipikusan egyidejűleg több szempontú optimalizálásra van szükség. [17]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben összefoglalásra kerültek a kerámiák megmunkálásának trendjei, alternatív technológiái, a szabályos élgeometriával történő megmunkálásuk legfontosabb paraméterei. Az irodalom azt tükrözi, hogy a szerszám élettartamra vonatkozólag két kulcstényező kritikus: egyik a megfelelő technológia hozzárendelése a megmunkáláshoz, a másik a megfelelő szerszám kiválasztása. A harmadik, és az irodalom által kevésbé/nem tárgyalt, ám mégiscsak fontos paramétercsoport a megmunkáló szerszámháta vonatkozik. Természetesen, további számos paraméter befolyásolja a szerszám viselkedését, illetve, nem ismertek egyértelműen a paraméterek közti összefüggések, így

elengedhetetlen egy kísérletsorozat kidolgozása, és elvégzése a technológiai optimum feltárásához. A kísérletterv sorozat két lépcsőre bontható. Az egyik egy lineáris kísérletterv, ahol behatárolásra kerül, mely paraméterek azok, amelyek meghatározó hatással vannak a célértékekre. A leginkább befolyásoló paraméterek feltárása után egy nemlineáris kísérlet sorozat során megkapjuk ezen hatások és a célértéket összefüggéseit, amely segítségével a folyamat optimalizálása megoldhatóvá válik.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Brandon Owens: The rise of distributed power, General Electric, 2014
- [2] Viharos, Zs. J.; Kis K. B.: Integrated Experimental design and parameter optimization under uncertain process circumstances, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic, ISBN 978-80-01-05793-3, pp. 1219 - 1224.
- [3] Peter Janson: Modern gas turbine system. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 20, 2013
- [4] <https://yearbook.enerdata.net/register.html>
- [5] K. Ueda, T. Sugita, H. Hiraga: A J-integral Approach to Material Removal Mechanisms in Microcutting of Ceramics (1991)
- [6] Muhammad Arif, Mustafizur Rahman, Wong Yoke San: Analytical model to determine the critical conditions for the modes of material removal in the milling process of brittle material. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 1925–1933
- [7] Muhammad Arif: Ultraprecision ductile mode machining of glass by micromilling process. Journal of Manufacturing Processes 13 (2011) 50–59
- [8] Eleonora Ferraris, Jan Bouquet, Dominiek Reynaerts, Bert Lauwers, Heleen Romanus: Micromilling of sintered ZrO₂ ceramic via CBN and diamond coated tools. Procedia CIRP 14 (2014) 371 – 376
- [9] Kevin Foy, Zhiwei, Takashi Matsumura, Yong Huang: Effect of tilt angle on cutting regime transition in glass micromilling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 315–324
- [10] Toru Kizaki, T. Ogasahara, N. Sugita, M. Mitsuishi: Ultraviolet-laser-assisted precision cutting of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 267–275
- [11] Chen-Tsu Fu, Jeng-Ming Wu: The effect of electro discharge machining on the fracture strength and surface microstructure of an Al₂O₃-Cr₃C₂ composite. Materials Science and Engineering, A188 (1994)
- [12] B. Lauwers, J.P. Kruth, W. Liu, W. Eraerts, B. Schacht, P. Bley: Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials. Journal of Materials Processing Technology 149 (2004) 347–352
- [13] Lingfei Ji, Yinzhou Yan, Yong Bao, Yijian Jiang: Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO₂ laser by single-pass process. Optics and Lasers in Engineering 46 (2008) 785–790
- [14] Jun Cheng,*, Guoqiang Yina, Quan Wena, Hua Songb, Yadong Gong: Study on grinding force modelling and ductile regime propelling technology in micro drill-grinding of hard-brittle material. Materials Processing Technology
- [15] Lingfei Ji, Yinzhou Yan, Yong Bao, Yijian Jiang: Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO₂ laser by single-pass process. Optics and Lasers in Engineering
- [16] Viharos, Zs. J.; Kis K. B.: Integrated Experimental design and parameter optimization under uncertain process circumstances, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic, ISBN 978-80-01-05793-3, pp. 1219 - 1224.
- [17] Monostori, L.; Viharos, Zs.J.; Hybrid, AI- and simulation-supported optimisation of process chains and production plants, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, 2001, pp. 353-356.
- [18] <http://www.edgcam.hu/edgcamhullamforma>
- [19] Jiyue gong, Thomas J. Kim: An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics, Wear 199 (1996) 275-282