

## Kutatási irányvonalak különböző anyagú megmunkált felületelek kitöredezéseinek vonatkozásában

### Research trends regarding the chipping of machined edges of different materials

Gyurika István Gábor

BME, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, E-mail: gyurika@manuf.bme.hu

Igali Júlia Csenge

BME, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, E-mail: julicsengi@gmail.com

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A különböző anyagokból készült előgyártmányok megmunkálása során komoly problémaként jelentkezik azok élének kitöredezése. A jelenség a gyártott alkatrész későbbi működése (pl. méretpontosság), élettartama szempontjából, illetve esztétikailag is gondot jelenthet. Az utóbbi években számos kutatás irányult a jelenség alapos megismerésére, a befolyásoló tényezők feltárására, ezen keresztül pedig a károsodás mértékének csökkentésére. Napjainkban már sokan kutatják a rideg anyagok ilyen jellegű viselkedését, hiszen ezekre fokozottan jellemző a kitöredezés jelensége. Kőzetekkel kapcsolatosan azonban elenyésző számú részletes, kidolgozott tanulmány áll rendelkezésünkre, éppen ezért a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány –és technológia Tanszékén jelenleg is folytatunk ilyen jellegű kutatást. Cikkünkben szeretnénk ismertetni a főbb irányvonalakat a kitöredezés-vizsgálatban, illetve röviden ismertetni munkánkat.

*Kulcsszavak:* élkitöredezés, kőmegmunkálás, rideg anyagok, marás, minősítés

**ABSTRACT:** During the machining of workpieces made from different materials, the chipping of edges appears as a serious problem. This phenomenon can be damaging in many ways- it may have an effect on the functioning and the longevity, but can be an aesthetic problem as well. In the last few years there have been a lot of researches with the aim to find the parameters with an effect on edge chipping, and with the help of this, to reduce the rate of it. Nowadays there are a lot of researches in connection with the edge chipping of brittle materials, as they tend to produce this phenomenon almost always during machining. However, there are only a few detailed studies in connection with different kinds of stones, and that is why we are currently making researches on this field at the Budapest University of Technology and Economics. In our article, we would like to introduce the main trends in the research of edge chipping, and we would also like to shortly summarize our results.

*Keywords:* edge chipping, stone machining, brittle materials, milling, qualification

#### 1 BEVEZETÉS

Napjainkban a különböző anyagú előgyártmányok élének megmunkálás következtében kialakuló kitöredezéseit sokan vizsgálják, hiszen a jelenség mértékének csökkentése számos előnnyel járhat: csökkenthetők a megmunkálással járó, illetve a későbbiekben, a legyártott alkatrész megmunkálásakor bekövetkező esetleges károsodások által generált költségek, biztonságosabban működhet az adott gyártmány, illetve az esztétikai jellemzők is javíthatók. Számos rideg anyagra irányultak kutatások, a legjelentősebbek ezek közül a különböző kerámiákkal és üvegekkel kapcsolatos vizsgálatok. Napjainkban már jelentős forrás áll rendelkezésre ezekkel kapcsolatban. A különböző kötípusok hasonló jellegű viselkedését azonban eddig kevesen vizsgálták. Ennek elsődleges oka a kőanyagok heterogén szerkezete, mely jellegzetesség miatt nagyon nehéz egyértelmű következtetéseket és szabályszerűségeket megfogalmazni. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány- és technológia Tanszékén 2011 novembere óta folytatnak kutatásokat kövek élének kitöredezésével kapcsolatban. Jelen cikk az első fázisa egy technológiai alapú kutatási folyamatnak, melynek során vizsgálni fogjuk a mart gránit felületek élének átlagos kitöredezési mértékét az átlagos szemcsenagyság és az alkalmazott technológiai paraméterek függvényében.

## 2 AZ ÜVEG ÉLKITÖREDEZÉSÉNEK CSÖKKENTÉSÉRE IRÁNYULÓ KUTATÁSOK

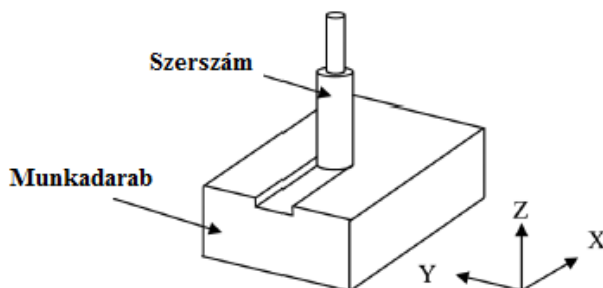
A bevezetésben már említettük, hogy kiemelten fontos területként kutatják a mérnökök a különböző üvegtípusok élének kitöredezési formáit és eseteit. Karim et al (2011) tanulmányozták az üvegre jellemző kitöredezéseket. Az üveg az egyik legnehezebben megmunkálható anyag rideg természete és különleges szerkezete miatt, ugyanis a repedés, illetve az élek kitöredezése folyamatosan veszélyt jelent a gyártás során. A megmunkált üveg élkitöredezésének (amely igen gyakori 50 HRC-nél keményebb anyagok esetén) csökkentése érdekében nagyon fontos, hogy megtaláljuk a megfelelő paramétereket a gyártási folyamathoz. A tanulmányt író kutatók köbös bórnitrid szerszámot használva azt vizsgálták, hogy hogyan lehet a paramétereket a leghatékonyabban optimalizálni.

### 2.1 Kísérletek végrehajtása, elemzési módszer

Az elemzés során a kutatók a Taguchi-módszert használták, amely az egyik hatékony módja a gyártás során a legjelentősebb paraméterek azonosításának. A módszer szerint a minőségre ható tényezők alapvetően két csoportra, kontroll-és zajfaktorokra oszthatók. A kontrollfaktorok azok a paraméterek, amelyek különböző értékekre való beállításával tudjuk befolyásolni a gyártás kimenetelét. A zajfaktorok pedig azok a jellemzők, amelyek hatásán nem tudunk, vagy nem éri meg módosítani az adott folyamat során. A Taguchi módszer lépései:

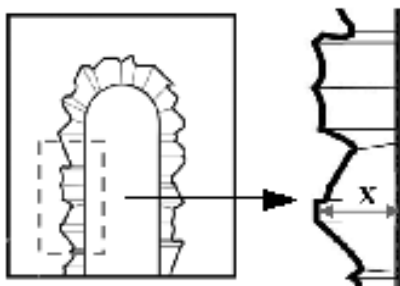
1. az ún. ortogonális elrendezés kiválasztása (A standard előírás Taguchi szerint  $L_{16}(4^4)$ , amelynek jelentése, hogy tizenhat kísérletet végzünk el, négy kontrollfaktorral, minden faktornak négy szintjén, azaz négy különböző értéken);
2. adatelemzés;
3. az optimális paraméterek azonosítása;
4. a választott optimális paraméterekkel ellenőrző kísérletek futtatása.

Karim és társai kontrollfaktoroknak a következőket választották: kenési nyomás, a főorsó sebessége, előtolás, illetve az axiális fogásmélység. Az egyes faktorokhoz tartozó 4 szint kiválasztása után a következő lépés a kísérletek lefuttatása volt az előírt értékek beállításával. A kutatók ezt egy Cibcibbati Milacron Saber TNC750 VMC megmunkálóközponttal végezték. A szerszám munkadarabhoz viszonyított mozgása az 1. ábrán látható.



**1. ábra.** A szerszám mozgása a munkadarabhoz képest (*the move of the tool compared to the workpiece*) (Karim et al 2011 nyomán)

A vizsgálatok során a köbös bórnitrid szerszám pozitív X irányban állandó fogásmélységgel mozgott 30 mm-t. A kenési rendszer a vágás közben jellemző hőmérséklet kontrollálására, illetve a szerszám és a munkadarab közötti súrlódás csökkentésére szolgált. Mivel a gyártás szempontjából a kitöredezés szélessége a legfontosabb paraméter, ezért a kutatók tanulmányukban a kitöredezést a 2. ábrán látható módon annak szélességével jellemezték.



**2. ábra.** A kitöredezés szélessége (*width of edge chipping*) (Karim et al 2011 nyomán)

## 2.2 Kiértékelés

A kapott eredmények kiértékelése az ún. jel-zaj viszony válaszanalízissel, illetve a Pareto ANOVA varianciaanalízissel történt. Mindkét módszerrel arra a következtetésre jutottak, hogy üvegmarás esetén a négy választott faktor közül a legnagyobb befolyással a fogásmélység rendelkezik. Ezt követi az előtolás, a kenési nyomás, végül pedig a főorsó sebessége. A Pareto ANOVA analízis alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a legjobb kombináció az A4 B4 C1 D1, azaz hogy a választott kontrollfaktorok közül a főorsó sebességét és a kenési nyomást a négy közül a legmagasabb, míg az előtolást és a fogásmélységet a legalacsonyabb szintre érdemes beállítani a kitöredezések szélességének minimalizálása érdekében. A fogásmélység és az előtolás ezen beállítása főként azért indokolt, mert ezek csökkentésével a fogankénti anyagleválasztás is kisebb mértékű lesz, amely a szükséges energia, és ezáltal a vágóerő értékét is csökkenti, ez pedig kisebb szélességhez vezet.

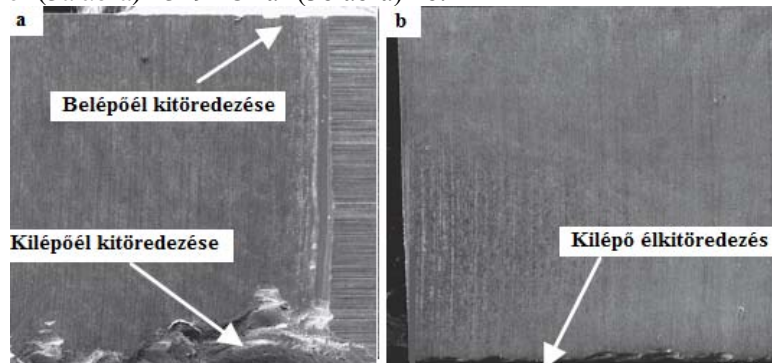
A Taguchi-módszer utolsó lépése az ellenőrző kísérletek végrehajtása, amelyet a kutatók a már említett A4 B4 C1 D1 faktorkombinációval hajtottak végre. Az eredmények azt mutatták hogy a kitöredezési szélességek jelentősen csökkentek az optimalizált paraméterek mellett.

## 3 A SZILÍCIUM-NITRID KERÁMIÁKRA JELLEMZŐ ÉLKITÖREDEZÉSI MECHANIZMUSOK VIZSGÁLATA LÉZERES MARÁS ESETÉN

Yang et al (2009) kutatásukban a szilícium-nitrid kerámiák lézeres marás következtében fellépő élkitöredezéseiről írnak. A kerámiák megmunkálásakor fellépő élkitöredezés jelentős korlátot jelent a kerámia elemek dizájnjának és felhasználásának területén. A jelenség fellépésének megértését már évtizedekkel ezelőtt célul tűzték ki egyes kutatók (McCormick és Almond tanulmányozták a különböző anyagok valamilyen külső behatolási folyamat esetén jellemző mechanikai viselkedését, a felszínt a darab valamely éle közelében egy adott eszközzel terhelve).

### 3.1 A megemelt hőmérséklet élkitöredezésre gyakorolt hatása kerámiák esetén

Yang és társai azt vizsgálták, hogy a megemelt hőmérséklet milyen hatással van kerámiák esetén az élkitöredezésekre. A szilícium-nitrid kerámiákra magas keménységű és extrém ridegségük kitöredezések fokozottan jellemzőek, és szobahőmérsékleten nehezen elkerülhetők, gyakorlatilag a szerszám és a munkadarab is károsodhat ilyen körülmények mellett. A kutatók kimutatták, hogy megemelt hőmérsékleten jelentősen nő az említett anyag megmunkálhatósága. A megemelt hőmérséklet hatásának bizonyítására lézeres marást (LAM technológia) alkalmaztak. Kísérleteket végeztek 838, 1017, 1172, 1319, 1349, 1595 °C-on, amelyek eredményei azt mutatták, hogy a munkadarab magasabb hőmérséklete jelentősen csökkentheti a kitöredezéseket. Amikor az anyagot a lágyulási pontja alatt munkálták meg, látható volt néhány makroszkopikus kitöredezés a belépő élen. Amikor viszont a lágyulási pont fölötti hőmérsékleten munkáljuk meg az anyagot, akkor a belépőélen nincs makroszkopikus elváltozás, illetve a kilépőn is jelentősen csökkennek a méretek, miközben a hőmérséklet 838-ról (3a ábra) 1349 °C-ra (3b ábra) nő.



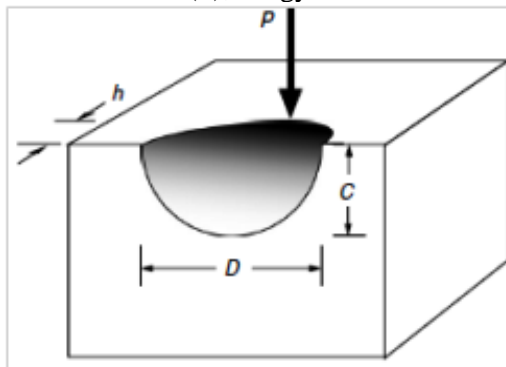
**3. ábra.** Az élkitöredezések mérete  $T=838^{\circ}\text{C}$ , illetve  $T=1349^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet esetén (*the size of edge chipping at temperatures of  $T=838^{\circ}\text{C}$  and  $T=1349^{\circ}\text{C}$* ) (Yang et al 2009 nyomán)

A kilépő élek károsodása és a hőmérséklet közötti összefüggés a következő tendenciát mutatja;  $1000^{\circ}\text{C}$ -ig a kilépő kitöredezések mérete állandóan csökkent. Amikor a hőmérséklet magasabb az üvegesedési pontnál ( $1150^{\circ}\text{C}$ ), a méretek rohamosan elkezdnek csökkenni a hőmérsékletnövekedéssel, majd  $1300^{\circ}\text{C}$  körül drámai esés tapasztalható. Amint a hőmérséklet tovább növekszik, a méretcsökkenés lelassul. A kutatók végkövetkeztetésként azt vonták le, hogy teljesen

nem szüntethető meg ez a jelenség magas hőmérsékleten sem, azonban LAM megmunkálás esetén 1300 és 1400 °C közötti hőmérsékleten a kitöredezések méretében jelentős csökkenést lehet elérni.

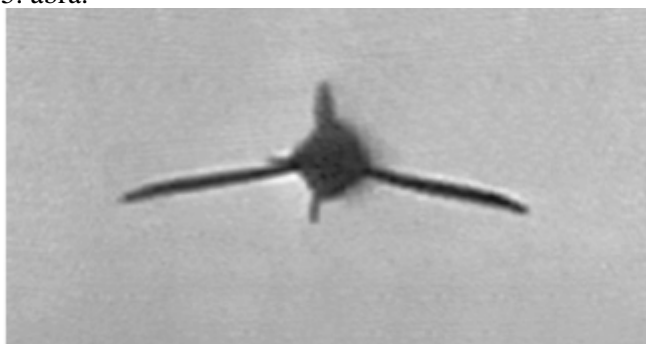
#### 4. RIDEG ANYAGOK KITÖREDEZÉSÉNEK VIZSGÁLATA A TERHELÉSI TÁVOLSÁG ÉS AZ ANYAG KEMÉNYSÉGÉNEK FÜGGVÉNYÉBEN

Chai és Lawn (2007) a kitöredezések alakulását vizsgálták rideg, szilárd anyagokban, hegyes szerszám használata mellett. Csiszolt, derékszögű éllel rendelkező munkadarabok felületét terheltek monoton növekvő, normál irányú, koncentrált erővel ( $P$ ), ahogy az a 4. ábrán látható.



**4. ábra.** A terhelő erő és a kitöredezés modellje Chai és Lawn elmélete szerint (the model of force and edge chipping according to Chai and Lawn) (Chai et al 2007 nyomán)

Méréseiket az élektől előre meghatározott  $h$  távolságokban való terheléssel, homogén üveg és kerámia anyagokra végezték. Az üveg esetében a kitöredezés jelenségét kamerával is rögzítették, a felvétel egy képkockáját mutatja az 5. ábra.



**5. ábra** Az üveg anyagokra jellemző, koncentrált terhelés hatására létrejövő, kitöredezéshez vezető repedések jellege (the character of flakes appearing on glass materials near concentrated force) (Chai et al 2007 nyomán)

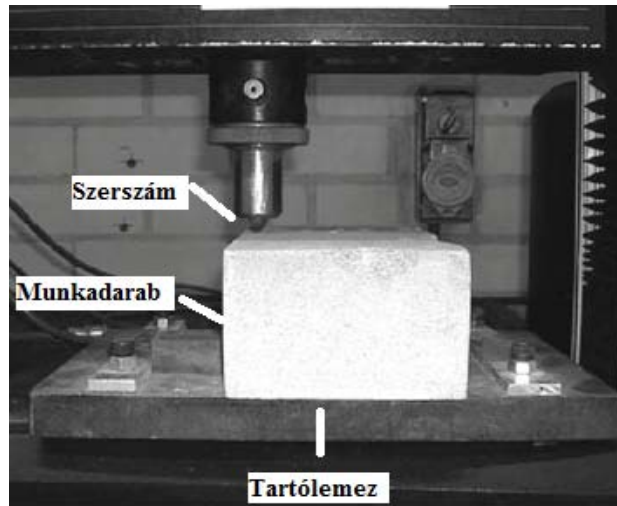
Az eszköz bemélyedése radiális, a terhelési pontból kiinduló repedéseket eredményezett, esetünkben, a képen látható módon felülnézetből a szélekhez képest párhuzamos, illetve merőleges irányban (5. ábra). Az éllel párhuzamos hasadás a domináns, lefelé és oldalirányba növekedve, kitörést eredményezve egy kritikus  $P_F$  terhelésnél. Érdekes eredmény, hogy a kitöredezések alaktanában geometriai hasonlóságot fedezhetünk fel anyagtól függetlenül. A kutatók azt is kimutatták, hogy éles szél esetében a hozzá közel eső terhelés akár kifejezetten nagy mennyiségű anyagot is leválaszthat. A kitöredezés alakját negyed-ellipszoiddal közelítették, ahogy az a 4. ábrán látható, ahol  $h$  a kitöredezés mélysége,  $C$  a szélessége,  $D$  pedig a hossza.

#### 5. KÖZETEK ÉLKITÖREDEZÉSÉNEK VIZSGÁLATA

Jelen kutatás elsődleges célja a különböző kőanyagok átlagos kitöredezési mértékének és maximális kitöredezési mélységének minősítése, valamint a különböző megmunkálási paraméterváltozások élkitöredezésre gyakorolt hatásának vizsgálata. Ennek megfelelően, a tanulmányt író csapat kiemelt figyelmet fordított a kövekkel kapcsolatos élkitöredezési kísérletekre.

### 5.1 Koncentrált erőhatásnak kitett kőelek vizsgálata

Bao et al (2011) kutatásukban új modellt állítottak fel az élkitöredezésekhez szükséges erők kalkulálására koncentrált terhelést kifejtő eszköz használata mellett. A kutatók kísérleteikkel bizonyítani kívánták, hogy a megmunkálás során kitört darabok anyagtól függetlenül hasonló geometriával rendelkeznek. Céljuk volt továbbá a maximális, a törés megjelenése előtti pillanatban fennálló terhelő erő és a terhelés éltől vett távolsága közötti kapcsolat meghatározása. Számos kísérletet hajtottak végre négy különböző típusú homokkővön. A kísérletekhez használt darabok téglalap alakúak voltak, melyeket a tesztek előtt sütőben hőkezelték 70°C-on kb. 24 óráig, ezzel elérve, hogy mindegyik munkadarabnak ugyanolyan legyen a nedvességtartalma. Hogy minimalizálják a különböző felületek sajátosságainak befolyását, a munkadarabok felülete egyenletesre lett munkálva a teszt előtt. A kutatók a tesztek egy Instron 5567 univerzális tesztgépen hajtották végre, a 6. ábra szerinti elrendezésben.



**6. ábra.** Kísérleti elrendezés a különböző kővek élkitöredezéseinek vizsgálatánál (*experimental setup while examining the edge chipping of different stones*) (Bao et al 2009 nyomán)

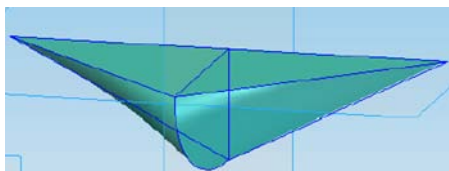
Kísérleteik során a szerszámmal az éltől meghatározott, állandó távolságban fejtettek ki normál irányba, koncentrált terhelést a munkadarabra.

A kutatás kimutatta, hogy a szakirodalomban korábban megjelent elemzések (pl. Evans, 1984) helytelen igénybevételi viszonyokat feltételeznek, ezért az általuk felállított egyenletek a vágóerő helytelen meghatározásához vezetnek. A Bao és társai által kifejlesztett modell a terhelő erő és az energiaeloszlás analízisén alapszik, felhasználva a törés mechanikájával kapcsolatos ismereteket, a kitört darabok geometriai hasonlóságát, illetve a különböző kőveken végrehajtott vágási tesztek eredményeit. A vizsgálatok alapján a kutatók azt a következtetést vonták le, hogy a terhelés éltől vett távolsága és a maximális erő között egyértelmű kapcsolat van, ez alapján állítottak fel egy becslési rendszert a mérési eredményekre. Az ehhez használt modelljük hasonló a 4. ábrán láthatóhoz: a kitöredezés alakját negyed-ellipszoiddal közelítik. A kutatók kísérleteik alapján további következtetésként vonták le, hogy a vágóerő teljes munkája arányos a terhelési távolság négyzetével, illetve arra az eredményre jutottak, hogy koncentrált terhelés esetén ezen munkának csak közelítőleg 10%-a fordítódik az új felületek kialakulására.

### 5.2 A legújabb eredmények kővek élkitöredezésének vizsgálatában

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány-és Technológia Tanszékén 2011 óta folynak kísérletek kővek élkitöredezéseinek vizsgálatára, valamint az élkitöredezési jellemzők objektív minősítésére alkalmas mérőszám kidolgozására. Gyurika (2013) egy korábbi tanulmányban elemezte az élkitöredezések folyamatát, pontosabban, hogy az NC vezérlésű kőmegmunkáló központokkal végzett kőmarások során hogyan törnek ki az egyes mintadarabok élei. A tanulmányban szereplő kutatás célja egy olyan helyettesítő test megtalálása volt, amelyet hatékonyan alkalmazni lehet a mart gránit termékek éleinél kialakuló kitöredezések minősítő számításaihoz. A helyettesítő test esetében követelmény volt, hogy a test térfogata a lehető legjobban közelítse meg a terméknek az adott kitöredezés által létrejövő térfogatcsökkenését- ez a korábbi, pontatlanul közelítő modellekhez képest komoly előrelépést jelentett. További igényként merült fel, hogy a test geometriájának meghatározásánál lehetőség szerint minél kevesebb kitöredezési geometriai

adatot kelljen felhasználni. A kutató a vizsgálati folyamatban elsőként egy NC vezérlésű kőmegmunkáló központtal, két különböző gránittípuson (Giallo Farfalla és Rosa Beta) alakított ki összesen 10 mintafelületet. Ezt követően az egyes mintafelületeket egy laser scanner segítségével digitalizálta, majd egy gyors prototípus szoftverrel különválasztotta az egyes kitöredezéseket és egyenként meghatározta azok térfogatait. A kiértékelési fázisban összesen három testet vizsgált az alapján, hogy melyik test lenne a legalkalmasabb a kitöredezés által keletkező térfogatcsökkenés leírására. Mind a három test esetében követelmény volt, hogy egyszerűen számíthatóak legyenek a térfogataik, hiszen csak ekkor lehet hatékonyan felhasználni őket a kitöredezési jellemzők számításánál. A kiértékelési folyamat eredményeképpen megállapítható, hogy az ellipszis-alapú összetett kúptest (7. ábra) a két vizsgált gránit esetében nagy pontossággal helyettesíteni tudja a kitöredezett térfogatokat.



7. ábra Helyettesítő test (*The replacement body*) (Gyurika (2013) nyomán)

## 6 ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben a különböző anyagok élének kitöredezésével kapcsolatosan mutattunk be néhány kutatási irányelvet. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és –technológia Tanszékén jelenleg is kutatjuk a különböző kőtípusok megmunkálása során az élek károsodását. Ennek rövid ismertetése mellett kitértünk a különböző rideg anyagok ilyen jellegű viselkedésére is. A cikk alapján a következőket állapíthatjuk meg:

1. Az üveg marásakor az optimalizálási módszerek és elemzések azt mutatják, hogy ennek az anyagnak a megmunkálásakor a négy legfontosabb paraméter a fogásmélység, a főorsó sebessége, a kenési nyomás és az előtolás. Kísérleti úton bebizonyosodott, hogy a legjelentősebb hatással a fogásmélység bír, ezt követi az előtolás, a kenési nyomás és végül a főorsó sebessége.
2. Kerámiák lézeres marása (LAM technológia) esetén bebizonyosodott, hogy megemelt hőmérsékleten jelentősen nő az említett anyag megmunkálhatósága. A végső következtetés az lett, hogy ugyan a kitöredezés jelensége teljesen nem szüntethető meg, de LAM megmunkálás esetén 1300 és 1400 °C közötti hőmérsékleten a kitöredezések méretében jelentős csökkenést lehet elérni.
3. Általánosan megfigyelhető jelenség rideg anyagok esetén, hogy monoton növekvő normál irányú koncentrált terhelés mellett a kitört forgácsok geometriája jelentős hasonlóságot mutat anyagtól függetlenül.
4. Különböző gránitokkal végzett kísérletek arra az eredményre vezettek, hogy mart gránitfelületek esetében az ellipszis-alapú összetett kúptest nagy pontossággal helyettesíteni tudja a kitöredezett térfogatokat.

## 7 IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Ab Karim, M. S. ; Sarhan, A.; Shukor M. 2011. Experimental Study on Minimizing Edge Chipping in Glass Milling Operation Using an Internal CBN Grinding Tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 969–976.
- Yang, B. ; Shen, X.; Lei S. 2009. Mechanisms of edge chipping in laser-assisted milling of silicon nitride ceramics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 344–350.
- Chai, H.; Lawn B. R. 2007. A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, 55, 2555–2561.
- Bao, R. H.; Zhang L. C.; Yao Q. Y.; Lunn J. 2009. Estimating the Peak Indentation Force of the Edge Chipping of Rocks Using Single Point-Attack Pick. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 339-347.
- Gyurika I. 2013. Experimental protocols to define quality metrics for milled edges in granite. IN-TECH2013 konferencia, 57-60. o., ISBN-978-953-6326-88-4