



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

INKREMENTÁLIS ALAKÍTÁS MODELLEZÉSE ÉS KÍSÉRLETI ALKALMAZÁSA

**OE-BGK
2022.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

**Abdulrahman Yousef Hassan Moheb
T008425/F112904/B**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

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

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Abdulrahman Yousef Hassan Moheb

Szakdolgozat száma: SZD22052513061645

Törzskönyvi száma: T008425/FI12904/B

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: gépészmérnöki

Specializáció: gépészmérnöki - CAD-CAM-CNC

A dolgozat címe: Inkrementális alakítás modellezése és kísérleti alkalmazása

A dolgozat címe angolul: Experiments and modeling for incremental forming

A feladat részletezése:

1. Mutassa be a különleges lemezalakító eljárásokat, különös tekintettel az inkrementális lemezalakításra!
2. Tervezze meg és mutassa be a kísérleti összeállítást!
3. Végezzen technológiai vizsgálatot tóruszos próbatesttel a lemezanyag alakíthatóságára vonatkozóan!
4. Vizsgálja meg a prototípus gyártás lehetőségeit inkrementális lemezalakítással!

Intézményi konzulens neve: Dr. Gonda Viktor

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 05. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 27.




Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom.


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, 2022.12.01


.....
hallgató aláírása

Tartalom

1. Bevezetés	5
2. Különböző lemezek megmunkálási technológiák.....	6
2.1 Általános leírás a lemezalakító eljárásokról	6
2.2 A mélyhúzás technológiája	7
2.3 Inkrementális lemezalakítás mint technológia és felhasználási területe.....	10
2.4 Inkrementális lemezalakítás technológiai eljárás jellege.....	16
3. Kísérlet előkészítése	17
3.1 Gyártási körülmények megteremtése és prototípus legyártása.....	17
3.2 Matlab szoftver által generált szerszámpálya és annak alkalmazása.....	20
3.3 CAD-CAM technológia által generált szerszámpálya és annak alkalmazása	24
4. Alkalmazott számítások és kísérleti jegyzőkönyv prezentálása	25
5. Alakított munkadarabok prezentálása.....	27
6. A végelelemes modell alkalmazása és a modellezési eredmények összefoglalása	33
7. Röntgen felvételek és falvastagság mérés prezentálása és kiértékelése	48
7.1 Röntgen felvételek készítése és kiértékelése	48
7.2 Falvastagság mérése és kiértékelése	50
8. Egy egyedi dekoratív alkatrész megtervezése, legyártása és kiértékelése.....	52
9. Összefoglalás	54
10. Summary.....	55
11. Ábrajegyzék.....	56
12. Táblázatjegyzék	58
13. Források	59

1. Bevezetés

Az egyetemen tanult különböző tantárgyak közül nekem a hideg alakítással foglalkozó tantárgyak keltették fel a legjobban figyelmemet azon belül is az inkrementális alakítás technológiája, amit az Alakítástechnológia és gépei II. tantárgy keretein során ismertem meg említési szinten. A dolgozatomban mindamellett, hogy betekintést nyújtok a különböző lemezalakító eljárásokba és jellemzem azok működési elvét beleértve a technológiák szerszámozását, sajátosságát, illetve milyen előnyekkel és hátrányokkal járnak, emellett még részletekbe menően ismertetem a központi témámat az inkrementális lemezalakító technológiát és annak felhasználási területét. Ezen felül még szemléltetem azt a végeselemes modellezést is, amit egy azonos geometrián, alakon és paraméterekkel végeztem, mint ami a kísérleteim során az egyik kísérletben alakított munkadarabbal. Ezen felül még falvastagságot is mértem. Így egy teljes belátást nyerve egy adott egyedi geometriájú munkadarabon, ami ezzel a technológiával lett le gyártva. Ez a technológia inkább az egyedi és a kissorozat gyártásban alkalmazott mivel az eljárás előnyének köszönhetően gyors prototípus gyártást tesz lehetővé, melyet akár sokszori változtatásokkal optimalizálhatunk, ami elenyésző kiadásokkal jár. Ellentétben számos különböző alakító technológiákkal, ahol a lemezalakításhoz elengedhetetlen alakító szerszámot tervezni, gyártani és dokumentálni, amihez nélkülözhetetlen a rengeteg idő és kiadás ebből kifolyólag jellemzően a nagysorozatban és tömeggyártásban használatosak. Nagy szerepet játszanak egy adott lemezalkatrésznél az alakíthatóság kérdéseinek vizsgálata során adott célra való alkalmazhatósága és az alakítási folyamat végeselemes modellezése, amik meghatározhatják az alakváltozási határértékeket. Dolgozatom céljának kitűztem, hogy az egyetemi műhelyben rendelkező gömbvégű szerszámot és készüléket felhasználva kis kísérleti sorozatot gyártok egy egyedi geometriájú munkadarabról, aminek az alakváltozási határértékét és feszültség állapotát vizsgálom meg három tengelyes CNC vezérlésű megmunkáló marógépet használva emellett még végeselemes modellezést végezek az alakított munkadarabról.

2. Különböző lemezek megmunkálási technológiák

2.1 Általános leírás a lemezalakító eljárásokról

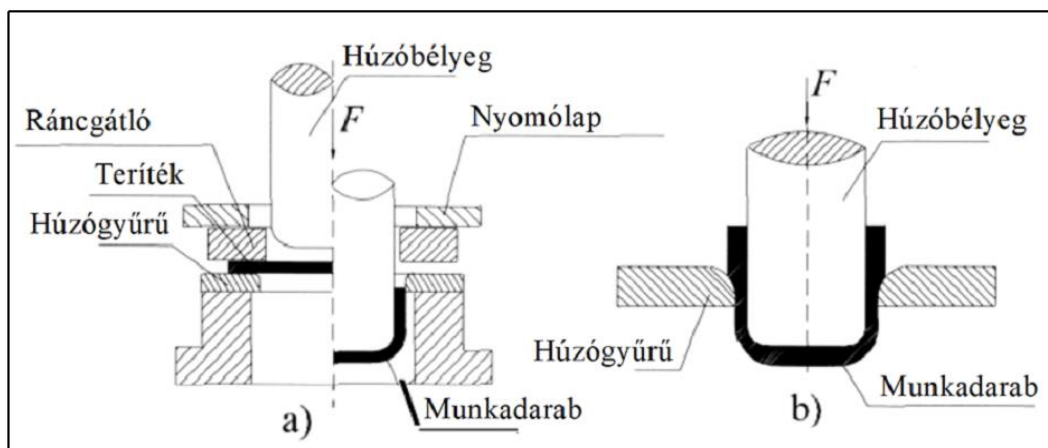
A hajlítás, mélyhúzás, göngyölítés, egyengetés, simítás, vasalás, fémnyomás, domborítás, szájbehúzás, tágítás, bordázás olyan lemezalakító eljárások, ahol a lemez megmunkálása során nincs szétválasztás, hanem az alakítás hatására az eddigi síkbeli alakzat térbeli formát ölt. A felsorolt eljárásokat a tömeggyártásban gazdaságos alkalmazni, mivel ezekhez az eljárásokhoz tartozó technológiai kivitelezés eléréséhez nélkülözhetetlen egy-egy célgép és a hozzá tartozó egyedi szerszám és alkatrészek megtervezése, készítése, dokumentálása, amihez szükséges a hatalmas szakmai tapasztalat és a magasfokú szakképzettség, ami rengeteg munkával idővel és költséggel jár. Korunk felmerülő igényeinek és felfedezéseinek köszönhetően olyan technológiai fejlődés vette kezdetét, aminek köszönhetően immár olyan eljárásokat fejlesztenek, amelyek a mai igények kiszolgálására is képesek, akár magasabb szintű minőség eléréséhez akár páratlan, esztétikus forma kialakítására, vagy akár modern anyagok kísérleti alakítás megmunkálására. Ezekhez már nem elég a hagyományos eljárásokkal való gyártás hiszen egy-egy újszerű egyedi alakítással készült alkatrész gyártási folyamatának felépítéséhez valamennyi megelőző számítások, vizsgálatok és kísérletek szükségesek ahhoz, hogy csökkentjük a végleges változat rossz tulajdonságait és egyszerűsítsük az azzal alkalmazott eljárást. Az eddig említettek alapján a következő hagyományos lemezalakító technológiai eljárásokat ismertetem ebben a fejezetben:

- mélyhúzás
- Inkrementális lemez alakítás

2.2 A mélyhúzás technológiája

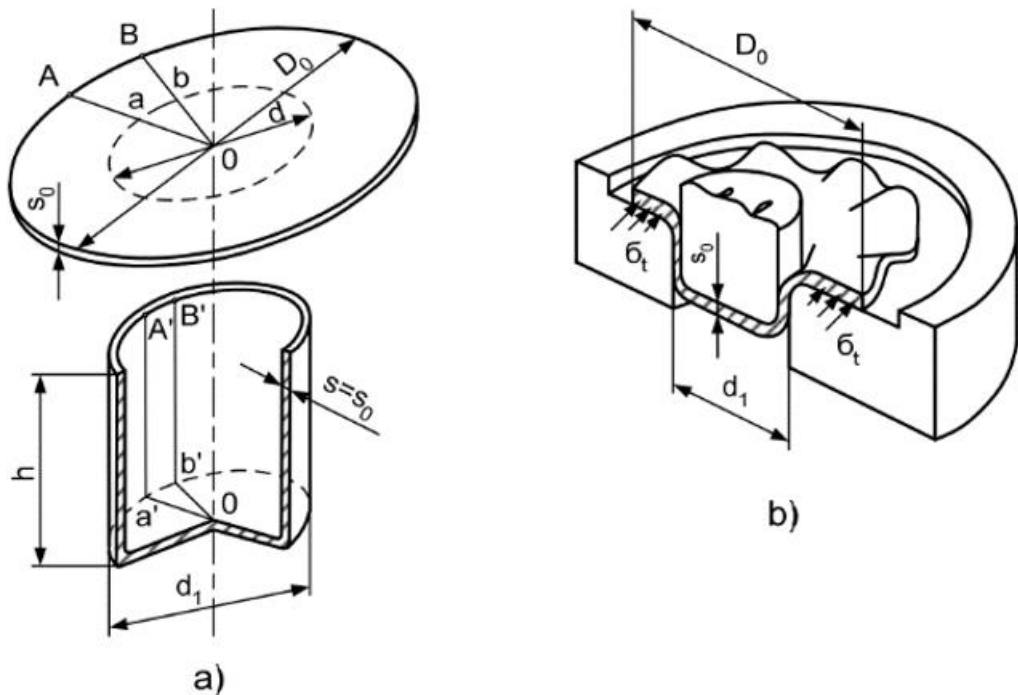
A mélyhúzás olyan technológiai eljárás, amelynek a folyamata során, ahol a fémlemez egy mechanikus húzóbélyeg és egy húzógyűrű felületei közt húzzák ezzel egy időben megfolyatják, ami által üreges testet hoznak létre [1]. Az előgyártmányból azaz a sík lemezből hengert, kúpot vagy dobozt formálnak. Ezzel az eljárással minimális műveletek felhasználásával és minimális hulladéktermeléssel olyan kész munkadarabot lehet előállítani, amely további műveletek nélkül összeállítható. Ennek a technológiának a speciális módszereinek kidolgozásával és fejlesztésével főleg az autóipar és a repülőgépipar foglalkozott. Ez az eljárás azonban széles körben alkalmazható különböző formájú és különböző méretű alkatrészek előállítására, ahogy az 1-3. ábrákon van feltüntetve. Kezdve az elektronikai iparban használt nagyon kis méretű alkatrészekről a több méteres alkatrészekre át az ipar más ágaiban. A mélyhúzást a gyors préselési ciklusok tette népszerűvé. A mélyhúzás olyan fémalakítási eljárás, ahol nagy szilárdságú és könnyű alkatrészeket gyártanak egyaránt, oly módon, hogy elérhetetlen geometriákat eredményeznek ellentétben más gyártási eljárásokkal. Kétféle mélyhúzási eljárást különböztetünk meg anyagvastagság változás alapján még pedig az alábbiak szerint:

- a) tiszta húzás: munkadarab anyagvastagságának csökkentésével nem járó eljárás
- b) falvékonyító húzás: munkadarab anyagvastagságának csökkentésével járó eljárás



1. ábra Sematikus ábra mélyhúzási eljárásokról

A kétféle eljárást az 1. sematikus ábra illusztrálja. Továbbá általánosan elmondható az is, hogy a mélyhúzáshoz alapvetően szükség van húzóbélyegre, húzógyűrűre és ráncgátlóra. A ráncképződés elkerüléséhez ráncgátlót alkalmaznak. Míg a 2. ábra bal oldali részén (a) azt látjuk ahogyan a munkadarab fenékrészének alakítása esetében az alakváltozás kismértékben jelenik meg. Addig a 2. ábra jobb oldali részén (b) az látható, hogy amennyiben a ráncgátló szerszámelemet mellőznénk a művelet során akkor a lemezen végbemenő komplex alakváltozás közbeni peremfelületen fennmaradó anyagfeleslegre olyan mértékben hatnak a tangenciális irányban ható nyomófeszültségek, hogy az mérvadó rövidüléshez vezet, amely ráncosodást okozhat [2].



2. ábra Mélyhúzás közben végbemenő ráncosodás és alakváltozás illusztrálása

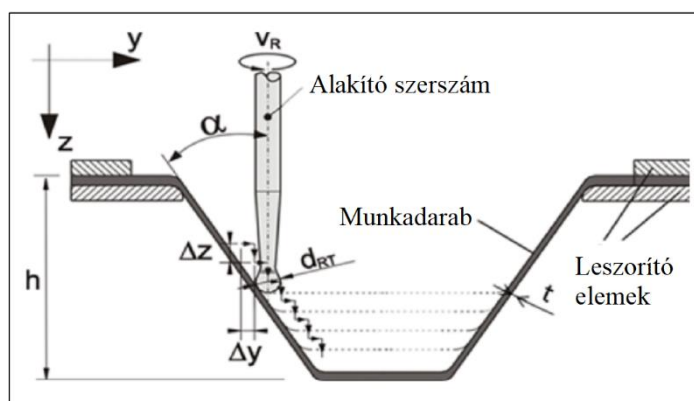
Mint ismert kezdő húzáskor ráncosodás nem megy végbe amennyiben kiinduló lemezvastagság és a kiinduló átmérő hányadosának értéke nagyobb mint 0,02 és a továbbhúzásnál, pedig ennek az értéknek legalább 0,015 kell lennie.



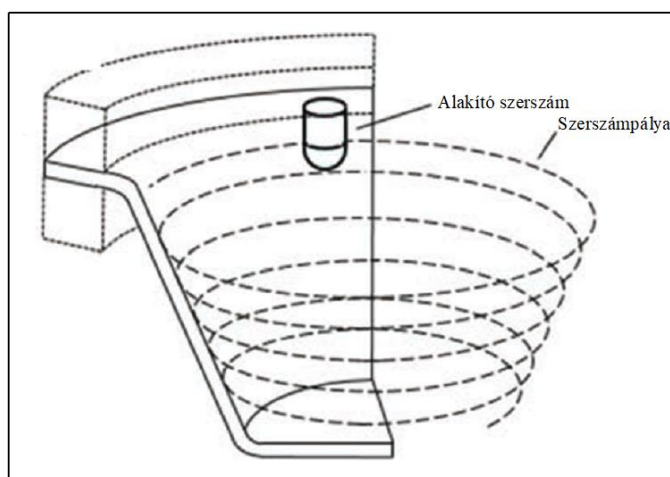
3. ábra Mélyhúzással előállított termékek [3]

2.3 Inkrementális lemezalakítás mint technológia és felhasználási területe

Incremental Sheet Forming - ISF vagyis inkrementális lemez alakítás, azaz növekményes lemez alakítás egy formázás nélküli fémmegmunkálási folyamat, amely a lokalizált deformáció előrehaladásán alapul. A kívánt formát egy CNC vezérlésű marógépben készülékkel megfogatott fémlemez mentén mozgó deformáló, gömbvégű szerszám térbeli pontokon vezérelt azok helybéli nyomásával érjük el. Ezáltal olyan hidegalakító képlékeny eljárást valósítunk meg, aminek az elvi vázlata a 4-5. ábrán látható.



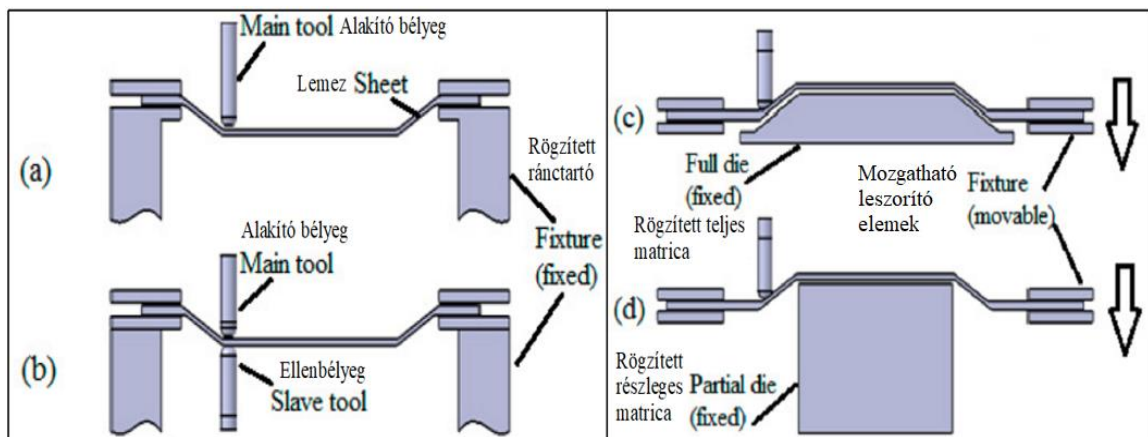
4. ábra Inkrementális lemez alakítás sematikus vázlata [4]



5. ábra Inkrementális lemez alakítási szerszámpálya [5]

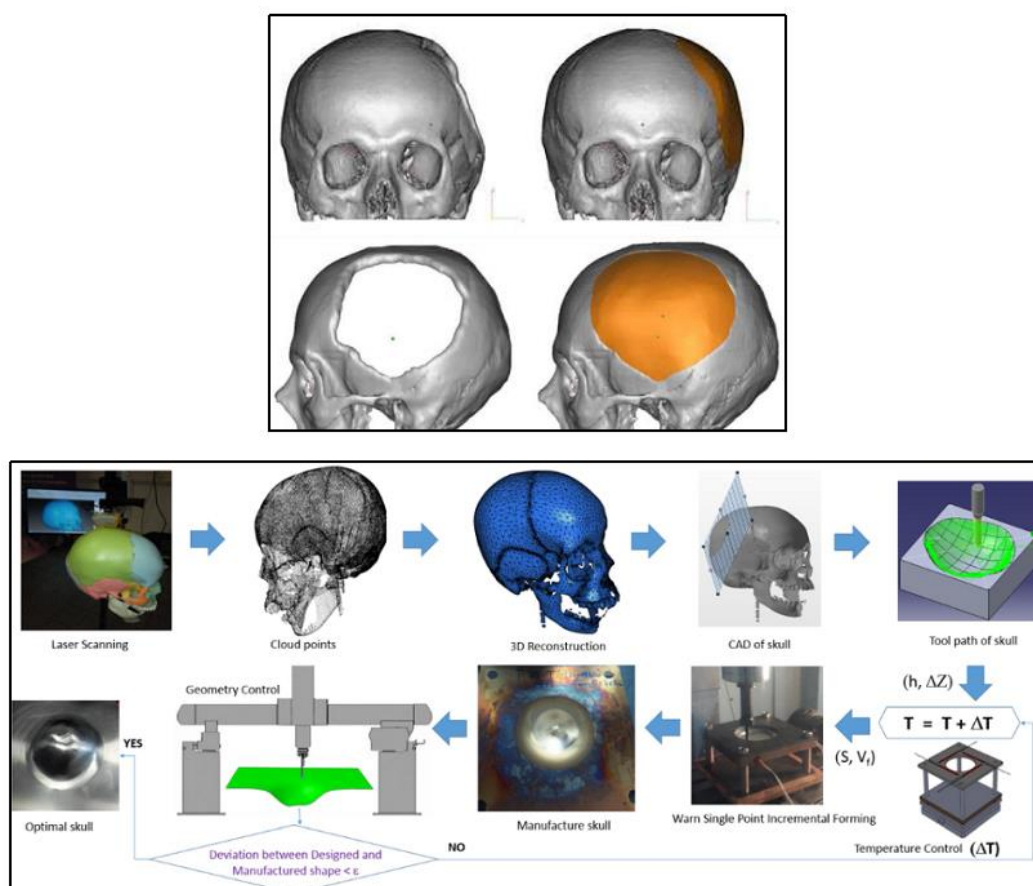
Az eljárást megkülönböztetjük aszerint, hogy egy vagy kétpontos inkrementális lemezalakításról van szó. Az egypontos inkrementális alakítás (single point incremental forming, SPIF) ketté válik abban az értelemben, hogy létezik ellenbélyeges, ami a 6. ábra

(b) részletén látható, illetve az ellenbéllyeg nélküli alakítási változat, azaz az alakítás során a fémlemez formálódik a térben szabadon ahogy az a 6. ábra (a) részletén látható. A kétpontos inkrementális lemezalakítás (two-point incremental forming, TPIF) abban különbözik az egypontostól, hogy itt az alakítás során egyszerre két pontban is hat a nyomó igénybevételi terhelés a munkadarabon. A munkadarab olyan ránc tartóban van rögzítve, amely függőleges irányban képes mozogni, vagyis a z tengelyt nézve lefele mozgás végez a megmunkálás során. Az alakítás során két szerszám kerül felhasználásra az elsődleges a gömbvégű alakító szerszám, ami CNC marógép főorsójában helyezkedik, ami az alakítandó lemezbe hatol és a másodlagos a matrica, amelynek helyzete álló így képezve a munkadarab formáját. Mivel a kiválasztott alaktól függ a matrica ezért az szabadon cserélhető. Hasonlóan az előzőhöz itt is ketté válik az eljárás abból a szempontból, hogy létezik a részleges szerszámmal 6. ábra (d) részletén látható és a teljes szerszámmal (matricával) végzett alakítás, ami pedig a 6. ábra (c) részletén látható. Míg előbbi szerszámozása rendelkezik egy alapgeometriával, amely segítségével azonos geometriát lehet kialakítani egy előzően felhasznált szerszámmal különböző alkatrészen és szükségtelen minden egyes újabb munkadarab esetében egy újabb szerszámot alkalmazni vagyis egy költséghatékony és a flexibilis folyamat addig utóbbi a teljes matricával végzett változata igen pontos alakot ad ami előnyére válik ugyanis a folyamat során megmunkálandó lemez teljes szerszámmal le van szorítva így megelőzve az esetleges hullámosodást és elmozdulást. Hátránya pedig abból adódik, hogy minden egyes munkadarab gyártásához egy újabb teljes szerszámot, azaz matricát igényel, ami drágítja, amiért az eljárás egyáltalán nem mondható rugalmasnak [6].



6. ábra Egy és kétpontos inkrementális alakítás változatai [7]

Az inkrementális lemez alakítási technológiát amellett, hogy gyors prototípus, kis sorozat illetve egyedi geometriájú alkatrész gyártása esetén alkalmazzák a költséghatékony gyártás miatt emellett még dekoratív alkatrészeket is megvalósítanak ezzel az eljárással sőt még az orvostudományban is a kísérleti fázisban van ennek a technológiának a bevezetése ugyanis az orvosbiológiai implantátum alkatrészeit reverse engineering gyors prototípus készítési technikával gyártják de ennek a gyártási eljárásnak a szélesebb körű alkalmazásának fő korlátai, hogy az Rapid Prototyping folyamatokban használt meglévő anyagok biológiailag sokszor összeférhetetlenek és a modellgyártás viszonylag magas költségekkel és idő igényes munkafolyamatokkal jár a megfelelő modellminőség eléréséhez (felületkiképzés és anatómiai pontosság). Az implantátum gyártása az inkrementális lemez alakító eljárással az előbb felsorolt hátrányokat ki lehet küszöbölni [8]. A 7. ábra egy ezzel a technológiával megtervezett koponya részt illusztrál.

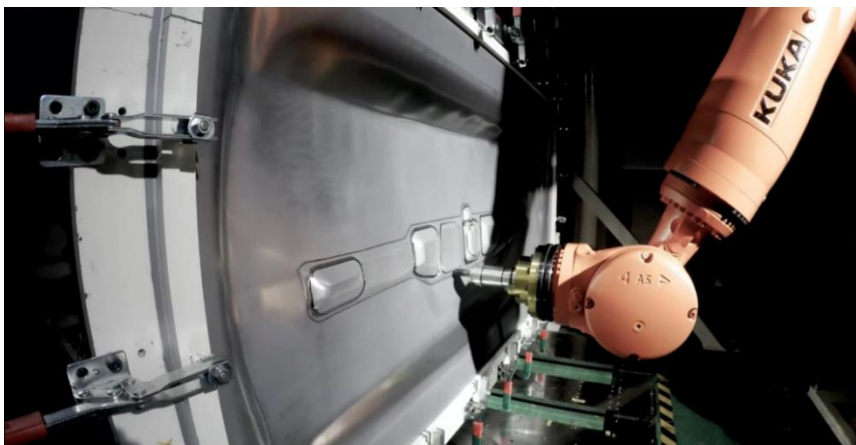


7. ábra Emberi koponyagyártás reverse engineering alkalmazásával [9]

A Nissan új módszert fejlesztett ki a robotok használatával autóalkatrészek gyártására acéllemezről, ami áttörést jelenthet, amely szélesebb körben elérhetővé teheti a vevők számára a megszűnt modellek cserealkatrészeit. A Nissan azt reméli, hogy kereskedelmi forgalomba tudja hozni a szabadalmaztatott egy technikát, amelye ellenbéllyeges inkrementális lemezalakításként ismernek. A technika során két szinkronizált robot dolgozik az acéllemez ellentétes oldalairól, gyémánt bevonatú szerszámok segítségével az acél fokozatos formálására. A rugalmas gyártásnak, a rövid átfutási időknél és a minimális kezdeti költségeknek köszönhetően az új technológia kereskedelmileg életképesé teheti a Nissan által már nem gyártott autók utószervíz- és cserealkatrészeinek széles választékának kis mennyiségben történő gyártását és értékesítését. Ez korábban nem volt lehetséges a magas előzetes költségek és a béllyeg alkatrészek kifejlesztésének és elkészítésének hosszú átfutási ideje miatt. Mostanáig a kétoldalas préselés nélküli formázást túl nehéznek tartották kereskedelmi forgalomba hozni. Ennek oka a két robot programozásának bonyolultsága, hogy szinkronban működjenek, miközben állandó minőséget biztosítanak. A meglévő technikák elsősorban az ellenbéllyeg nélküli változatra támaszkodtak, ami korlátozza a létrehozható formák összetettségét. Ha robotokat és szerszámokat helyeznek el az acéllemez ellentétes oldalain, akkor bonyolultabb és részletesebb formákat hozhatnak létre. Az új technika a Nissan Gyártásmérnöki Kutató és Fejlesztési Központ gyártásmérnöki szakértelmének, valamint a Nissan kutatási részlegének anyagtechnológiai fejlesztéseinek köszönhetően vált lehetővé. Három nagy áttörést jelent egyrészt fejlett programok kidolgozása, amelyek mindkét robotot nagy fokú méretpontossággal képesek irányítani, lehetővé téve részletgazdag konvex és konkáv formák kialakítását. Másrészt tükrözött gyémánt bevonat alkalmazása a szerszámokon, csökkentve a súrlódást, miközben nincs szükség kenésre. Ennek számos előnye van, beleértve a felületi minőség állandóságát és az alacsony költségű, környezetbarát működést. Harmadrészt optimalizált útkeresési logika létrehozása a robotok számára, a Nissan gyártásmérnöki csapatai által általában használt bőséges szakértelemre és présformáló szimulációs technikákra építve. Ez lehetővé tette a Nissannak, hogy kiváló minőségű eredményeket érjen el a fejlesztési folyamat korai szakaszában [10]. A gyártási folyamatot a 8., 9. és a 10. ábra illusztrálja.



8. ábra Nissan után gyártott autó alkatrészek gyártása egy pontos inkrementális lemez alakítás ellenbéllyeges változatával



9. ábra Nissan után gyártott autó alkatrészek alakítási folyamata



10. ábra Nissan által használt alakító szerszámok

Mint említettem dekoratív munkadarabokat is gyártanak ezzel a technológiával többek közt olyan formákat, amiket épületburkoló elemként használnak. A 11. ábra néhány formát illusztrál az előbb említett alkalmazásra alakítottak. A 12. ábra egyedi alakított figurát ábrázol.



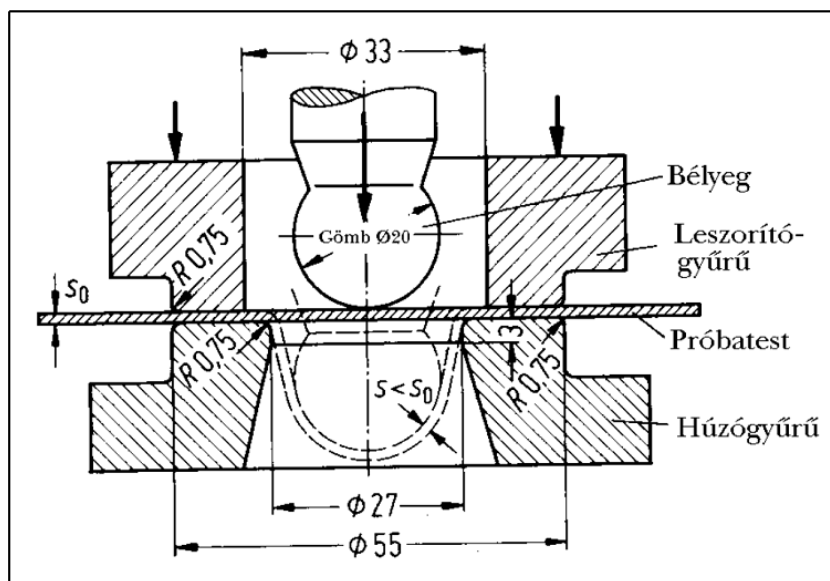
11. ábra Épület burkoló elemek



12. ábra Alakított figura

2.4 Inkrementális lemezalakítás technológiai eljárás jellege

Az egyik legnagyobb különbség az inkrementális alakítás és a mélyhúzás között, hogy amíg a mélyhúzás általában anyagvastagság csökkentéssel nem jár addig az inkrementális alakítás esetében igen ezért a nyújtó jellege miatt inkább az Erichsen - féle mélyítő próbához áll közelebb. Az Erichsen vizsgálat során 70x70 [mm] területű próbatestet szorítunk ráncgátlót alkalmazva elcsúszásmentesen a matricához. Természetesen a lemez és bélyeg között kenés kerül felhasználásra, a bélyeggel a mélyítést addig kell végezni amíg az első repedés meg nem jelenik. Az (IE) vagyis az Erichsen - féle mélyítési szám az a bélyeg elmozdulás, amely az első repedés megjelenéséig tart, vagyis addig mérhető mm-ben. A próbatest vastagsága 0,2 és 2,0 [mm] között a bélyeg sebessége pedig 5 és 10 [mm/min] választandó [11].



13. ábra Erichsen - féle mélyítő próba

A 13. ábra a vizsgálat elvi vázlatát illusztrálja. A vizsgálat előnyei közé tartozik, hogy a lemez anyagának szemcsenagysága jellemző az alakváltozott rész felületének minőségére durva szemcsék esetén narancshéjas felületre emlékeztet. Hátrányai pedig, hogy a vizsgálat végrehajtás és a kiértékelés szubjektív hibákkal jár ezért csak nagy szórással jellemzi a lemezanyagot. Továbbá a vizsgálat során kialakuló feszültség- és alakváltozás állapot eltér a mélyhúzásétól, ezért a mérőszám (mélyítési szám) elsődlegesen a nyújthatóságot jellemzi, a mélyhúzhatóságot csupán érintőlegesen.

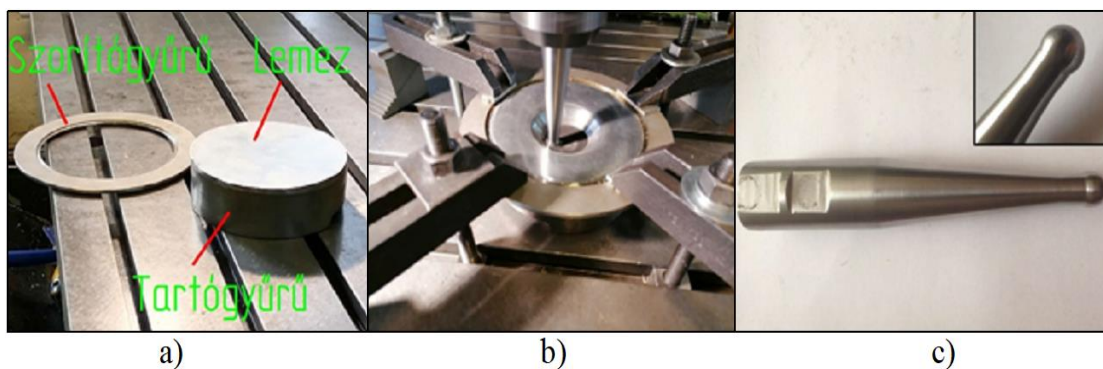
3. Kísérlet előkészítése

3.1 Gyártási körülmények megteremtése és prototípus legyártása

Háromtengelyes CNC marógépet választottam a szerszámpálya vezérléséhez a kísérletek végrehajtásához. Lehetőségeimet felmérve arra jutottam, hogy az egyponτος inkrementális lemez alakítást és azon belül is az ellenbélég nélkülivel fogok tudni kísérletezni a hatékony gyártás érdekében. A lemez anyagának kiválasztásánál a folyáshatárt vettem figyelembe ezért döntöttem az EN AW-1050A azaz a félkemény Al99,5 anyag mellett. A készülékhez az egyetemi műhelyben talált tartógyűrűt és szorítógyűrűt alkalmaztam a méretre vágott lemez megfogásához mikképp az a 13. ábra a) részén látható. A műhelyben lévő gömbvégű alakító szerszám megfelelő a kísérletekhez, ami a 7. ábra b) és c) részén látható. A súrlódás és az anyagleválasztás (lemezkopás) csökkentése érdekében kenőanyagnak műszerolajat került felhasználásra.

1. táblázat: Kísérletben részt vevő eszközök paraméterei. Mértékegységek [mm]-ben

Megnevezés	Jel	Érték
kiinduló lemez vastagság	s0	0,5
méretre vágott lemez átmérő	d1	140
maximális munkadarab magasság	hmax	40
készülék tartógyűrűjének belső átmérője	Dbel	120
készülék tartógyűrűjének külső átmérője	Dkül	140
készülék tartógyűrűjének magassága	Hmax	44
maximális dolgozó átmérő	Dmax	12
szerszám maximális dolgozó hossz	Lmax	90
szerszám befogási átmérő	Dbef	20



14. ábra Alkalmazott készülékezés és szerszámozás

A 14. ábrán az egyetemi műhelyben lévő két darab három tengelyes CNC vezérlésű megmunkáló marógépek álltak a rendelkezésemre attól függően melyik volt szabad a kísérleteimhez.



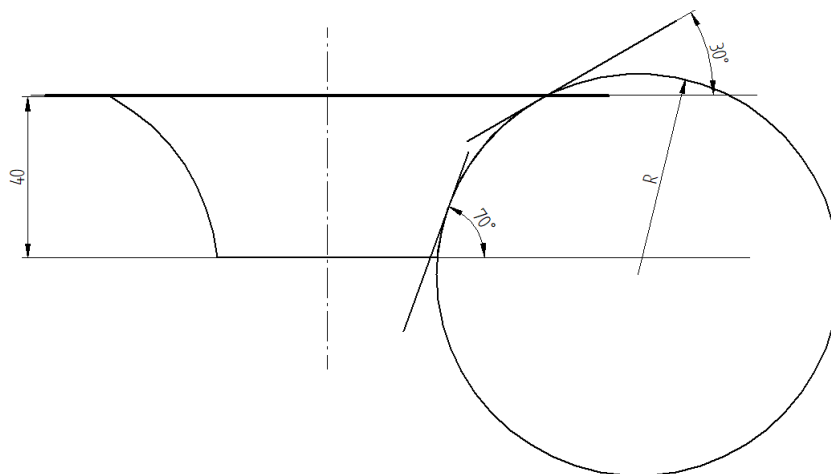
MSN-500



Haas Mini Mill Edu

15. ábra Kísérleti munkadarabok gyártása ezekkel a gépekkel történtek

A konzulensemmel úgy döntöttünk, hogy egy belső tóruszfelület geometriájú formával kísérletezek, mégpedig úgy ahogy az a 15. ábrán látható módon, hogy a munkadarab magasságát 40 mm-nek és a rádiuszának az alsó érintőjét 70° -nak míg a felső érintőjét 30° -nak fixáltuk a vízszintes koordináta-hoz képest. Változó paraméternek pedig a rádiuszt (R) definiáltuk. A cél meghatározni az optimális technológia paramétereit, amelyekkel megfelelő módon lehet ezt a munkadarabot legyártani, illetve azt a rádiuszt, aminél elszakad a lemez továbbá a keletkező képlékeny feszültségekről végelelemes modellezést lefuttatni, és azt egy falvastagság mérési eredménnyel összefüggésbe hozni ezáltal egy teljes képet kapva a megtervezett és a kivitelezett összeállított konstrukcióról.



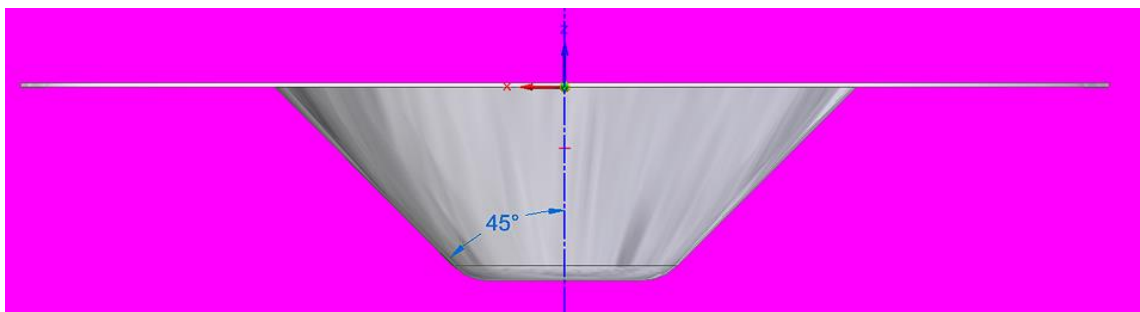
16. ábra Kísérleti munkadarab geometriája

Mivel korábbi kísérletek kimutatták azt, hogy a Z-level szerszámpálya stratégia alkalmazásakor a szerszám lenyomatott hagy ezzel esztétikai hibát idézve elő ahogy az a 16. ábrán látható. Ugyanis maga a stratégia úgy funkcionál, hogy a fogásmélységek között a szerszám megtesz egy teljes kört és mindig visszatér oda, ahol elkezdte azt. Így a spirál szerszámpálya stratégia alkalmazása mellett döntöttem mivel a spirál szerszámpálya stratégia esetén minden teljes fogás alatt a mélység a fogásmélység értékével növekszik. Elérve azt, hogy a végső mélységen egy teljes pálya készül Z-irányú mozgás nélkül.



17. ábra Z-level okozta lenyomat

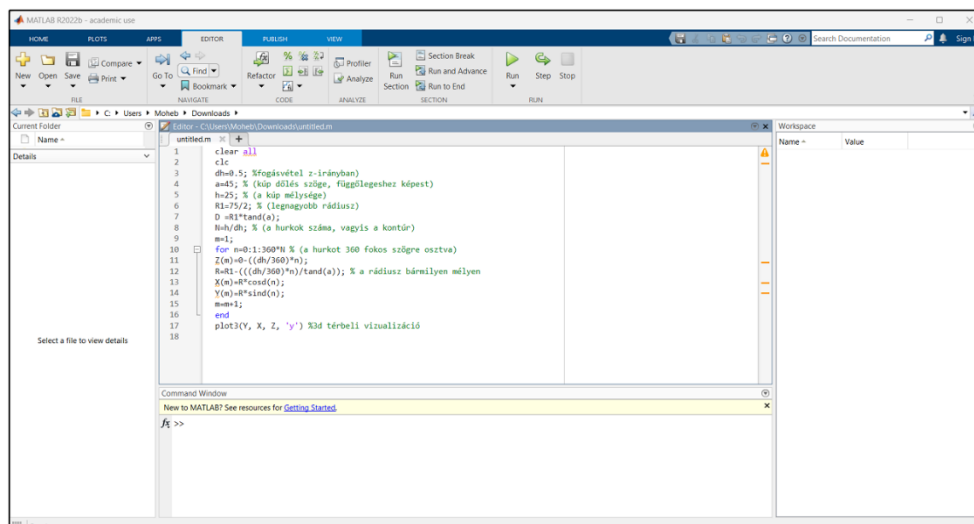
Mielőtt elkezdtem volna a hiperbolával kísérletezni arra gondoltam, hogy legyártok egy olyan alkatrészt, amely ezzel a technológiai eljárással való gyártása ismert, de két különböző módon kinyert szerszámpályaival vagyis két azonos munkadarabot gyártok azért, hogy az előnyösebb módszert alkalmazzam a hiperbola alkatrész esetében. Az ismert munkadarab geometriája valójában egy tölcsér, aminek a dőlésszöge 45° fok mivel ugyan is a 45° igen köztudott, hogy az egy jól alakítható dőlésszög, azaz igen sokáig nyúlik az anyag szakadás nélkül. A geometria a 17. ábrán látható.



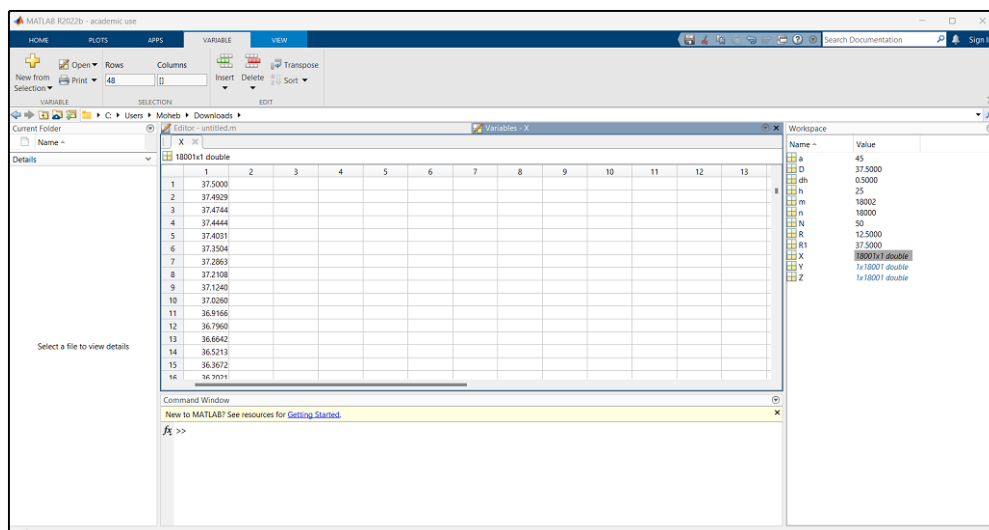
18. ábra 45° -os geometriájú tölcsér

3.2 Matlab szoftver által generált szerszámpálya és annak alkalmazása

Az első módszer az volt, hogy a Matlab szoftverben írtam egy programot, ami a MathWorks által kifejlesztett, szabadalmaztatott többparadigmás programozási nyelv és numerikus számítási környezet. A Matlab lehetővé teszi a mátrixkezelést, a függvények és adatok ábrázolását, az algoritmusok megvalósítását, a felhasználói felületek létrehozását, valamint a más nyelveken írt programokkal való interfészeket. A program a Descartes-féle *koordináta-rendszer* formában generálta le az x, y, z koordináta pontokat. A szoftver alkalmazását a 18. és 19. ábra illusztrálja. A kinyert szerszámpályát a 18-20. ábra illusztrálja.



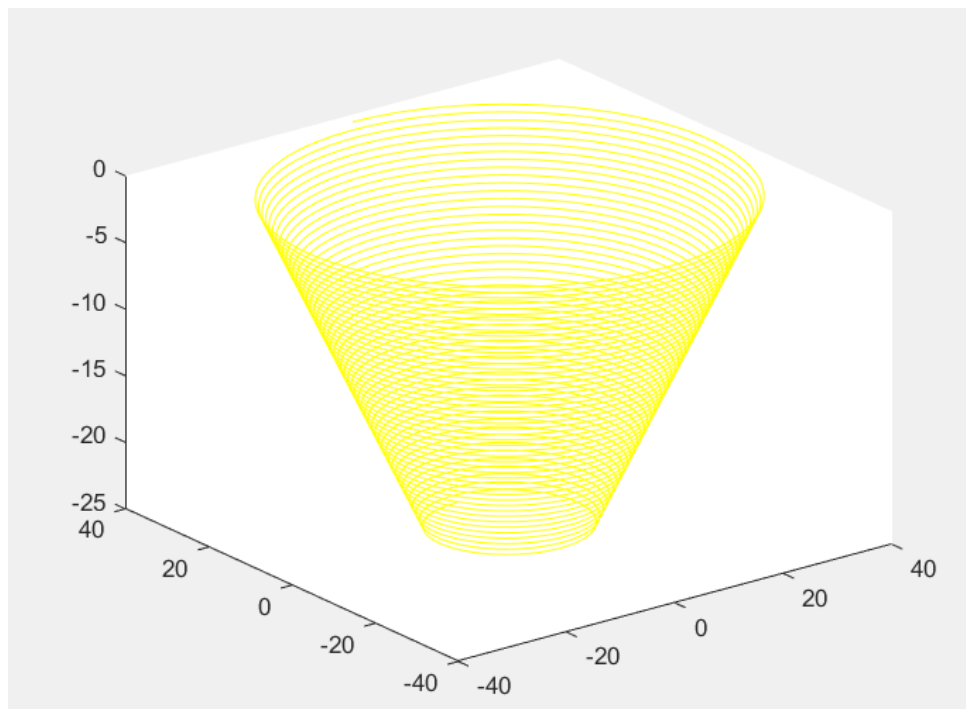
19. ábra Program megírása és lefuttatása



20. ábra Legenerált vektor koordináták pontok

2. táblázat: Matlab szoftverben megírt program

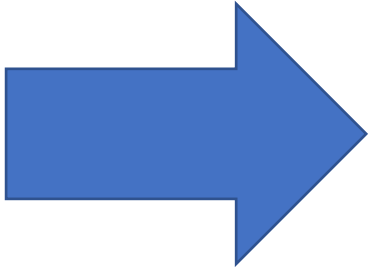
clear all
clc
dh=0.5; %fogásvétel z-irányban)
a=45; % (kúp dőlés szöge, függőlegeshez képest)
h=25; % (a kúp mélysége)
R1=75/2; % (legnagyobb rádiusz)
D =R1*tand(a);
N=h/dh; % (a hurkok száma, vagyis a kontúr)
m=1;
for n=0:1:360*N % (a hurkot 360 fokos szögre osztva)
Z(m)=0-((dh/360)*n);
R=R1-(((dh/360)*n)/tand(a)); % a rádiusz bármilyen mélyen
X(m)=R*cosd(n);
Y(m)=R*sind(n);
m=m+1;
end
plot3(Y, X, Z, 'y') %3d térbeli vizualizáció



21. ábra Sikeresen legenerált szerszámpálya

A sikeres szimulációt követően kiszedtem az x, y, z koordináta pontokat és G-kódokkal egészítettem ki az okból, hogy CNC vezérlésű marógép értelmezni tudja ahogy az a 3. táblázatban látható.

3. táblázat: G-kóddal kibővített program részlete
(45fok 30mm mely)

			(45fok 30mm mely)			
			%O1000			
			N1	G90 G40 G80 G17		
			N2	T1 M06 (d=12.0 MM)		
			N3	G54		
			N4	S1500 M03		
			N5	G00 X50 Y0		
			N6	G43 H01 Z50		
			N7	G01 X50 Y0 Z5 F120		
X50	Y0	Z0	N8	X50	Y0	Z0
X49.991	Y0.8726	Z-0.0014	N9	X49.991	Y0.8726	Z-0.0014
X49.9668	Y1.7449	Z-0.0028	N10	X49.9668	Y1.7449	Z-0.0028
X49.9273	Y2.6166	Z-0.0042	N11	X49.9273	Y2.6166	Z-0.0042
X49.8727	Y3.4874	Z-0.0056	N12	X49.8727	Y3.4874	Z-0.0056
X49.8028	Y4.3572	Z-0.0069	N13	X49.8028	Y4.3572	Z-0.0069
X49.7178	Y5.2256	Z-0.0083	N14	X49.7178	Y5.2256	Z-0.0083
X49.6177	Y6.0923	Z-0.0097	N15	X49.6177	Y6.0923	Z-0.0097
X49.5024	Y6.9571	Z-0.0111	N16	X49.5024	Y6.9571	Z-0.0111
X49.3721	Y7.8198	Z-0.0125	N17	X49.3721	Y7.8198	Z-0.0125
X49.2267	Y8.68	Z-0.0139	N18	X49.2267	Y8.68	Z-0.0139
X49.0664	Y9.5375	Z-0.0153	N19	X49.0664	Y9.5375	Z-0.0153
X48.8911	Y10.3921	Z-0.0167	N20	X48.8911	Y10.3921	Z-0.0167
X48.7009	Y11.2435	Z-0.0181	N21	X48.7009	Y11.2435	Z-0.0181
X48.4959	Y12.0914	Z-0.0194	N22	X48.4959	Y12.0914	Z-0.0194
X48.2762	Y12.9356	Z-0.0208	N23	X48.2762	Y12.9356	Z-0.0208
X48.0417	Y13.7757	Z-0.0222	N24	X48.0417	Y13.7757	Z-0.0222
X47.7927	Y14.6117	Z-0.0236	N25	X47.7927	Y14.6117	Z-0.0236
X47.529	Y15.4431	Z-0.025	N26	X47.529	Y15.4431	Z-0.025
X47.251	Y16.2698	Z-0.0264	N27	X47.251	Y16.2698	Z-0.0264
X46.9585	Y17.0915	Z-0.0278	N28	X46.9585	Y17.0915	Z-0.0278
X46.6518	Y17.9079	Z-0.0292	N29	X46.6518	Y17.9079	Z-0.0292
X46.3309	Y18.7189	Z-0.0306	N30	X46.3309	Y18.7189	Z-0.0306
X45.9958	Y19.5241	Z-0.0319	N31	X45.9958	Y19.5241	Z-0.0319
X45.6468	Y20.3233	Z-0.0333	N32	X45.6468	Y20.3233	Z-0.0333
X45.2839	Y21.1162	Z-0.0347	N33	X45.2839	Y21.1162	Z-0.0347
X44.9072	Y21.9027	Z-0.0361	N34	X44.9072	Y21.9027	Z-0.0361
X44.5169	Y22.6825	Z-0.0375	N35	X44.5169	Y22.6825	Z-0.0375
X44.113	Y23.4553	Z-0.0389	N36	X44.113	Y23.4553	Z-0.0389
X43.6958	Y24.221	Z-0.0403	N37	X43.6958	Y24.221	Z-0.0403
X43.2652	Y24.9792	Z-0.0417	N38	X43.2652	Y24.9792	Z-0.0417
X42.8215	Y25.7297	Z-0.0431	N39	X42.8215	Y25.7297	Z-0.0431
X42.3647	Y26.4724	Z-0.0444	N40	X42.3647	Y26.4724	Z-0.0444

4. táblázat: Jelmagyarázat az alkalmazott G-kódokhoz

Jelölés	Magyarázat
G90	G90: abszolút méretmegadás,
G40	szerszámkompenzáció kikapcsolása
G80	törli a ciklus üzemmódot és az öröklődő ciklusváltozókat
G17	xy sík
T1	01-es szerszám beváltása
M06	szerszámcseré
S1500	1500 [1/min] fordulatszám
M03	Jobbos főorsó fordulat bekapcsolása
G43	szerszám hosszkorrekció bekapcsolása
H01	01-es szerszám hosszkorrekció betöltése
F120	120 [mm/min] asztali előtolási sebesség értéke

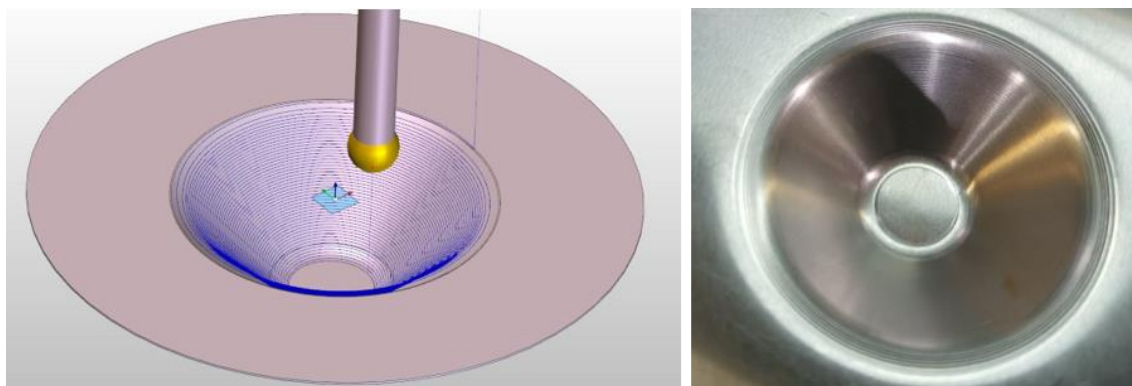
Az immár teljes kész programot be is tudtam importálni a CNC vezérlésű marógépbe és miután rögzítettem a méretre vágott lemezt a készülékkel mehetett is az alakítás. Az alakításokhoz kiszámolt és alkalmazott marási technológiai számítási képleteket a 3.3 Kísérleti Jegyzőkönyv és az alkalmazott technológiai számítások ismertetése alfejezetben fejtem ki. A kapott munkadarabot a 21. ábra illusztrálja. Felfedeztem azt, hogy annak ellenére, hogy spirál szerszámpálya stratégiával lett legyártva mégis hagyott lenyomatott ott, ahol a szerszám kiemel, de az ok amiért tudtam azt, hogy ezzel a módszerrel nem fog megfelelően működni, hogy egy torzított geometriát kaptam mivel a művelet során szerszám átmérő korrekció nincs, ami azt jelenti, hogy az érintkezés a szerszám és a lemez közt nem ott történik meg ahol kellene így hát pontatlan alakot kapunk ezzel a módszerrel.



22. ábra Matlab szerszámpályaival alakított munkadarab

3.3 CAD-CAM technológia által generált szerszámpálya és annak alkalmazása

A második módszer pedig CAD-CAM technológiával való alakítás így hát az egyetemen tanított 3D-es Solid Edge szoftverben lerajzoltam ugyan azt a tölcser alakot és beimportáltam a szintén egyetemen tanított Edgecam szoftverben, amiben el tudtam készíteni a szerszámpályát, aminek legenerált koordinátái megegyeznek a Matlab szoftverből kisedett. A szerszámpálya elkészítése után igénybe vettem az egyetemi gépet, ami rendelkezik az akadémiai licensszel az okból, hogy legeneráljam a szerszámpályát a programból. A 22. ábra illusztrálja ezt a folyamatot és ez általa gyártott munkadarabot, ami mind geometriában mind esztétikában hozta az elvárt formát így már nem volt kérdés, hogy ezzel a módszerrel fogom generálni kísérleteim gyártásához szükséges szerszámpályákat. Azért megjegyzésképpen hozzá tenném azt, hogy a Matlabbal alkalmazott módszer sokkal rugalmasabb szemben a CAD-CAM technológia alkalmazottal mert míg a CAD-CAM technológia esetében minden újabb alkatrész újabb 3D-es alak megrajzolását igényel a CAD szoftverben, hogy egy aztán újabb szerszámpályát lehessen készíteni a CAM szoftverben addig a Matlab szoftverben elég átírni a kiinduló adatokat a megírt programban. Véleményem szerint a Matlab szoftver által generált szerszámpálya és annak alkalmazásának optimalizálása egy külön dolgot érdemel mert az egyszerűbb alkatrészek műveletei esetében sokkal gazdaságosabb és hatékonyabb módon lehetne változtatni a szerszámpályán a gyártási folyamatok közben, ahol szükségesége válik.



23. ábra Edgecam által legyártott munkadarab

4. Alkalmazott számítások és kísérleti jegyzőkönyv prezentálása

Mivel az alakítási kísérletek munkadarabjai CNC vezérlésű marógépben lettek formálva, vagyis szerszámhály vezérléssel alakította a marógép a lemezt ezért az alábbi marási technológiai számítási képletekkel dolgoztam:

Az előtolási sebesség számításánál alkalmazott összefüggés [12]:

$$\{V_f = f_z \cdot n \cdot z\} \text{ [mm/min]} \quad (3.3.1)$$

ahol:

- f_z – fogankénti előtolás [mm],
- z – a szerszám fogszáma,
- n – a maróorsó fordulatszáma [min^{-1}],

megjegyzés: esetemben mivel alakító szerszám ezért a $z = 1$

Az gépi főidő számításánál alkalmazott összefüggés [13]:

$$\{t_g = \frac{i \cdot L}{V_f}\} \text{ [min]} \quad (3.3.2)$$

ahol:

- i – a fogások száma [mm],
- L – az asztal útja, [mm] L értéke magában foglalja a maró ráfutási (l_r) illetve túlfutási (l_t) útját, a maró szerszám fejének (D) méretét és az alkatrész (l_w) megmunkálendő hosszát,
- V_f – előtolási sebesség [mm/min],

Az Forgácsolási sebesség számításánál alkalmazott összefüggés [14]:

$$\{V_c = \frac{D_c \cdot \pi \cdot n}{1000}\} \text{ [m/min]} \quad (3.3.3)$$

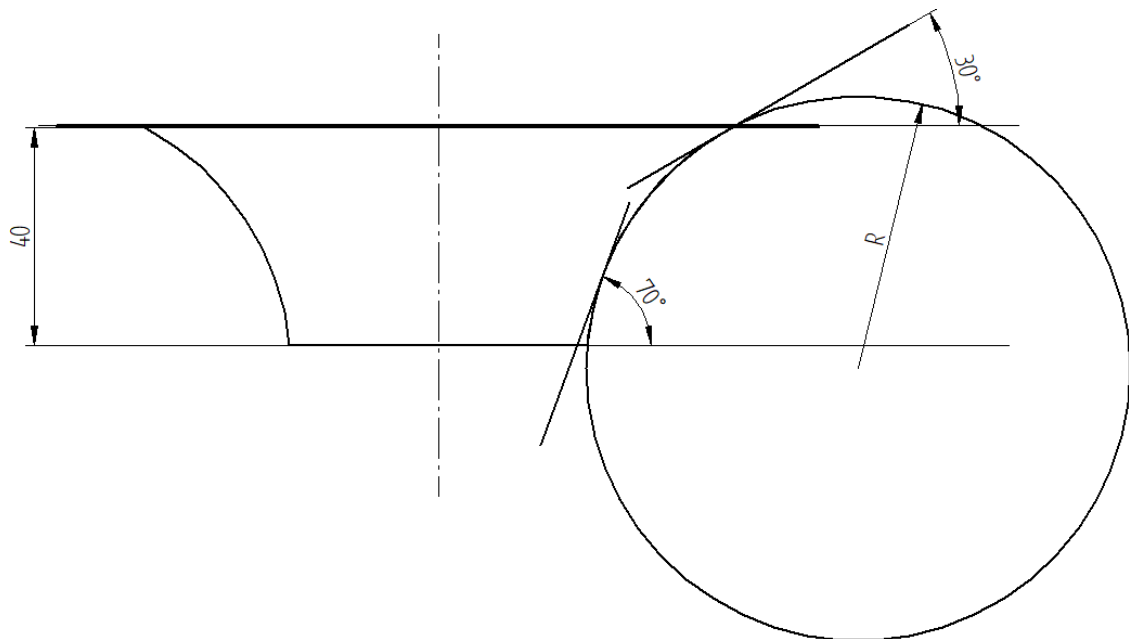
ahol:

- D_c – szerszámméret [mm],
- n – a maróorsó fordulatszáma, [min^{-1}].

Minden kísérletemet az alábbi formátum szerint dokumentáltam:

A kísérletben felhasznált eszközök tulajdonságai és jellemzői:

- Három tengelyes CNC vezérlésű marógépen: MSN-500/Haas Mini Mill-Edu,
- Alakítandó lemez anyaga: EN AW-1050A (Al99,5),
- Alakítandó lemez kiinduló mérete: Ø110 X 0,5 mm,
- Alakító szerszám: Gömbvégű alakító szerszám,
- Alakító szerszám anyaga: EN 10083-3-25CrMo4,
- Kenőanyag: műszerolaj,
- Gépi idő:
- Cam program neve:
- Alkatrész geometriája:



fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = \text{mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{mm}$	$R = \text{mm}$	Félkemény	Spirálmárás

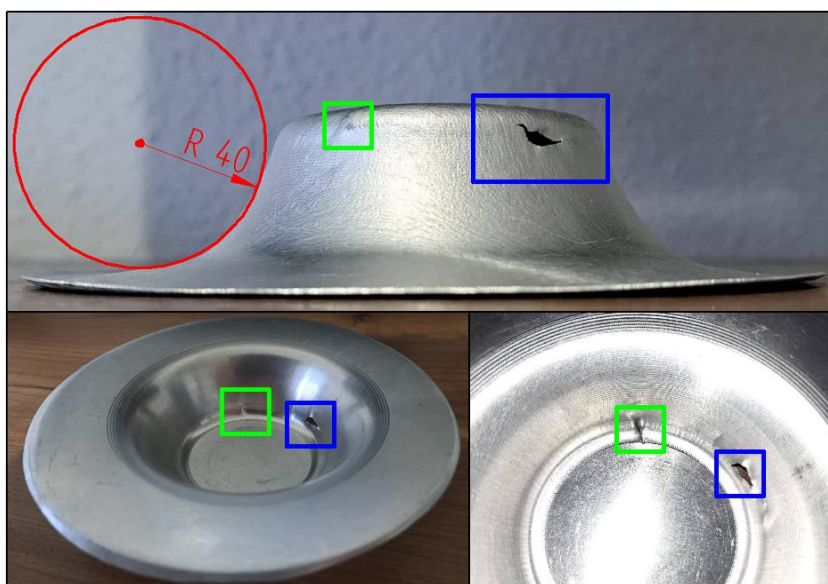
5. Alakított munkadarabok prezentálása

1. Kísérlet

Első kísérletben a rádiuszt 40 mm-nek vettem viszont mivel még nem tudtam, az ideális megmunkálási technológiai paramétereket az ehhez tartozó alkatrészhez ezért az első kísérletben asztali előtolási sebességet addig növeltem fokozatosan amíg a munkadarab 819 mm/percnél el nem szakadt ezáltal meghatároztam egy felső korlátot. Az alakítás során a munkadarabnak, vagyis a lemeznek nem volt elegendő ideje a képlékeny alakváltozáshoz és az egyre jobban felgyorsuló műveletnek köszönhetően elszakadt ahogy az a 23. ábrán kékkel jelölt négyzeten látható, illetve az is, hogy az elszakadásra reagálva az asztali előtolást kikapcsolva a főorsó még forgó mozgást végzett és zöld négyzettel jelölt helyen látszik annak a negatív következménye. A szakadás 35 mm mélyen következett be. Továbbá az is megfigyelhető volt, hogy a Haas Mini Mill-Edu marógépen 560 mm/perc felet gépi rezgés állt elő.

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 256 - 819 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,55 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 40 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás



24. ábra Első kísérleti munkadarab

2. Kísérlet

Ez esetben mivel már tisztában voltam a Haas Mini Mill-Edu marógép és a lemezen végrehajtható technológiai paraméterek korlátjaival ezért az asztali előtolást 350 mm/percnek vettem és rádiuszt meghagytam 40 mm-nek. Ezúttal a kívánt alakot elértem szakadás nélkül viszont a kiemelési helyen minimális benyomódás figyelhető meg a zöld négyzettel jelölt helyen a 24. ábrán.

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 350 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,55 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszám pálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 40 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás



25. ábra Második kísérleti munkadarab

3. Kísérlet

A következő kísérletben a rádiust 42,5 mm-nek vettem és az asztali előtolási sebességet pedig meghagytam 350 mm/percnek. Szakadás ez esetben nem következett be.

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 350 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,55 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 40 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás



26. ábra Harmadik kísérleti munkadarab

4. Kísérlet

Ebben a kísérletben a rádiuszt 150 mm-nek vettem és az asztali előtolási sebességet pedig meghagytam 350 mm/percnek. Megfigyelhető az, hogy mivel a rádiusz 150 mm-re lett növelve a lemez palástja az előzőkhöz képest tapintásra merevebbé vált. A megnövekedett ívnek köszönhetően. Szakadás ez esetben sem következett be.

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 350 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,23 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 150 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás



27. ábra Negyedik kísérleti munkadarab

5. Kísérlet

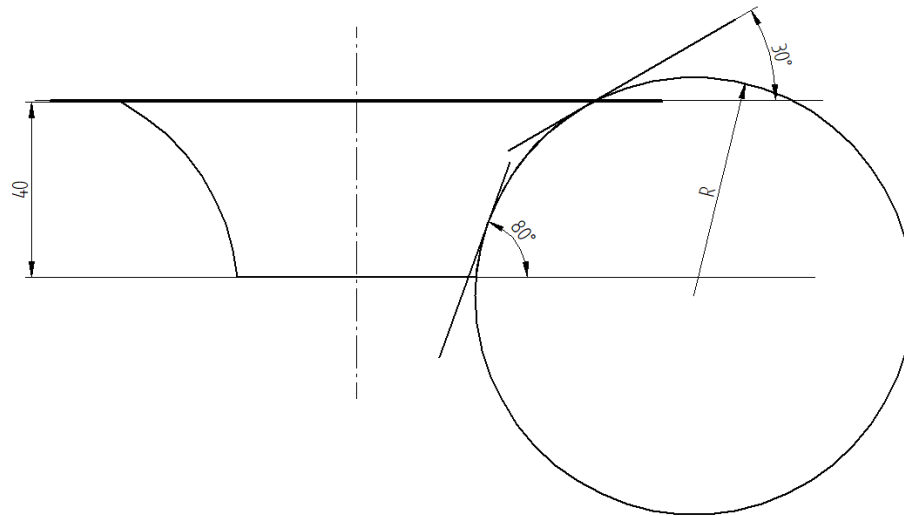
Itt a rádiuszt 150 mm-nek meghagytam, mint az előzőben viszont az asztali előtolási sebességet megnöveltem 560 mm/percre ennek ellenére külső különbséget nem találtam a kettő között. Szakadás ez esetben nem következett be. Azonos alakot kaptam, mint az előző kísérletben.

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 560 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,37 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 150 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás

6. Kísérlet

A 6. kísérletben geometriai változtatás hajtottam végre, mégpedig úgy, hogy az eddigi 70° -nak definiált rádiusz alsó érintőjét 80° -ra növeltem ahogy az a 27. ábrán látható. A rádiuszt pedig meghagytam 150 mm-nek az előző kísérletet folytatva. Szakadás ez esetben sem következett be.



28. ábra Módosított alkatrész műszaki rajza



29. ábra Hatodik kísérleti munkadarab

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 560 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,37 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 150 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás

7. Kísérlet

Itt a rádiusz alsó érintője továbbra is 80° volt viszont a rádiuszt 180 mm-re megnöveltem. Az asztali előtolási sebességet is megtartottam 560 mm/percnek. A lemez palástja merevebb lett a 150 mm rádiuszos munkadarabokhoz képest.



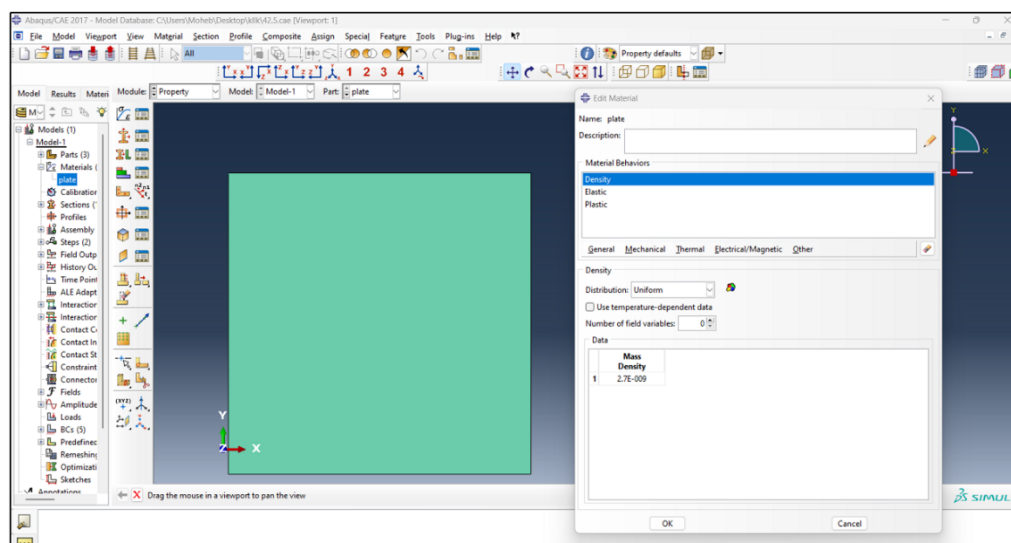
30. ábra Hetedik kísérleti munkadarab

fordulatszám	előtoló sebesség	előtolás	fogásvétel
$n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$	$V_f = 560 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$f = 0,37 \frac{\text{mm}}{\text{ford}}$	$\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

oldallépés	Rádiusz	állapot	szerszámpálya jellege
$\Delta y = \text{--- mm}$	$R = 180 \text{ mm}$	Félkemény	Spirálmárás

6. A végelelemes modell alkalmazása és a modellezési eredmények összefoglalása

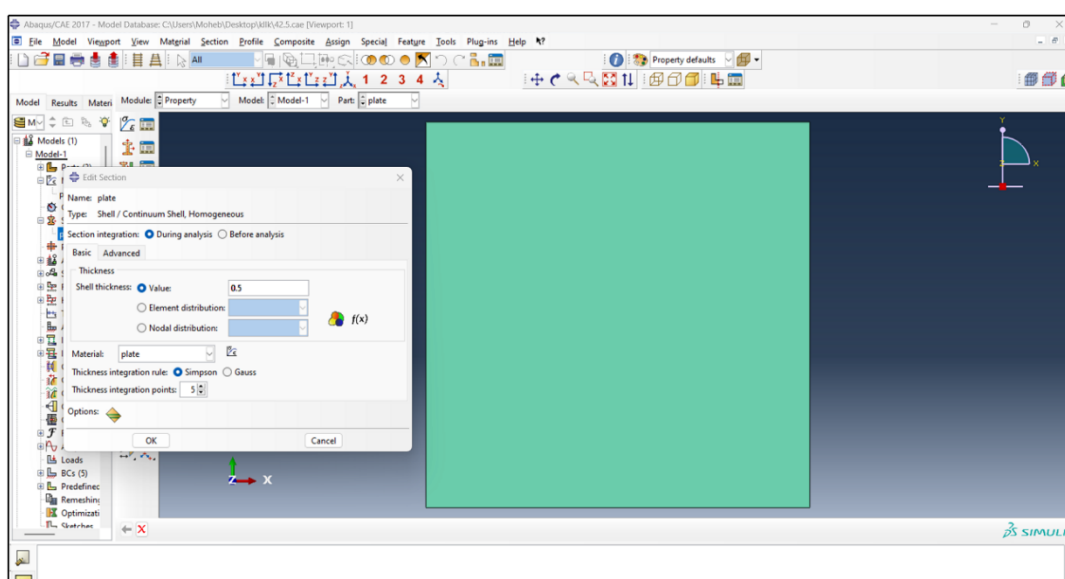
A kísérletek alakításával párhuzamosan végelelemes modellezést is alkalmaztam ugyan azon a geometrián, mint amit a harmadik kísérletben gyártottam, azaz 42,5 mm rádiuszú munkadarabról. A végelelemes modellezést az Abaqus szoftverben végeztem, ami egy hatékony és teljes megoldásokat kínál rutinszerű és kifinomult mérnöki problémákra egyaránt, az ipari alkalmazások széles spektrumát lefedve. Az autóiparban a mérnöki munkacsoportok képesek figyelembe venni a teljes járműterhelést, a dinamikus vibrációt, a többtestű rendszereket, az ütközést, a nemlineáris statikus, a termikus csatolást és az akusztikai-szerkezeti csatolást egy közös modelldat-struktúra és integrált megoldó technológia segítségével. A kategóriájában legjobb vállalatok kihasználják az Abaqus Unified FEA előnyeit folyamataik és eszközeik konszolidálására, a költségek és a hatékonyság csökkentésére, valamint versenyelőny megszerzésére. Első lépésben a szoftverben a „Part” -ban létrehoztam és definiáltam a lemezt, készüléket és az alakító szerszámot. A lemezt síkbeli deformálható héj alakú testnek míg a készüléket és az alakító szerszámot pedig statikusan merev tengelyszimmetrikus testnek definiáltam. Ezután a „Property” -ben bevittam EN AW-1050A alumínium lemez anyagtulajdonságait a programban SI (mm) mértékegységrendszer alkalmazva.



31. ábra Lemez anyag tulajdonságainak bevitele

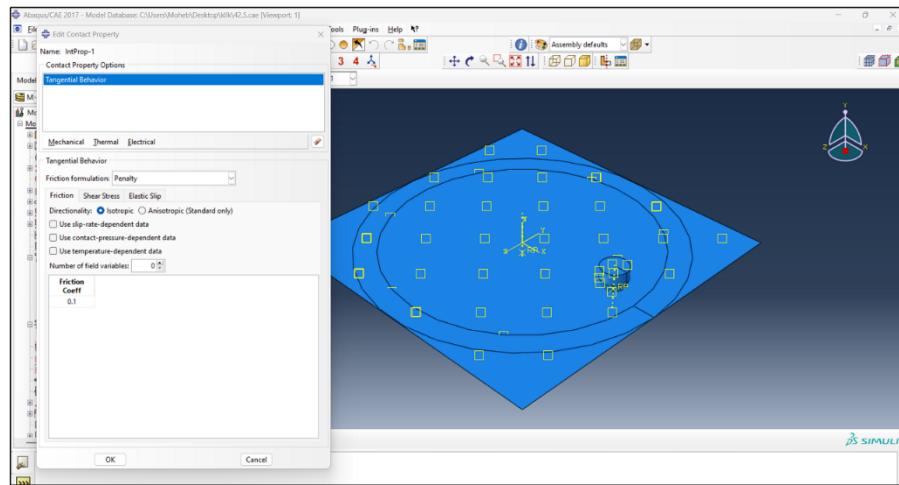
5. táblázat: Alkalmazott EN AW-1050A alumínium anyag tulajdonságok [15]

Megnevezés		Jelölés	Érték
Sűrűség		ρ	$2,7 \times 10^{-9} \text{ [t/mm}^3\text{]}$
Rugalmassági modulus		E	70000 [MPa]
Poisson tényező		ν	0,33
Johnson-Cook	Folyáshatár	A	110 [MPa]
	keményedési együttható	B	150 [MPa]
	keményedési kitevő	n	0,360
	hőmérsékleti kitevő	m	1

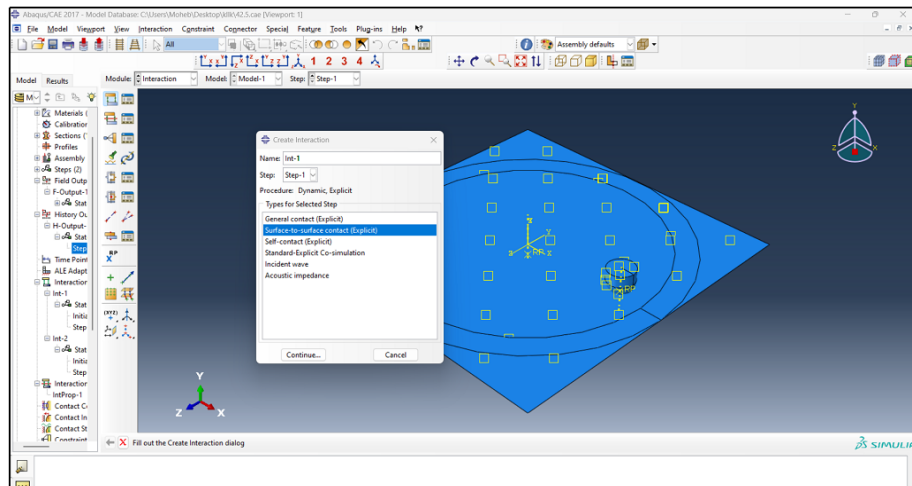


32. ábra Kiinduló lemez vastagság bevitele

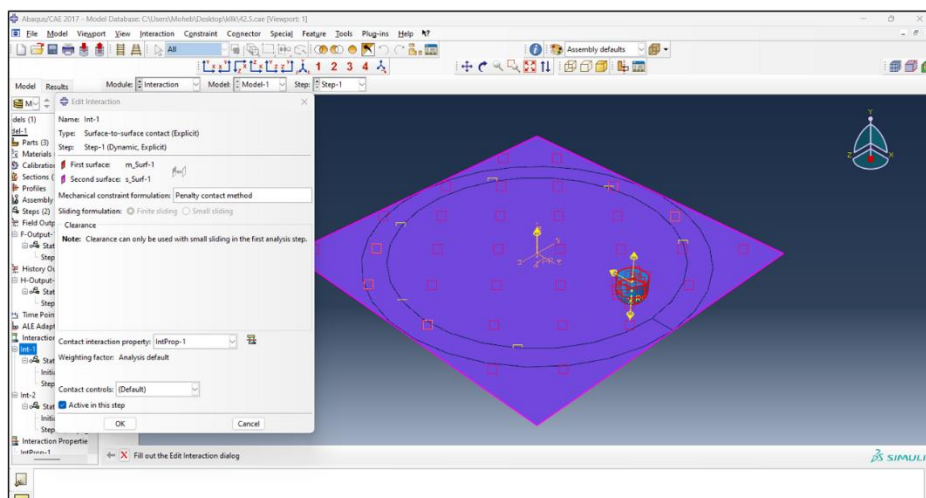
Természetesen a bevitt alumínium anyag tulajdonságokat a szakkönyvből vettem át. Itt még megadtam a kiinduló lemez vastagságot $s_0 = 0,5 \text{ [mm]}$. Ezt a műveletet a 31. ábra illusztrálja. Így hát megvolt a létrehozott és definiált lemez, készülék és az alakító szerszám továbbá a lemez anyagának a tulajdonságait is bevittem. A folytatáshoz az „Assembly” -ben összeszereltem és elhelyeztem a koordináta rendszerben az origó ponthoz képest az említett alkatrészeket ahogy az a 32. ábrán látható. Ez után a „Step” -ben megadtam az eljárás típusát, ami dinamikus explicit. Egy explicit algoritmussal az új állapot közvetlenül kiszámítható az aktuális állapotban rendelkezésre álló adatokból. A „Step” -ben maradván megadtam még a műveleti időt, ami ebben az esetben 2632 másodperc. A skálázási léptékek céldönövekedési értékét 0,01-nek állítottam be és azok tömegét egységesen vontam össze ahogy az a 33. ábrán látható.



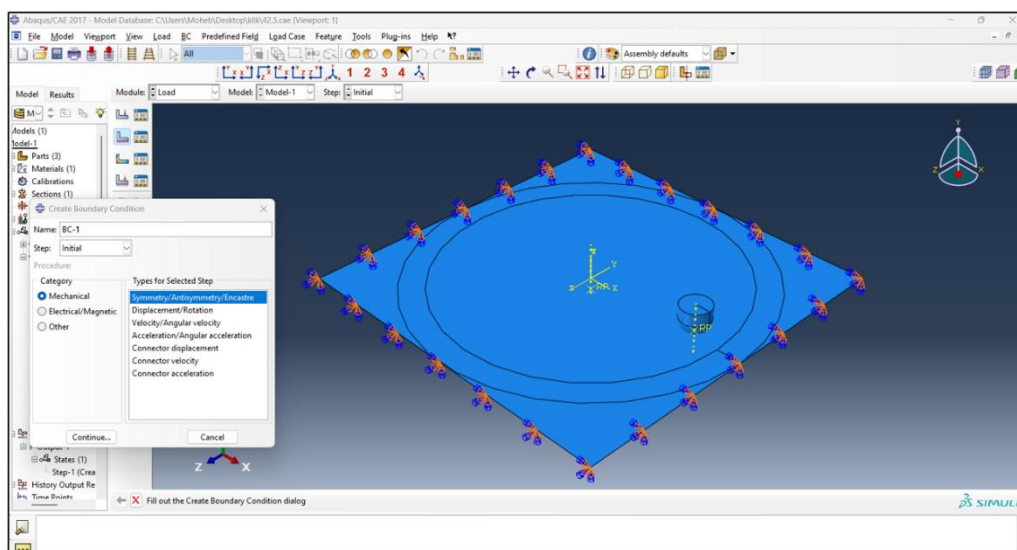
35. ábra Súrlódási együttható beállítása



36. ábra Érintkezési tulajdonságok beállítása



37. ábra Mechanikai kényszerek



38. ábra Határfeltételek beállítása

Ez után „Load” -ba belépve beállítottam a határfeltételeket ahogy az a 37. ábrán látható. A továbbhaladáshoz elővettem a 42,5 mm rádiuszú munkadarabhoz tartozó szerszám pálya G-kódot és azt beillesztettem egy Excel táblázatban. Egy CNC vezérlésű marógép úgy értelmezi a G-kódot tartalmazó x, y, z vektor irányú koordinátákat, hogy egy szerszám addig marad egy vektor koordináta ponton amíg az nem íródik felül egy újabb sorban újabb vektor koordináta ponttal. Ez okozta az egyik legnagyobb problémát az adat átvitelkor mivel itt szembesültem azzal, hogy maradtak üres cellák, illetve az Excel táblázatban is rengeteg sorban az x, y, z oszlopokhoz tartozó koordináta pontok összefonódtak azaz több sorban is nem egymást követték az x, y, z koordináta pontok volt, ahol csak egy vektor koordináta pont volt meg adva olyan is volt, hogy kettő, de nem abban a sorrendben stb. Így hát az Excel táblázatban írtam függvényeket a szétválasztáshoz és ahhoz, hogy az üres cellák felvegyék a fölöttük meglévő sorban hozzájuk tartozó értéket. Az adat rendezés azért kellett egyrészt azért, mert az Abaqus szoftverben egyszerre csak egy vektor koordinátahoz tartozó pontokat lehet bevinni, amihez szükséges rendszerezni az oszlopokat úgy, hogy mindegyikben csak a hozzá tartozó vektor koordináta pontokat fogadja el másrészt üres cellát nem fogad el. A megírt függvényeket a 6. táblázat, valamint a vektor koordináta pontok rendezési folyamatot a 7. táblázat szemlélteti. Továbbá mivel az Abaqus szoftverben csak számokat lehet bevinni ezért a x, y, z betűket is eltávolítottam az oszlopokból.

6. táblázat: Megírt Excel függvények a vektor koordináta pontok rendezéséhez

x oszlopban beírt Függvény	=HA(BAL(B3;1) ="X"; B3; B2)
y oszlopban beírt Függvény	=HA(C3=","; HA(BAL(B3;1) ="Y"; B3; C2); HA(BAL(C3;1) ="Z";C2;C3))
z oszlopban beírt Függvény	=HA(BAL(D3;1) ="Z"; D3; HA(BAL(C3;1) ="Z"; C3; HA(BAL(B3;1) ="Z";B3;H2)))

7. táblázat: Részlet a vektor koordináta pontok rendezésének folyamatáról [mm]

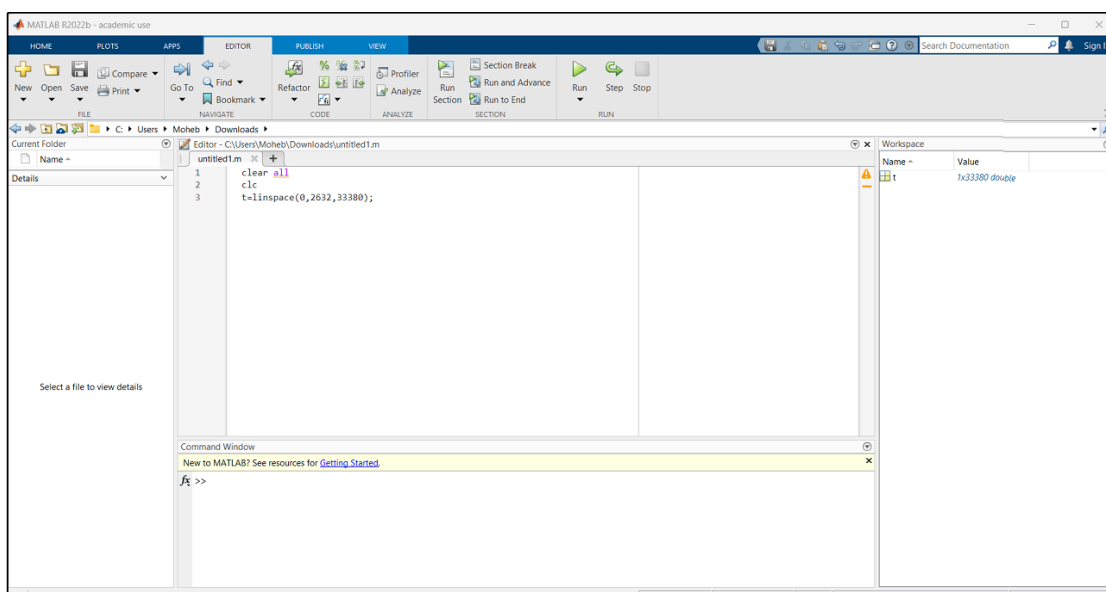
					
Edgecam Vektor koordináta Pontok			Rendezett Vektor koordináta Pontok		
X49.673	Y-0.298	Z-0.008	49.673	-0.298	-0.008
X49.517	Y2.448		49.517	2.448	-0.008
Y2.45			49.517	2.450	-0.008
X49.49	Y2.937	Z-0.009	49.490	2.937	-0.009
X49.483	Y2.999		49.483	2.999	-0.009
X49.441	Y3.410		49.441	3.410	-0.009
X49.436	Y3.473		49.436	3.473	-0.009
X49.319	Y4.894	Z-0.012	49.319	4.894	-0.012
X49.31	Y4.970		49.310	4.970	-0.012
X49.258	Y5.382	Z-0.013	49.258	5.382	-0.013
X49.18	Y5.871		49.180	5.871	-0.013
X49.172	Y5.942		49.172	5.942	-0.013
X49.062	Y6.848	Z-0.015	49.062	6.848	-0.015
X48.98	Y7.337	Z-0.016	48.980	7.337	-0.016
X48.954	Y7.463		48.954	7.463	-0.016
X48.903	Y7.713		48.903	7.713	-0.016
X48.812	Y8.312	Z-0.017	48.812	8.312	-0.017
X48.723	Y8.801	Z-0.018	48.723	8.801	-0.018
X48.694	Y8.935		48.694	8.935	-0.018
X48.617	Y9.287	Z-0.019	48.617	9.287	-0.019
X48.569	Y9.532		48.569	9.532	-0.019
X48.521	Y9.776	Z-0.02	48.521	9.776	-0.020
X48.383	Y10.365	Z-0.021	48.383	10.365	-0.021
X48.380	Y10.380		48.380	10.380	-0.021
X48.309	Y10.750		48.309	10.750	-0.021
X48.145	Y11.396	Z-0.022	48.145	11.396	-0.022
X48.046	Y11.780	Z-0.023	48.046	11.780	-0.023
X47.936	Y12.214	Z-0.024	47.936	12.214	-0.024
X47.881	Y12.397		47.881	12.397	-0.024
X47.871	Y12.429		47.871	12.429	-0.024
X47.805	Y12.698	Z-0.025	47.805	12.698	-0.025
X47.611	Y13.366	Z-0.026	47.611	13.366	-0.026
X47.521	Y13.672		47.521	13.672	-0.026

Egy CAM rendszerben a szerszámpálya és technológiai paraméterek függetlenek egymástól, de az Abaqus szoftvernél egy explicit eljárás esetén út-idő függvény vagy függvényeket kell megadni vektor elmozdulási irányoktól függően tehát ez esetben egyszerre három darab út-idő függvény együttes mozgásaként értelmezi a szerszámpályát, amelyeknek közös az idő az tengelyük ezért a vektor koordináta pontok elrendezése után szükségem volt a három darab út-idő függvény idő (t) [s] tengely koordináta pontjaira az alábbi három darab függvény elkészítéséhez: (x,t); (y,t) és (z,t). Így hát visszatértem a Matlab szoftverhez, ahol is írtam egy programot, ami legenerálta nekem a (t) tengely koordináta pontokat. A megírt programot a 8. táblázat szemlélteti.

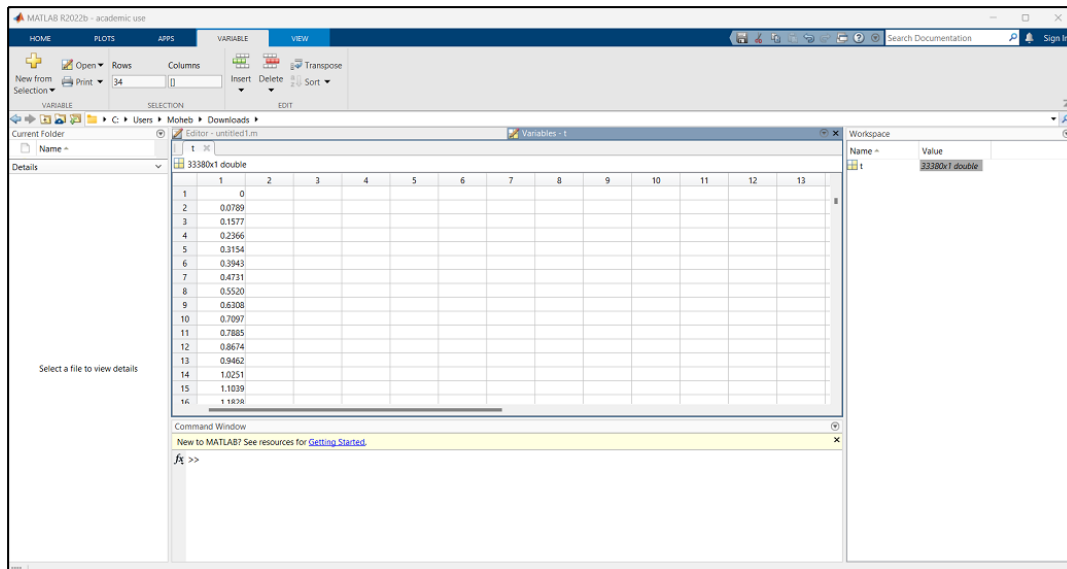
8. táblázat: Idő koordináta pontok legenerálásához szükséges megírt program

clear all
clc
t=linspace(0,2632,33380);

Az koordináták elrendezése után láttam azt, hogy az Excel táblázatban 33380 sor van, vagyis annyi x, y, z koordináta pont van, illetve azt is tudtam, hogy 2632 másodperc a műveleti idő ezért úgy írtam meg a programot, hogy generáljon le 33380 pontot 0 és 2632 végpontok között egyenlő távolságtól egymáshoz képest. Ezt a folyamatot 38. és a 39. ábra szemlélteti.

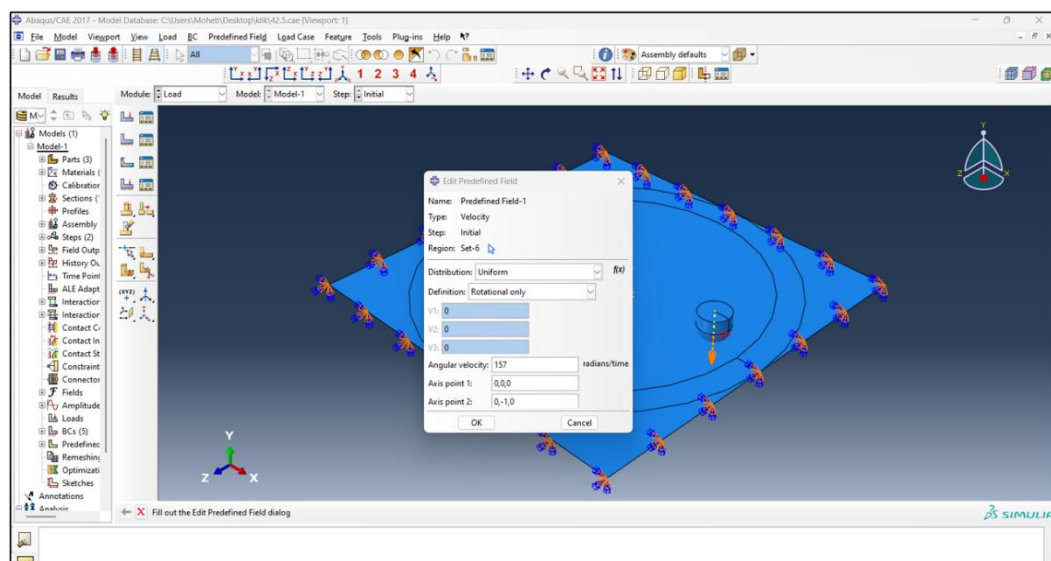


39. ábra Megírt program az idő koordináta pontok legenerálásához



40. ábra Legenerált idő koordináta pontok

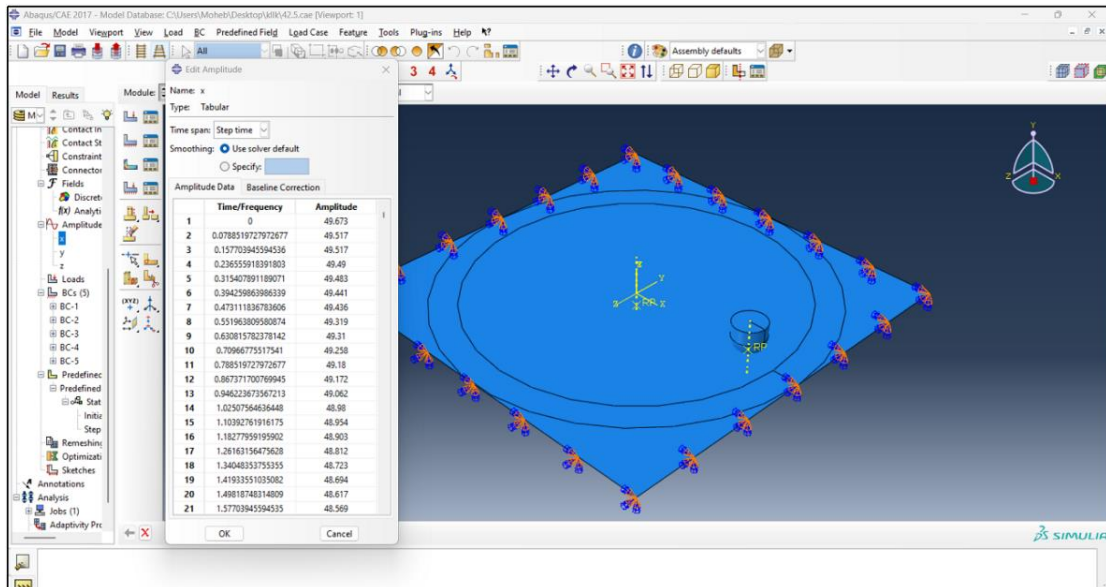
A három darab függvény koordináta adatai megvoltak ezért azok importálása előtt beállítottam, hogy a szerszám forgó mozgást végezzen és mivel a CNC vezérlésű marógép főorsója $1500 \text{ [min}^{-1}]$ állandó fordulatszámmal végezte a forgó mozgást a kísérletek során az első kísérlet kivételével ezért az Abaqus szoftverbe is ezt vittem be viszont a szoftver radián/időben értelmezi, azaz ebben az esetben radián/másodpercben kellett megadni, ami 157 [rad/s] -nak felel meg. Ezt követően bevitettem külön-külön az (x,t) ; (y,t) és (z,t) függvényeket, azaz a szerszám pályát. Ezeket a „Load” -on belül tettem meg. Ezt a folyamatot a 40. és 41. ábra, illetve a 9. táblázat szemlélteti.



41. ábra Szerszám forgó mozgásának beállítása

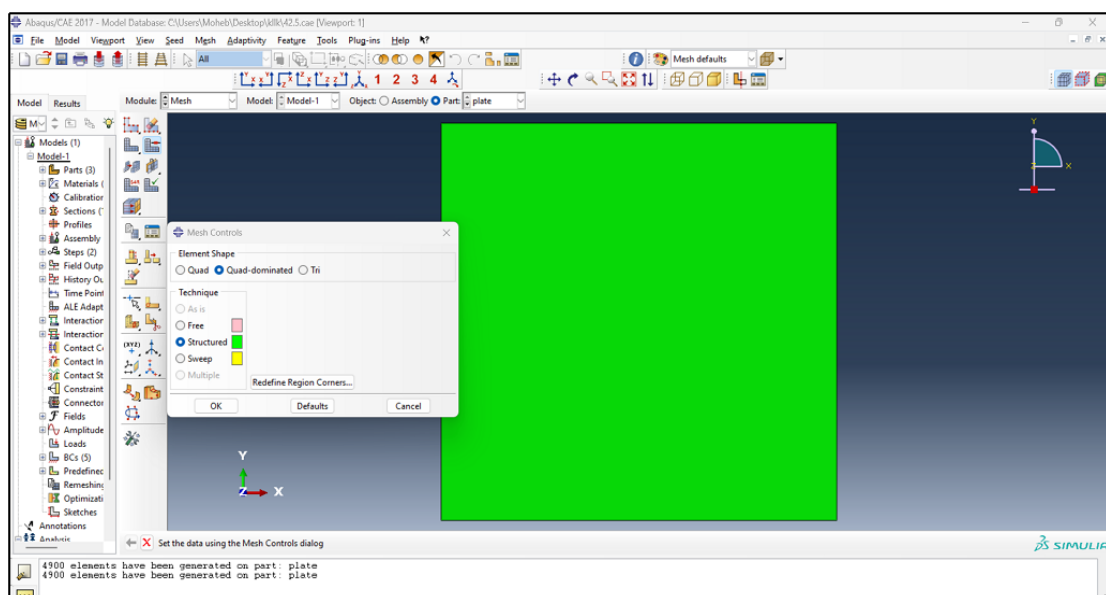
9. táblázat: Részlet a három darab út-idő függvény koordináta adatokból

x [mm]	t [s]	y [mm]	t [s]	z [mm]	t [s]
49.673	0	2.298	0	-0.008	0
49.517	0.078852	2.448	0.078852	-0.008	0.078852
49.517	0.157704	2.450	0.157704	-0.008	0.157704
49.490	0.236556	2.937	0.236556	-0.009	0.236556
49.483	0.315408	2.999	0.315408	-0.009	0.315408
49.441	0.394259	3.410	0.394259	-0.009	0.394259
49.436	0.473111	3.473	0.473111	-0.009	0.473111
49.319	0.551963	4.894	0.551963	-0.012	0.551963
49.310	0.630815	4.970	0.630815	-0.012	0.630815
49.258	0.709667	5.382	0.709667	-0.013	0.709667
49.180	0.788519	5.871	0.788519	-0.013	0.788519
49.172	0.867371	5.942	0.867371	-0.013	0.867371
49.062	0.946224	6.848	0.946224	-0.015	0.946224
48.980	1.025076	7.337	1.025076	-0.016	1.025076
48.954	1.103928	7.463	1.103928	-0.016	1.103928
48.903	1.182779	7.713	1.182779	-0.016	1.182779
48.812	1.261631	8.312	1.261631	-0.017	1.261631
48.723	1.340484	8.801	1.340484	-0.018	1.340484
48.694	1.419336	8.935	1.419336	-0.018	1.419336
48.617	1.498187	9.287	1.498187	-0.019	1.498187
48.569	1.577039	9.532	1.577039	-0.019	1.577039
48.521	1.655891	9.776	1.655891	-0.020	1.655891
48.383	1.734743	10.365	1.734743	-0.021	1.734743
48.380	1.813595	10.380	1.813595	-0.021	1.813595
48.309	1.892447	10.750	1.892447	-0.021	1.892447
48.145	1.971299	11.396	1.971299	-0.022	1.971299
48.046	2.050151	11.780	2.050151	-0.023	2.050151
47.936	2.129003	12.214	2.129003	-0.024	2.129003
47.881	2.207855	12.397	2.207855	-0.024	2.207855
47.871	2.286707	12.429	2.286707	-0.024	2.286707
47.805	2.365559	12.698	2.365559	-0.025	2.365559
47.611	2.444411	13.366	2.444411	-0.026	2.444411
47.521	2.523263	13.672	2.523263	-0.026	2.523263
47.362	2.602115	14.160	2.602115	-0.027	2.602115
47.225	2.680967	14.647	2.680967	-0.028	2.680967
47.151	2.759819	14.859	2.759819	-0.028	2.759819
47.009	2.838671	15.260	2.838671	-0.029	2.838671
46.856	2.917523	15.697	2.917523	-0.030	2.917523
46.726	2.996375	16.107	2.996375	-0.030	2.996375
46.644	3.075227	16.330	3.075227	-0.031	3.075227
46.547	3.154079	16.588	3.154079	-0.031	3.154079
46.353	3.232931	17.068	3.232931	-0.032	3.232931
46.171	3.311783	17.563	3.311783	-0.033	3.311783



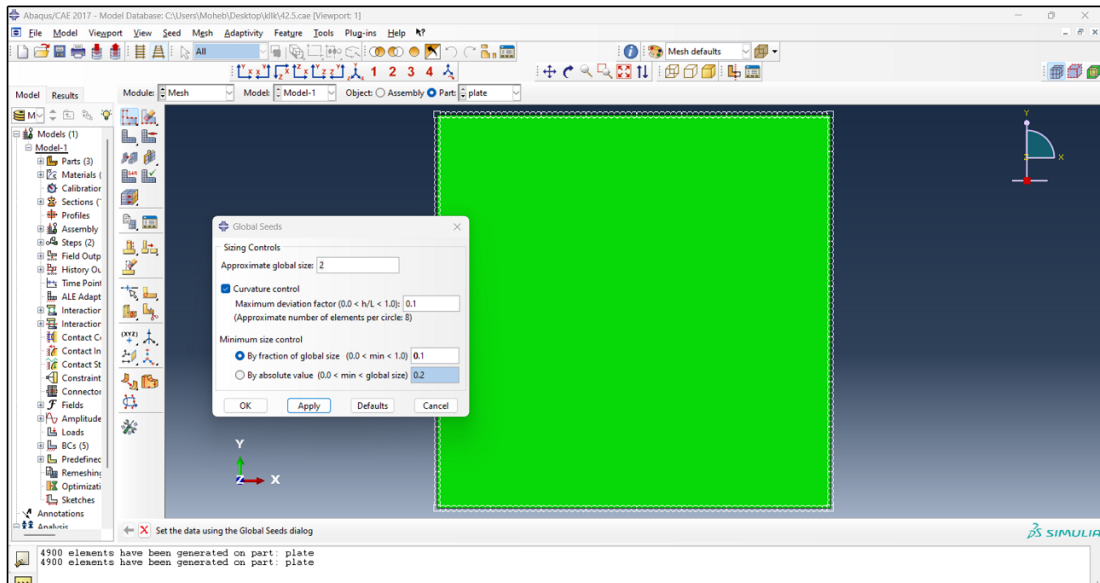
42. ábra Függvények bevitele

A következő lépéshez beléptem a „Mesh” -be, ahol a hálónak a beállításait végeztem el. Kezdvé azzal, hogy strukturált háló mintát állítottam be a lemeznek. A 42. ábra illusztrálja ezt a folyamatot. A strukturált hálózás biztosítja a legtöbb irányítást a háló felett, mivel előre meghatározott hálómintákat alkalmaz bizonyos modell topológiákra. A legtöbb particionálatlan szilárdtestmodell túl bonyolult ahhoz, hogy előre meghatározott hálómintákkal hálózunk össze. Az összetett modellek azonban gyakran particionálhatók egyszerű régiókra olyan topológiákkal, amelyekhez strukturált hálómintázatok léteznek.

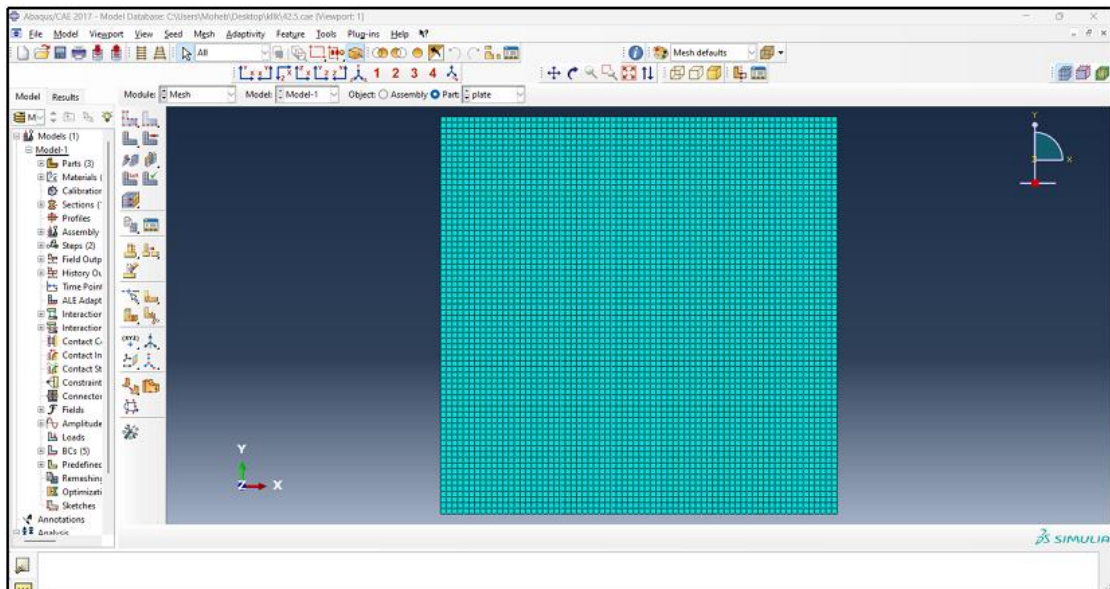


43. ábra Lemez háló minta beállítása

A Mesh-nél még megadtam a lemez háló sűrűségét úgy, hogy 2X2 négyzetű elemekre osztottam fel figyelembe véve a kívánt pontosságot és a szükséges futásidőt. Ezt a modellezési műveletet a 43. és 44. ábra illusztrálja.

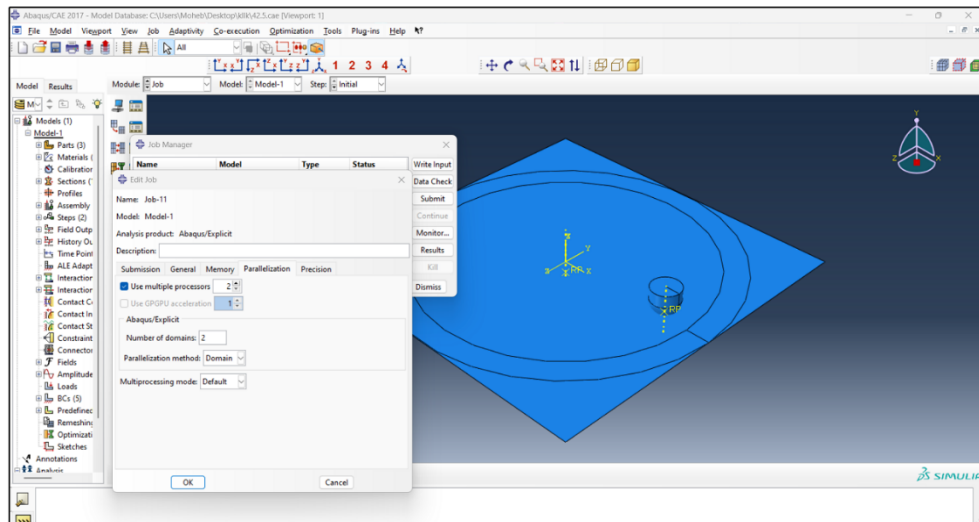


44. ábra Lemez háló sűrűség beállítása



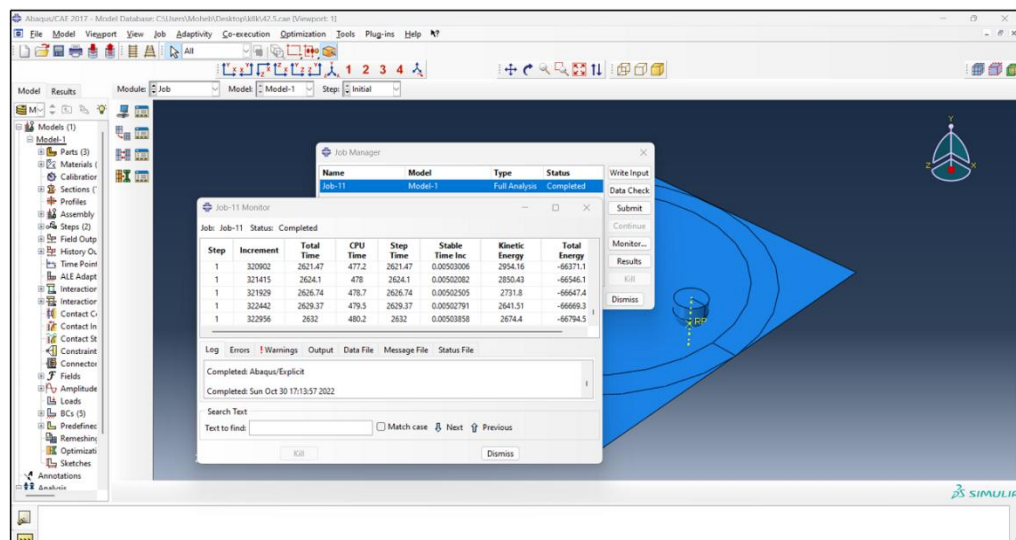
45. ábra Beállítás utáni lemez háló sűrűség

A következő lépéshez beléptem a „Job” -ba és azon belül Job Manager-be kreáltam egy munkamenetet a lefuttatáshoz, ahol kiválasztottam azt, hogy a processzor több magja is dolgozzon egyszerre, hogy a szimuláció gyorsabban menjen végbe. A dolgozó processzor magok számának beállítását a 45. ábra szemlélteti.



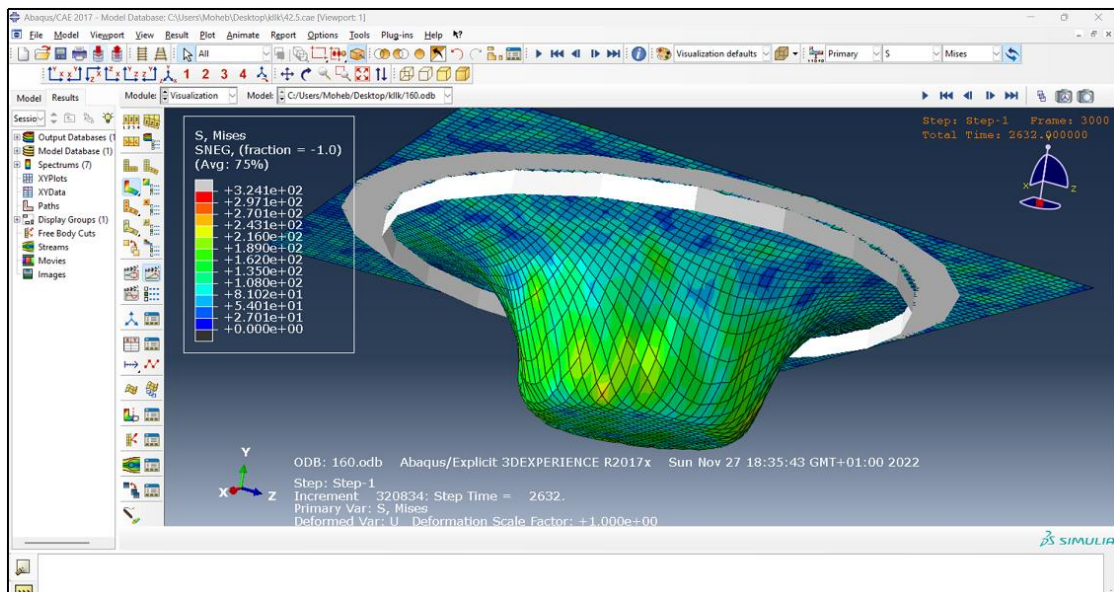
46. ábra Dolgozó processzor magok számának beállítása

A processzor beállítások után megnyitottam „Submit” ablakot ezzel elindítottam a futtatást, ami több mint tíz perc után sikeresen lezárult. A „Monitor” ablak megnyitásával nyomon tudtam követni a futtatást és ha bármilyen probléma merült volna fel itt jelezte volna ki ahogy az 46. ábrán van feltüntetve.

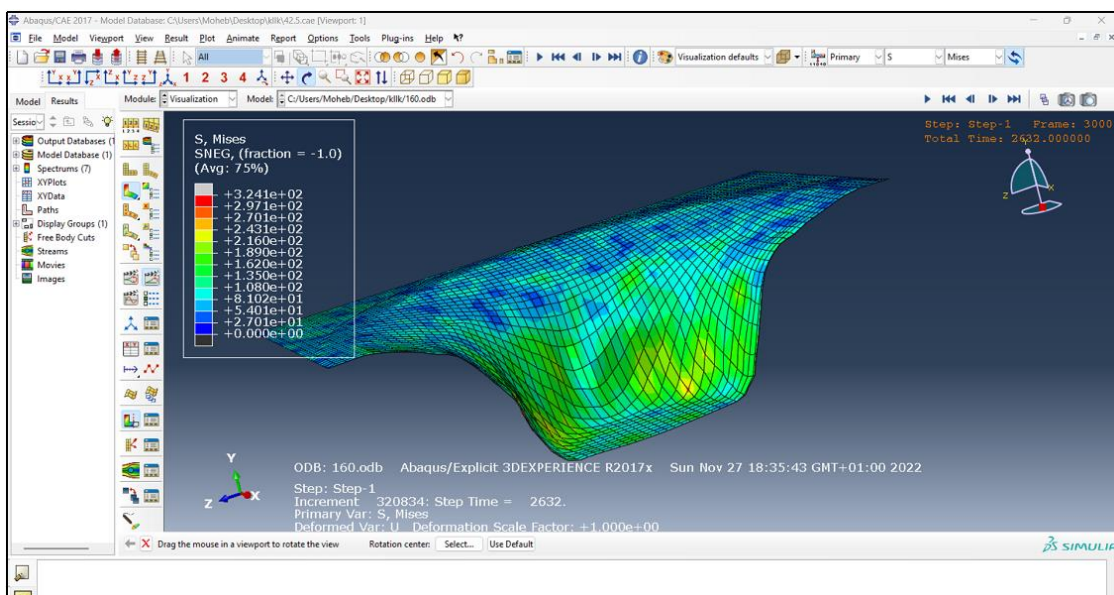


47. ábra Futtatás nyomon követése

A sikeres lefuttatás után megnyomtam a „Result” gombot ezzel megtudtam tekinteni a kapott vizuális munkadarabot a „visualization” -en belül. A 47. ábra illusztrálja a Huber–Mises–Hencky féle redukált feszültséget, amin látható, hogy a legnagyobb feszültség a hiperbola munkadarab palást felületén keletkezik azon a helyen ahol az alakító szerszám végig ment a szerszámpályán. A 48. ábra mutatja az Elfelezett munkadarabot Huber–Mises–Hencky féle redukált feszültségi állapottal.

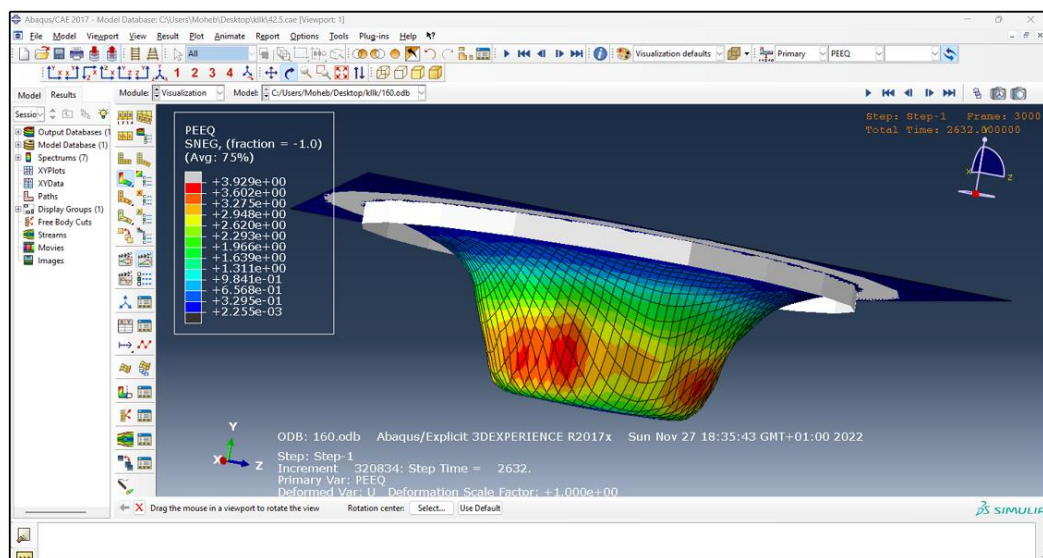


48. ábra Huber–Mises–Hencky féle redukált feszültség

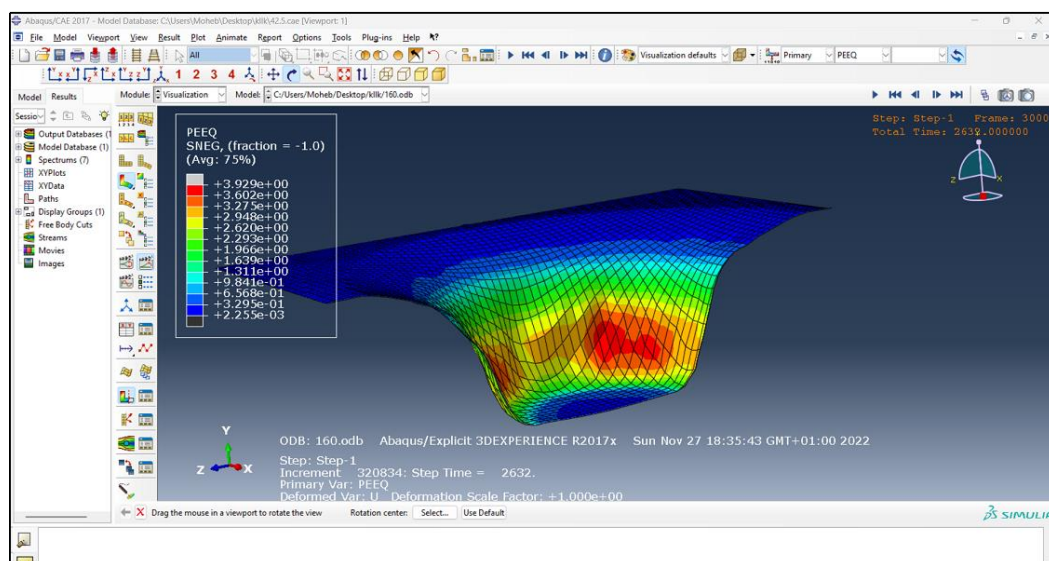


49. ábra Elfelezett munkadarab Huber–Mises–Hencky féle redukált feszültség

A 49. és 50. ábra az (Equivalent Plastic Strain) ekvivalens maradandó nyúlás állapotot mutatja, ami valójában ez egy skaláris változó, amelyet az anyag képlékeny alakváltozásának illusztrálására használnak, azaz skaláris mennyiség az ekvivalens képlékeny alakváltozás összes komponensének a modell minden pozíciójában hasonlóan a Von Mises-feszültséghez, amely a nyírófeszültség skaláris mértéke egy adott pontban. A képlékeny deformáció ez esetben a lemez megnyúlását reprezentálja. Ha ránézünk a munkadarabra akkor megállapíthatjuk azt, hogy a munkadarab palást alsó része szenvedte el a legnagyobb ekvivalens képlékeny alakváltozást azaz ott nyúlt meg a legnagyobb mértékben az anyag.

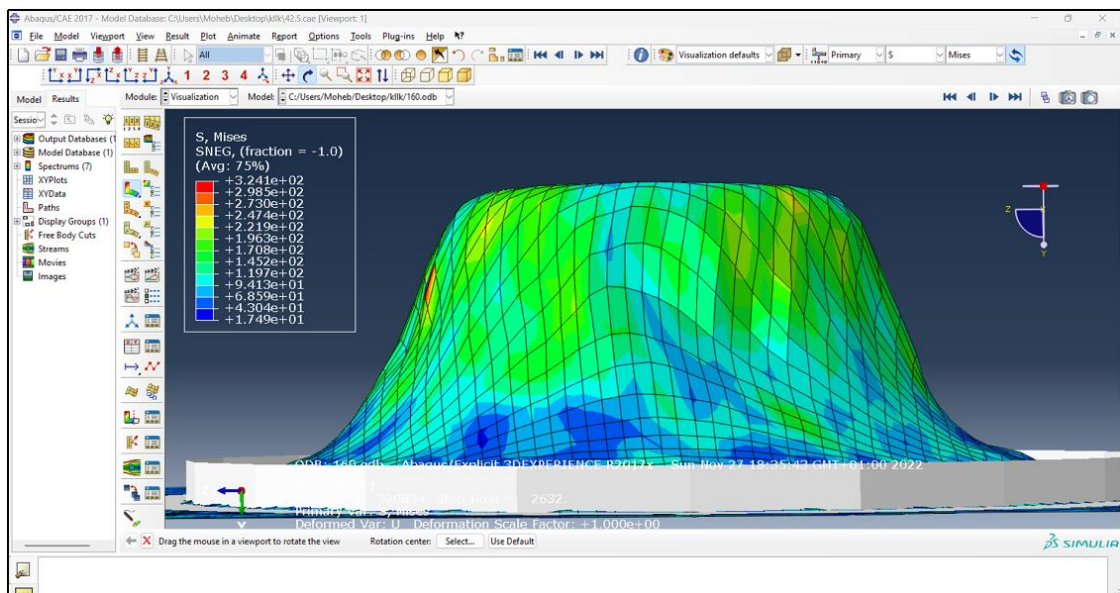


50. ábra Teljes munkadarab Equivalent Plastic Strain állapota



51. ábra Elfelezett munkadarab Equivalent Plastic Strain állapota

Mind a CNC vezérlésű marógépben mind az Abaqus szoftverben alakított munkadarabon megfigyelhető a lemez külső felületén látható anyag elmozdulás következtében kialakult jellegzetes hengerlési irány, ami a valódi munkadarabon narancshéjas felület formájában jelent meg. Ezt a 51. ábra reprezentálja, ahol a 42,5 [mm] rádiuszú kísérletben alakított és az Abaqus szoftverben alakított munkadarab látható.



52. ábra Jellegzetes hengerlési irány

7. Röntgen felvételek és falvastagság mérés prezentálása és kiértékelése

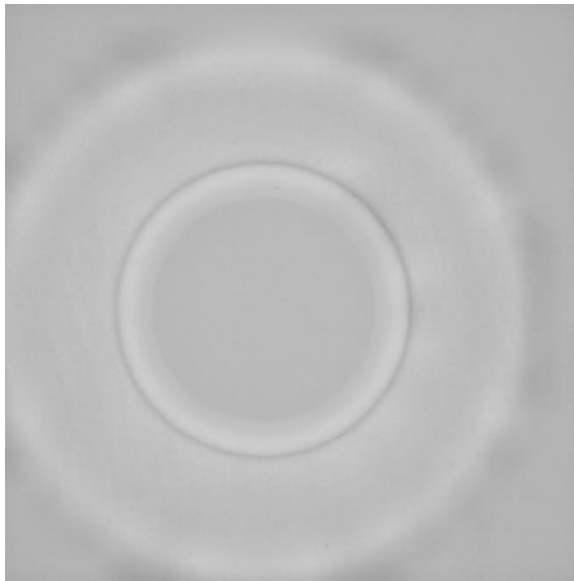
7.1 Röntgen felvételek készítése és kiértékelése

Az egyetemen továbbá rendelkezésemre állt az Y.Cheetah FXE-160.51 Multifocus X-Ray, ami egy kompakt röntgen átvilágító kabin, amely rendelkezik mikrofókusszal és CT funkcióval. A gyors és hatékony vizsgálat jellemzi, illetve az 1-klikkes kezelés, 2000x-es geometriai és 17500x-os teljes nagyítás. A berendezéssel végzett vizsgálatokhoz a VG Studio MAX 3.0 szoftvert használtam, amely a 2D felvételek és a 3D rekonstrukciós modellek létrehozása és kiértékelése szempontjából minden szükséges modult tartalmaz. Ezzel a berendezéssel történő mérések lehetővé teszik a vizsgált mintában az anyageloszlás pontos mérését. A berendezésről készített képet a 52. ábra illusztrálja.



53. ábra Y.Cheetah FXE-160.51 Multifocus X-Ray berendezés

Ezzel a berendezéssel, illetve ezekkel a készült felvételekkel igaz falvastagságot nem lehetett kimutatni viszont annak köszönhetően, hogy anyageloszlást kimutatja igazolni tudták a végeselemes modellezés PEEQ állapotát ugyanis a berendezésben készült felvételeken az látszik, hogy ahol sötétebb az anyag ott vastagabb ahogy az a kísérleti munkadarabról készült felvételeken is az látható, hogy palást alsó részén, hogy ott világosabb az anyag mikképpen az 53. és 54. ábrán látszik.



54. ábra 2D-és röntgen felvétel a kísérleti munkadarabról (a)



55. ábra 2D-és röntgen felvétel a kísérleti munkadarabról (b)

7.2 Falvastagság mérése és kiértékelése

A negyedik kísérletben alakított munkadarabon falvastagságot mértem mikrométerrel annak érdekében, hogy visszaigazolást nyerjek végeselemes modellezés PEEQ állapotáról. A mérést a 55. ábrán lévő mikrométerrel végeztem, aminek a méréstartománya 0-25 [mm] és a leolvasása 0,001[mm].



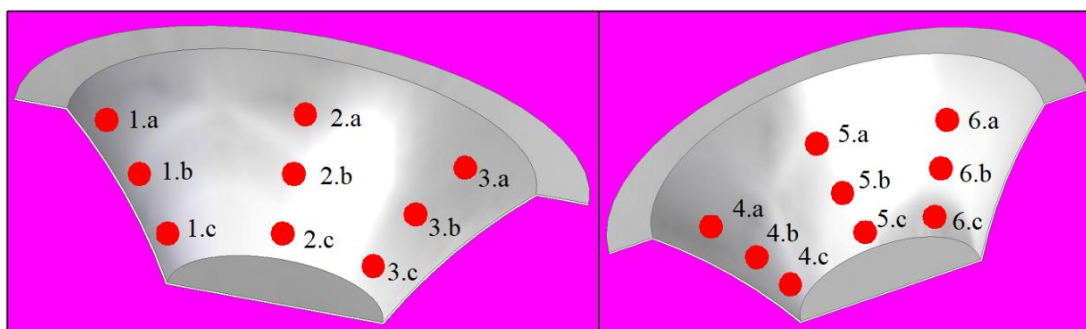
56. ábra Mérés során használt mikrométer

Mérés előtt felmerült az a probléma, hogy a munkadarab alakja miatt nem tudtam hozzá férni a munkadarabhoz mikrométerrel ezért úgy döntöttem, hogy egy kézi gravírozóval fűrészlárcsát alkalmazva ketté vágom a munkadarabot. A ketté vágott munkadarabot az 56. ábra mutatja.



57. ábra Kettévágott munkadarab

Miután kettévágtam a munkadarabot felállítottam egy mérési tervet a mérési pontok helyéről. A mérési pontok 10 mm távolságban voltak egymástól vertikális irányban. A mikrométerrel az 57. ábrán pirossal jelölt tizenhét mérési ponton mértem meg a falvastagságot.



58. ábra Mérési pontok helye

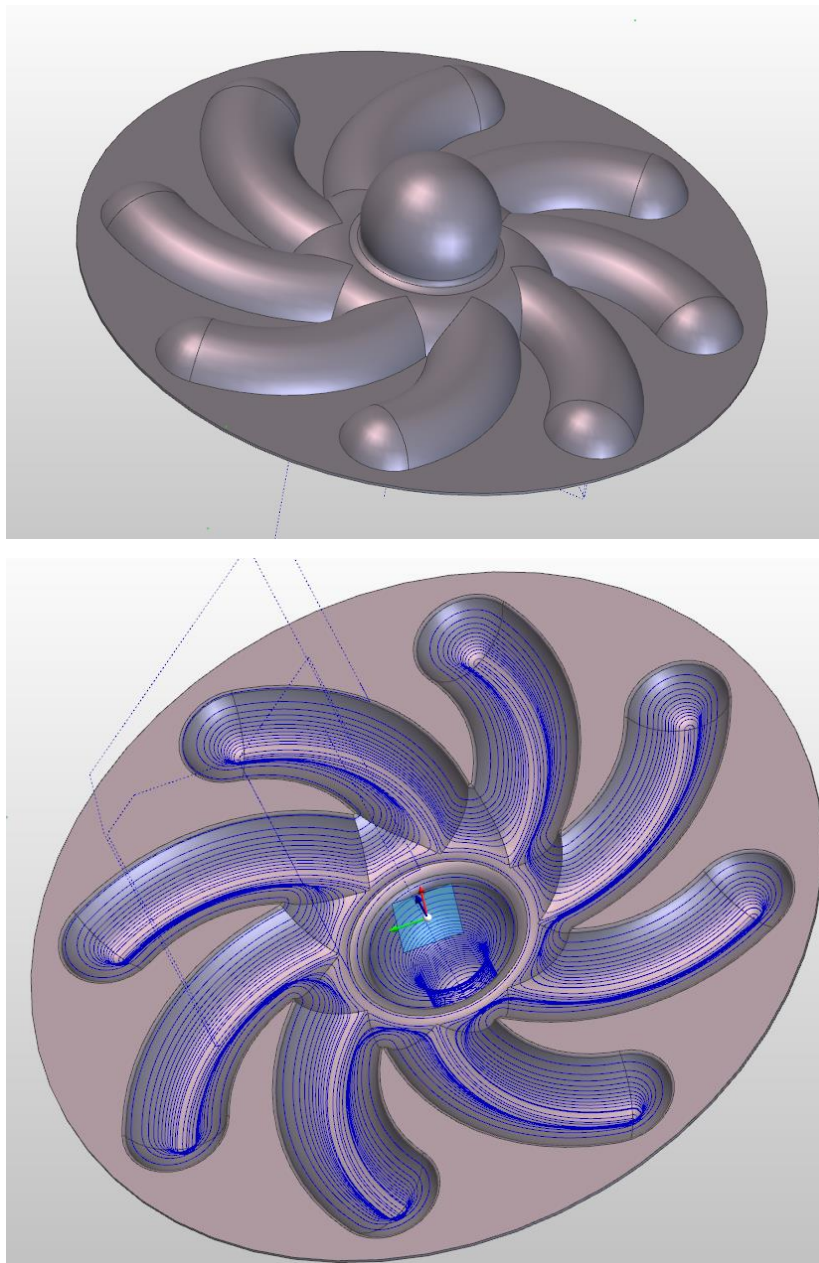
10. táblázat: Falvastagsági mérési eredmények és azokból számított átlag és szórás [mm]

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	átlag	szórás
a	0,314	0,344	0,333	0,342	0,324	0,319	0,329	0,012
b	0,306	0,329	0,310	0,320	0,312	0,305	0,314	0,009
c	0,273	0,319	0,290	0,307	0,297	0,289	0,296	0,016

A mérési eredmények mm-ben értendők. A kiinduló lemez vastagság (s_0) 0,5 [mm] volt. A mérési eredményeket és azokból számított átlagot és szórást a 10. táblázat reprezentálja. A mérési eredmények tovább igazolták végeselemes modellezés PEEQ állapotát és a röntgenfelvételeket miszerint, hogy a munkadarab palást alsó része szenvedte el a legnagyobb alakváltozást mert ott volt a legvékonyabb a mért falvastagság az alakított munkadarabon.

8. Egy egyedi dekoratív alkatrész megtervezése, legyártása és kiértékelése

A dekoratív felhasználási területről eszembe jutott, hogy készítek egy polip kinézetűnek szánt alkatrészt. így hát megterveztem CAD-CAM technológiával, vagyis megrajzoltam CAD-ben és CAM szoftverben generáltam neki szerszámpályát. 58. ábra reprezentálja.



59. ábra Polip tervezése CAD-CAM technológiával

Az alakított munkadarabot 59. ábra reprezentálja, ahol megfigyelhető, hogy a polip csápjai nem mindenhol lettek megfelelő pontossággal kialakítva a csápok ívén mert nem használtam ellenbélyeget vagy matricát, ami megoldotta volna a precíz alakot. Továbbá megfigyelhető a szerszámpálya jellegzetes lenyomata.



60. ábra Alakított polip

9. Összefoglalás

Kijelenthető, hogy az egyedi hiperbola alkatrész 180 [mm] rádiusszal 80°-os alsó, illetve 30°-os felső érintővel legyártható 350 [mm/min] -el Haas Mini Mill Edu CNC vezérlésű marógépen, míg MSN-500 CNC vezérlésű marógépen akár 600 [mm/min] -el. A Haas Mini Mill Edu CNC vezérlésű marógéppel való inkrementális lemez alakítás a gép élettartamának érdekében maximum 560 [mm/min] -el érdemes dolgozni. Kenő anyagnak gépi olajat használtam, de megjegyzem azt is érdemes lenne megvizsgálni, hogy milyennel legérdekesebb dolgozni a viszkozitás szempontjából.

Az szerszámpálya adatátvitel az Abaqus szoftverbe is megvalósítható csak az Abaqus szoftverben a technológiai paraméterek és a szerszámpálya nem független egymástól, mint egy CAM rendszerben. Továbbá szükséges idő koordináta pontok bevitele az Abaqus szoftverbe a szimuláció sikeres lefuttatásához. Továbbá az is, hogy ez a típusú alkatrész alsó palást része szenved a legnagyobb alakváltozást és ott vékonyodik el a legjobban a lemez anyaga. A palást alsó részén a fenékrészhez közeli részt értem.

Egy dekoratív egyedi összetett, azaz konkáv és konvex geometriával rendelkező alkatrész esetében érdemes kétpontos inkrementális alakítással elvégezni annak alakítását a precíz pontos eredményes kívánt munkadarab eléréséhez. Amennyiben nem áll rendelkezésre két komolyabb robot, amelyek szinkronban tudnak dolgozni akkor érdemes a matricás változatot alkalmazni azon belül is a részleges matricával történő alakítást a rugalmas és költséghatékony eljárást megcélózva

Véleményem szerint ez a technológia nagyobb figyelmet fog kapni az elkövetkezendő években az építő iparban azon belül is a belső építészeti burkolati elemek gyártására vonatkozóan emiatt további fejlesztések várhatóak e téren.

10. Summary

It can be stated that the unique hyperbola part with a radius of 180 [mm] with an 80° lower and a 30° upper tangent can be produced at 350 [mm/min] on a Haas Mini Mill Edu CNC-controlled milling machine, while on an MSN-500 CNC-controlled milling machine up to with 600 [mm/min]. Incremental plate shaping with the Haas Mini Mill Edu CNC-controlled milling machine should work at a maximum speed of 560 [mm/min] for the sake of the machine's service life. I used machine oil as a lubricant, but I would also like to note that it would also be worth investigating what kind of work is most worthwhile in terms of viscosity.

Data transfer of the tool path to the Abaqus software can also be implemented, only in the Abaqus software the technological parameters and the tool path are not independent of each other, as in a CAM system. Furthermore, it is necessary to enter time coordinate points into the Abaqus software to run the simulation successfully. Furthermore, the lower part of this type of component undergoes the greatest deformation and the material of the plate thins the most there. In the lower part of the robe, I mean the part close to the bottom.

In the case of a decorative unique complex part, i.e. with a concave and convex geometry, it is worthwhile to perform its shaping with two-point incremental shaping in order to achieve the desired precise and effective workpiece. If two serious robots that can work synchronously are not available, then it is worth using the sticker version, including the partial sculpting with stickers, aiming for a flexible and cost-effective process.

In my opinion, this technology will receive more attention in the coming years in the construction industry, including to produce internal architectural cladding elements, therefore further developments are expected in this field.

11. Ábrajegyzék

1. ÁBRA SEMATIKUS ÁBRA MÉLYHÚZÁSI ELJÁRÁSOKRÓL -----	7
2. ÁBRA MÉLYHÚZÁS KÖZBEN VÉGBEMENŐ RÁNCOSODÁS ÉS ALAKVÁLTOZÁS ILLUSZTRÁLÁSA -----	8
3. ÁBRA MÉLYHÚZÁSSAL ELŐÁLLÍTOTT TERMÉKEK [3] -----	9
4. ÁBRA INKREMENTÁLIS LEMEZ ALAKÍTÁS SEMATIKUS VÁZLATA [4] -----	10
5. ÁBRA INKREMENTÁLIS LEMEZ ALAKÍTÁSI SZERSZÁMPÁLYA [5] -----	10
6. ÁBRA EGY ÉS KÉTPONTOS INKREMENTÁLIS ALAKÍTÁS VÁLTOZATAI [7] -----	11
7. ÁBRA EMBERI KOPONYAGYÁRTÁS REVERSE ENGINEERING ALKALMAZÁSÁVAL [9] -----	12
8. ÁBRA NISSAN UTÁN GYÁRTOTT AUTÓ ALKATRÉSZEK GYÁRTÁSA EGYPONTOS INKREMENTÁLIS LEMEZ ALAKÍTÁS ELLENBÉLYEGES VÁLTOZATÁVAL -----	14
9. ÁBRA NISSAN UTÁN GYÁRTOTT AUTÓ ALKATRÉSZEK ALAKÍTÁSI FOLYAMATA -----	14
10. ÁBRA NISSAN ÁLTAL HASZNÁLT ALAKÍTÓ SZERSZÁMOK -----	14
11. ÁBRA ÉPÜLET BURKOLÓ ELEMEEK -----	15
12. ÁBRA ALAKÍTOTT FIGURA -----	15
13. ÁBRA ERICHSEN - FÉLE MÉLYÍTŐ PRÓBA -----	16
13. ÁBRA ALKALMAZOTT KÉSZÜLÉKEZÉS ÉS SZERSZÁMOZÁS -----	17
14. ÁBRA KÍSÉRLETI MUNKADARABOK GYÁRTÁSA EZEKEL A GÉPEKKEL TÖRTÉNTÉK -----	18
15. ÁBRA KÍSÉRLETI MUNKADARAB GEOMETRIÁJA -----	18
16. ÁBRA Z-LEVEL OKOZTA LENYOMAT -----	19
17. ÁBRA 45° -OS GEOMETRIÁJÚ TÖLCSÉR -----	19
18. ÁBRA PROGRAM MEGÍRÁSA ÉS LEFUTTATÁSA -----	20
19. ÁBRA LEGENERÁLT VEKTOR KOORDINÁTÁK PONTOK -----	20
20. ÁBRA SIKERESEN LEGENERÁLT SZERSZÁMPÁLYA -----	21
21. ÁBRA MATLAB SZERSZÁMPÁLYÁVAL ALAKÍTOTT MUNKADARAB -----	23
22. ÁBRA EDGE CAM ÁLTAL LEGYÁRTOTT MUNKADARAB -----	24
23. ÁBRA ELSŐ KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	27
24. ÁBRA MÁSODIK KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	28
25. ÁBRA HARMADIK KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	29
26. ÁBRA NEGYEDIK KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	30
27. ÁBRA MÓDOSÍTOTT ALKATRÉSZ MŰSZAKI RAJZA -----	31
28. ÁBRA HATODIK KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	31
29. ÁBRA HETEDIK KÍSÉRLETI MUNKADARAB -----	32
30. ÁBRA LEMEZ ANYAG TULAJDONSÁGAINAK BEVITELE -----	33
31. ÁBRA KIINDULÓ LEMEZ VASTAGSÁG BEVITELE -----	34

32. ÁBRA ELEMÉK ÖSSZESZERELÉSE	35
33. ÁBRA SKÁLÁZÁSI LÉPTÉKEK BEÁLLÍTÁSA	35
34. ÁBRA SÚRLÓDÁSI EGYÜTTHATÓ BEÁLLÍTÁSA	36
35. ÁBRA ÉRINTKEZÉSI TULAJDONSÁGOK BEÁLLÍTÁSA	36
36. ÁBRA MECHANIKAI KÉNYSZEREK	36
37. ÁBRA HATÁRFELTÉTELEK BEÁLLÍTÁSA	37
38. ÁBRA MEGÍRT PROGRAM AZ IDŐ KOORDINÁTA PONTOK LEGENERÁLÁSÁHOZ	39
39. ÁBRA LEGENERÁLT IDŐ KOORDINÁTA PONTOK	40
40. ÁBRA SZERSZÁM FORGÓ MOZGÁSÁNAK BEÁLLÍTÁSA	40
41. ÁBRA FÜGGVÉNYEK BEVITELE	42
42. ÁBRA LEMEZ HÁLÓ MINTA BEÁLLÍTÁSA	42
43. ÁBRA LEMEZ HÁLÓ SŰRŰSÉG BEÁLLÍTÁSA	43
44. ÁBRA BEÁLLÍTÁS UTÁNI LEMEZ HÁLÓ SŰRŰSÉG	43
45. ÁBRA DOLGOZÓ PROCESSZOR MAGOK SZÁMÁNAK BEÁLLÍTÁSA	44
46. ÁBRA FUTTATÁS NYOMON KÖVETÉSE	44
47. ÁBRA HUBER–MISES–HENCKY FÉLE REDUKÁLT FESZÜLTSG	45
48. ÁBRA ELFELEZETT MUNKADARAB HUBER–MISES–HENCKY FÉLE REDUKÁLT FESZÜLTSG	45
49. ÁBRA TELJES MUNKADARAB EQUIVALENT PLASTIC STRAIN ÁLLAPOTA	46
50. ÁBRA ELFELEZETT MUNKADARAB EQUIVALENT PLASTIC STRAIN ÁLLAPOTA	46
51. ÁBRA JELLEGZETES HENGERLÉSI IRÁNY	47
52. ÁBRA Y.CHEETAH FXE-160.51 MULTIFOCUS X-RAY BERENDEZÉS	48
53. ÁBRA 2D-ÉS RÖNTGEN FELVÉTEL A KÍSÉRLETI MUNKADARABRÓL (A)	49
54. ÁBRA 2D-ÉS RÖNTGEN FELVÉTEL A KÍSÉRLETI MUNKADARABRÓL (B)	49
55. ÁBRA MÉRÉS SORÁN HASZNÁLT MIKROMÉTER	50
56. ÁBRA KETTÉVÁGOTT MUNKADARAB	50
57. ÁBRA MÉRÉSI PONTOK HELYE	51
58. ÁBRA POLIP TERVEZÉSE CAD-CAM TECHNOLOGIÁVAL	52
59. ÁBRA ALAKÍTOTT POLIP	53

12. Táblázatjegyzék

1. táblázat Kísérletben részt vevő eszközök paraméterei	17
2. táblázat Matlab szoftverben megírt program.....	21
3. táblázat G-kóddal kibővített program részlete	22
4. táblázat Jelmagyarázat az alkalmazott G-kódokhoz.....	23
5. táblázat Alkalmazott EN AW-1050A alumínium anyag tulajdonságok	34
6. táblázat Megírt Excel függvények a vektor koordináta pontok rendezéséhez	38
7. táblázat Részlet a vektor koordináta pontok rendezésének folyamatáról.....	38
8. táblázat Idő koordináta pontok legenerálásához szükséges megírt program...	39
9. táblázat Részlet a három darab út-idő függvény koordináta adatokból.....	41
10. táblázat Falvastagsági mérési eredmények és azokból számított átlag és szórás	51

13. Források

[1] VUKOTA BOLJANOVIC: SHEET METAL FORMING PROCESSES AND DIE DESIGN. Industrial Press. Inc. New York, 2004. p. 69

[2] Dr. Balogh András – Dr. Schäffer József – Dr. Tisza Miklós: MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁK. Miskolci Egyetem. Miskolc, 2007. p. 131

[3] Irthia, Ihsan Khalaf: Process analysis and design in micro deep drawing utilizing a flexible die. Glasgow, 2014. p. 11

[4] ŽABA Krzysztof, Głodzik Marcin, Puchlerska Sandra, Pocięcha Danie, Nowosielski Maciej, Kwiatkowski Michał: Analysis of the Aluminium Formability in the Incremental Sheet Forming. Process. Brno, Czech Republic, 2015. {https://www.researchgate.net/publication/294260749_Analysis_of_the_aluminium_formability_In_the_incremental_sheet_forming_process}

[5] Erika Salema, Jaekwang Shin, Maya Nath, Mihaela Banu, Alan I. Taub: Investigation of Thickness Variation in Single Point Incremental Forming. Ann Arbor, Michigan, U.S.A, 2016. {<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916300804>}

[6] Dr. Tisza Miklós, Dr. Kiss Antal, Kovács Péter Zoltán: Innovatív alakító eljárások. 2013. p. 32-33.

[7] Ajay Kumar, Vishal Gulati, Parveen Kumar: Investigation of Surface Roughness in Incremental Sheet Forming. (a) Hisar India, (b) Haryana India, 2018. {<https://sci-hub.se/10.1016/j.procs.2018.07.074>}

- [8] Pankaj Kailasrao Bhoyar, Atul Bhaskarrao Borade: The use of single point incremental forming for customized implants of unicondylar knee arthroplasty: a review. India, 2015. {<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1590/2446-4740.0705>}
- [9] Lucian Blaga: A brief review of manufacturing medical implants by single point incremental forming. Románia, 2018. {<https://sciendo.com/downloadpdf/journals/aucts/70/1/article-p15.pdf>}
- [10] Koji Okuda, Azusa Momose: Nissan teaches robots to make replacement parts for cars. YOKOHAMA, Japán, 2019 {<https://global.nissannews.com/en/releases/191002-01-e>}
- [11] Dr. Horváth László: Mélyhúzás lemezanyagai és minősítési módszereik. Óbudai Egyetem. Budapest, 2009. p. 5.
- [12] Dr. Sipos Sándor – Dr. Palásti-Kovács Béla – Horváth Richárd: Forgácsoló technológiák és szerszámai. Óbudai Egyetem. Budapest, 2015. p. 253.
- [13] Dr. Sipos Sándor – Dr. Palásti-Kovács Béla – Horváth Richárd: Forgácsoló technológiák és szerszámai. Óbudai Egyetem. Budapest, 2015. p. 254.
- [14] Dr. Sipos Sándor – Dr. Palásti-Kovács Béla – Horváth Richárd: Forgácsoló technológiák és szerszámai. Óbudai Egyetem. Budapest, 2015. p. 276.
- [15] K. Spranghers, I. Vasilakos, D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme: Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions. Belgium, 2012. {<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.10.014>}