

BALOGH DOMONKOS
TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK



TDK DOLGOZATOK

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BALOGH DOMONKOS

TDK DOLGOZAT

A többlépéses pályatervezési stratégiák kísérleti vizsgálata
egyponthos inkrementális lemezalakításnál

Konzulens:

Dr. Jacsó Ádám
adjunktus

Budapest, 2024

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Balogh Domonkos* (VKLSE8), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024.11.05.

Balogh Domonkos

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	2
1. Bevezetés.....	3
2. Az inkrementális lemezalakítási technológia	4
2.1. Az inkrementális lemezalakítás különböző módszerei.....	5
2.2. Az egy pontos inkrementális lemezalakítás.....	7
2.2.1. Kutatások a munkadarab geometria pontosságával kapcsolatban	8
2.2.2. Kutatások az alakíthatósági határral kapcsolatban	11
2.3. Következtetések az irodalomkutatásból.....	13
3. Pályatervezés a megmunkálásokhoz	14
3.1. Egy- és többlépéses, kúpfelületen haladó spirál pálya.....	14
3.1.1. A csonkakúp felületének definiálása	14
3.1.2. A térbeli sugárkorrekció kiszámítása	16
3.1.3. Spirálpálya definiálása	21
3.1.4. A pálya G kódjának előállítása	24
3.2. Sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia	25
3.2.1. A pálya XZ síkbeli leírása	25
3.2.2. A pálya G-kódjának elkészítése	28
4. Alakítási kísérletek, eredmények	29
4.1. Kísérlet körülményei és megfigyelések	29
4.2. Előkísérletek és eredményeik.....	30
4.2.1. Erőmérések eredményei	32
4.2.2. A rezgésmérések eredményei	37
4.3. Az első többlépéses alakítási kísérletek	38
4.3.1. Az első többlépéses stratégia erőmérésének eredményei.....	39
4.4. A sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia kísérleti eredményei	40
4.4.1. A stratégia erőmérési eredményei.....	41
5. Összefoglalás.....	43
6. Felhasznált források	44
7. Summary	47

ELŐSZÓ

Az inkrementális lemezalakítás egy újfajta megmunkálási módszer, amely során a hagyományos képlékeny alakító eljárásokkal ellentétben nem az előgyártmány egyedi matricára történő préselése, így annak geometriája, hanem egy univerzális szerszám (bélyeg) pályája hozza létre a kialakuló geometriát. Ennek egy fajtája az egyponthoz inkrementális lemezalakítás, amely során az egyetlen alakító szerszámot egy előre definiált pályán mozgatja általában egy CNC megmunkáló központ vagy robotkar. A megmunkálás során a forgó szerszámmal spirális pályákon haladva fokozatosan alakítják ki a munkadarabot. A szerszám gyakran félgömb, vagy lekerekített henger végződésű formázó bélyeg. Az egyponthoz inkrementális lemezalakításhoz kapcsolódó kutatások elsősorban a geometriai hibákat és az alakíthatósági határokat vizsgálják. A technológia alkalmazásának egyik legfontosabb korlátja ugyanis az, hogy a munkadarab falának elvékonyodása miatt a fal elszakad, ha a célgeometria fala túl meredek. Ezt a jelenséget úgy nevezik, hogy a lemez elérte az alakíthatósági határát. Az alakíthatósági határ jellemzésére a kialakítható alkatrész falának meredekségét használják. Az eddigi kutatások kimutatták, hogy ez a határ megnövelhető, ha nem egy lépésben alakítják ki a célformát, hanem a szerszámot ismételtén végig mozgatják a már részben elkészült munkadarab felületén. Ezt az eljárást többlépéses inkrementális lemezalakításnak hívják. A munkám célja, hogy megvizsgáljam a többlépéses stratégiák különböző megmunkálási pályáinak hatékonyságát az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag.

* * *

Szeretnék köszönetet nyilvánítani a konzulensemnek, Jacsó Ádámnak a szakmai támogatásért, a dolgozatom többszöri átnézéséért és a kísérletek elvégzésében tett segítségért a dolgozat megírása során. Továbbá szeretnék köszönetet nyilvánítani Tanácsa Viktornak a további kísérletek elvégzésében tett segítségért, és Bíró Istvánnak az erőmérő szoftver elkészítéséért.

Budapest, 2024.11.09.

Balogh Domonkos

1. BEVEZETÉS

Az inkrementális lemezalakítás népszerűsége jelentősen megnövekedett az utóbbi néhány évtizedben [1]. Ennek oka, hogy a megmunkálás nem igényel speciális, kizárólagosan egyfajta munkadarabhoz tartozó célszerszámot, így az egyedi gyártásban lényegesen költséghatékonyabbnak bizonyulhat a hagyományos lemezalakító technológiákhoz képest [1] [2]. Mivel egyedi szerszámot nem igényel a technológia, így a különféle munkadarabok megmunkálását az egyedi szerszámpályák teszik lehetővé. Ebben a technológiának a legfőbb kihívása ezért a szerszámpályák tervezése.

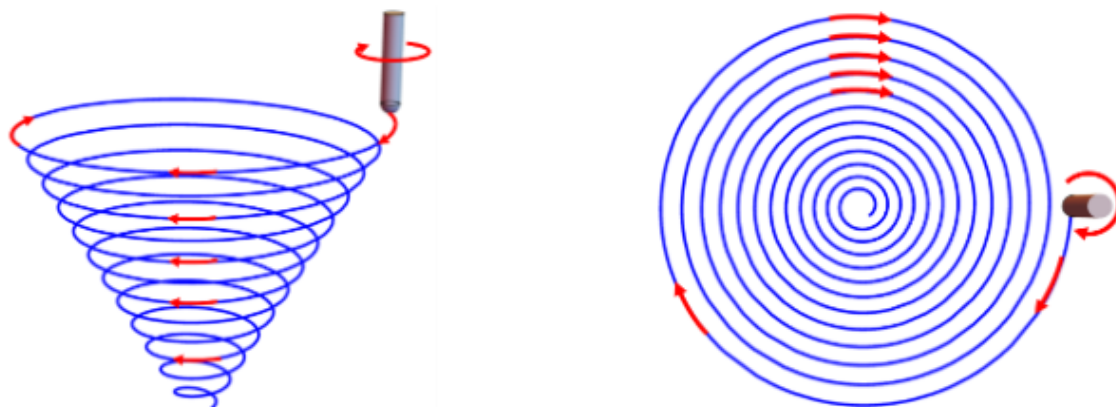
Az egyponthoz inkrementális lemezalakításhoz kapcsolódó kutatások elsősorban a geometriai hibákat és az alakíthatósági határokat vizsgálják [3]. A technológia alkalmazásának egyik legfontosabb korlátja ugyanis az, hogy a munkadarab falának elvékonyodása miatt a fal elszakad, ha a célgeometria fala túl meredek [4]. Ezt a jelenséget úgy nevezik, hogy a lemez elérte az alakíthatósági határát [5]. Az alakíthatósági határ jellemzésére a kialakítható alkatrész falának meredekségét használják. Az eddigi kutatások kimutatták, hogy ez a határ megnövelhető, ha nem egy lépésben alakítják ki a célformát, hanem a szerszámot ismételten végig mozgatják a már részben elkészült munkadarab felületén [6]. Ezt az eljárást többlépéses inkrementális lemezalakításnak hívják. A munkám célja, hogy megvizsgáljam a többlépéses stratégiák különböző megmunkálási pályáinak hatékonyságát az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag.

A kutatásom fő célja az egyponthoz inkrementális lemezalakítás alakíthatósági határainak kibővítése volt különböző pályatervezési stratégiák alkalmazásával. Ennek érdekében részletesen ki kellett dolgozzam a különböző megmunkálási pályák matematikai modelljeit, majd a különböző pálya paraméterek változtatása mellett megvizsgáltam azok gyakorlati alkalmazhatóságát. A pályák sikerességét a megmunkálási kísérletek elvégzése után értékeltem az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag.

A dolgozat 2. fejezetében ismertetem az inkrementális lemezalakítás különböző módszereit, majd bemutatom az általam használt technológiának általános jellemzőit. A 3. fejezetben olvasható a feladatom során használt matematikai számítások részletesebb dokumentációja. A fejezet végén a különböző kidolgozott pályagenerálási stratégiákat mutatom be. A 4. fejezetben ismertetem a kísérletek körülményeit és eredményeit, majd végül az 5. fejezetben összefoglalom a munkámat.

2. AZ INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁSI TECHNOLOGIA

Az inkrementális lemezalakítás egy újfajta megmunkálási módszer, amely során a hagyományos képlékeny alakító eljárásokkal ellentétben nem az előgyártmány egyedi matricára történő préselése, így annak geometriája, hanem egy univerzális szerszám (bélyeg) pályája hozza létre a kialakuló geometriát [2] [7]. A megmunkálás során a forgó szerszámmal általában spirális pályákon haladva fokozatosan kialakítják a munkadarabot [8]. Erre egy példát lehet látni az 1. ábrán. A szerszám forgatásának oka az, hogy a kinetikus súrlódási tényező kisebb, mint a statikus súrlódási tényező, ami kisebb súrlódási erőt eredményez, kímélve ezzel a munkadarabot és a szerszámot is. A szerszám gyakran félgömb végű, vagy egy kúpos szerszámtest végére helyezett csapágyazott golyó [9], ritkábban lekerekített henger végződésű formázó bélyeg.



1. ábra: Példa a spirális szerszámpálya alkalmazására az inkrementális lemezalakítás során [10]

A hagyományos képlékeny alakító technológiákkal ellentétben a megmunkáláshoz nem feltétlenül szükséges ellenforma alkalmazása, ezért kis sorozatszámú és egyedi alkatrészek gyártására gazdaságosabb lehet a korábbi technológiákhoz képest [3]. Szintén az inkrementális alakítás előnye a korábbi technológiákhoz képest, hogy az alakító erők lényegesen kisebbek a szerszám hosszú pályája miatt [11]. A technológia hátránya, hogy az alakítási folyamat jelentősen lassabb a hosszabb szerszámpályák alkalmazásának következtében.

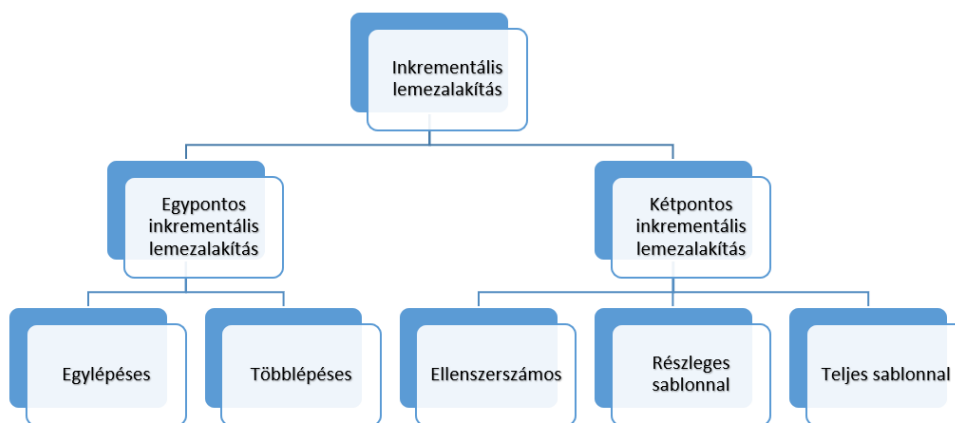
Az inkrementális lemezalakítás alkalmazása során a gyártandó geometria egyértelműen meghatározza az univerzális szerszám (bélyeg) pályáját. Ennek során az alakító szerszámot egy előre definiált pályán mozgatja általában egy CNC megmunkáló központ, vagy robotkar [2] [1]. A CNC megmunkáló központok használatának okát a pálya könnyű generálása CAM szoftverekkel, továbbá a gép merevsége adja [11]. Készültek azonban inkrementális alakító gépek is kifejezetten erre a célra, amik nagyobb megmunkálási erők kifejtésére képesek [11]. A robotok használatának oka a több szabadságfok a CNC szerszámgépekhez hasonlítva, azonban ezek kevésbé merevek, ami

kisebb pályakövetési pontosságot eredményez, ez pedig végül a munkadarab geometriai hibáját vonja maga után.

A szerszám és a munkadarab kenését a megmunkálás során folyamatosan biztosítani kell. Ez történhet többek között szánkenő olaj vagy gépszír használatával. A nem elégséges kenés a munkadarab és a szerszám megnövekedett kopását, valamint azok felmelegedését és akár a lemez szakadását is okozhatják, erre kifejezetten hajlamosak a különböző alumínium és titán ötvözetek [11]. Szintén rendkívül fontos következménye a kenésnek, hogy a szerszám és a felület között érvényes csúszási súrlódási tényezőt jelentősen lecsökkenti. Jobb kenés esetén a súrlódási tényező kisebb, ami kisebb súrlódási erőt eredményez.

2.1. Az inkrementális lemezalakítás különböző módszerei

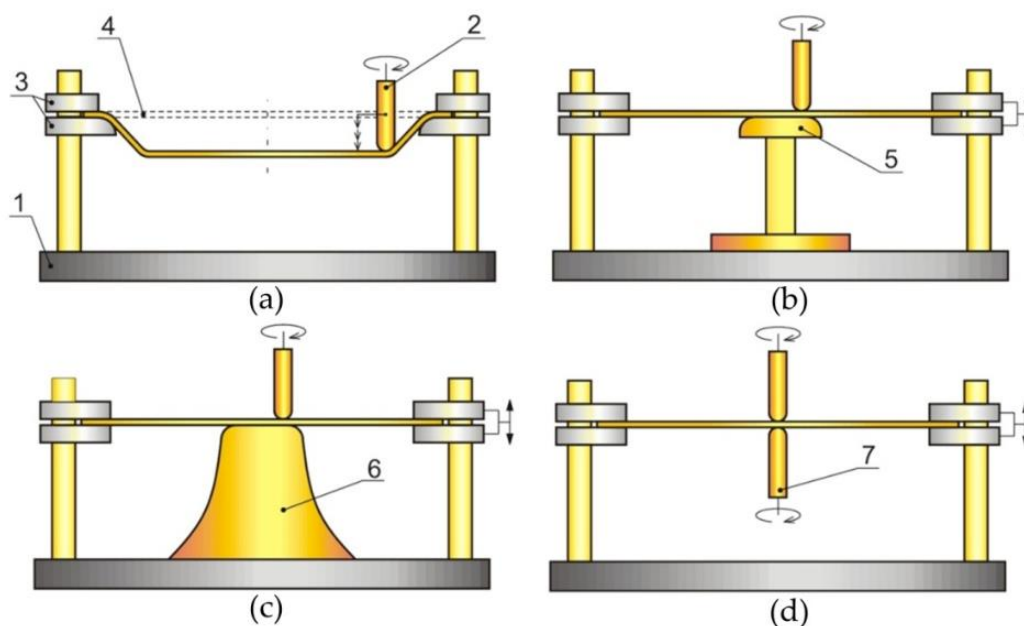
Az inkrementális lemezalakításnak két fő csoportra osztható: az egyponthoz inkrementális lemezalakítás és a kétpontos inkrementális lemezalakítás [10] [11].



2. ábra: Inkrementális lemezalakítás technológiái [11]

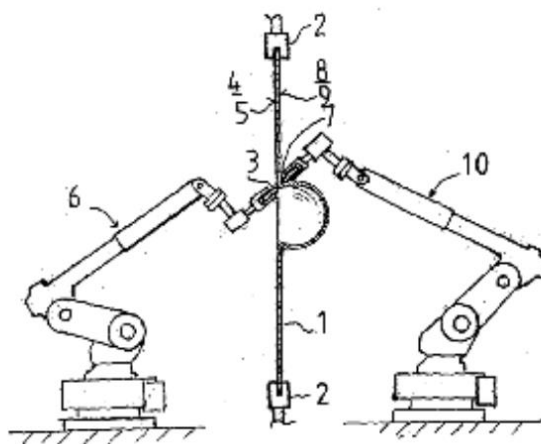
Az egyponthoz technológia esetében egyetlen szerszám mozgásával alakítják ki az elérendő célgeometriát. Ebben az esetben a munkadarab nem rendelkezik semmilyen megtámasztással, így a lemez túlzott benyomása a szerszámmal a munkadarab elszakadását eredményezheti. Emellett jelentősen pontatlanabb az elkészült munkadarab geometriája a kétpontos lemezalakításokhoz képest. Az egyponthoz technológia vázlata a 3./a ábrán látható.

A kétpontos alakítás esetében a lemez meg van támasztva az alakító szerszámmal ellentétes oldalon is. Ennek a megtámasztásnak többféle módja van. A különböző módszerek összefoglalása a 2. ábrán látható. A kétpontos alakítás előnye, hogy a kialakított munkadarab geometriája pontosabb, hátránya viszont, hogy drágább a bonyolultabb gyártási folyamat miatt [12].



3. ábra: A főbb inkrementális lemezalakító technológiák vázlata [11]

Az egyik módszer ellenszerszám használatával történik. Ekkor a lemez mindkét oldalát nyomja egymással szemben két szerszám [8]. Mindkét szerszám egy előre meghatározott pályán van vezérelve. Ebben a technológiai változatban sokszor használnak ipari robotokat. A robotok hátrányának számító kisebb merevség azonban itt is jelentkezik [8]. Ehhez a módszerhez sorolható az a technológiai változat, ahol a két vezérelt szerszám a lemez két ellentétes oldalán halad, azonban nincsenek egy vonalban, így a hajlítást jobban összpontosítják egy pontba a hatékonyabb és pontosabb lemezalakítás érdekében [13] [14]. Ezen módszer az ipari robotos megvalósítása a 4. ábrán, a szerszámok elhelyezkedése, illetve a készülék vázlata pedig a 3./d ábrán látható.



4. ábra: Kétpontos inkrementális lemezalakítás megvalósítása ipari robotokkal [8]

Másik módszer alkalmazása során részleges sablonnal alátámasztják a lemez egy részét [11]. Ekkor a munkadarabot befogó készülék is mozgatható a szerszám mozgás-

A munkám során az egyponτος inkrementális lemezalakítással foglalkoztam, ezért a következő fejezetben részletesebben is ismertetem ezt a technológiát.

Az egyponthos lemezalakításra elsősorban három tengelyes CNC megmunkáló központokat, ritkább esetben ipari robotokat használnak. Az inkrementális lemezalakítással foglalkozó kutatások elsősorban az egyponthos lemezalakítást vizsgálják. A szerzők ebben az esetben is általában félgömb végű vagy csapágyazott golyó végű formázó béliyeg. A szakirodalomban a kialakítandó munkadarab az esetek többségében egy lefelé keskenyedő csonkakúp vagy egy fokozatosan meredekebb oldalfalú forgásfelület [7]. A pálya alakja általában ebben az esetben is kúpfelületen haladó térbeli spirál, azonban érdekességként megemlítenélő, hogy történt próbálkozás tisztán radiális, keringés nélküli pályájú megmunkálási kísérlet is [15]. Ekkor azonban a szakaszos egyenes menti mozgás miatt a kész munkadarab palástjának geometriai hibája szembevetűnő. Az alakítási folyamat legfontosabb paraméterei az előgyártmány lemez vastagsága, a szerszám átmérője, a főorsó fordulatszám és a spirálpálya különböző keringései közötti z távolság, utóbbit a továbbiakban Δz -vel jelölöm és mértékegysége mm-ben értendő [1] [16]. Az egyponthos inkrementális lemezalakítás vázlata az alábbi ábrán látható a legfontosabb technológiai paraméterekkel együtt.



A kutatások többnyire két főbb csoportba oszthatók: a munkadarab geometriai pontosság vizsgálatával és fejlesztésével foglalkozók és az alakíthatósági határ kibővítésével foglalkozók. A bemutatott kutatásokat is ezen két halmazba fogom csoportosítani.

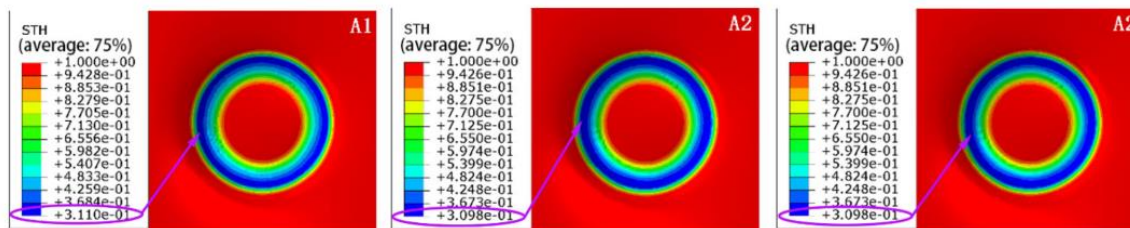
2.2.1. KUTATÁSOK A MUNKADARAB GEOMETRIA PONTOSSÁGÁVAL KAPCSOLATBAN

Az egyponthoz inkrementális lemezalakítás során a munkadarab nincs megtámasztva a befogó készüléken kívül egyéb eszközzel, ezért a kész gyártmány geometriai pontossága a kétpontos alakítási technológiákhoz képest rosszabb és a kialakítható geometria bonyolultsági foka is kisebb [12]. A megtámasztás hiánya miatt ennek a technológiának az alkalmazása során kizárólag a pályatervezés megváltoztatásával érhető el pontosabb geometriájú késztermék. Az egylépéses inkrementális lemezalakítás során azt a felületet, amin a szerszámpálya végig kell haladjon egyértelműen meghatározza a munkadarab geometriája. Ebben az esetben lehet változtatni a különböző pályatervezési paramétereket, de a felület változatlan kell maradjon.

Az alakíthatósági határ kibővítése céljából többlépéses inkrementális lemezalakítást használnak [5]. Ekkor az a felület, amin a szerszám halad, az utolsó lépése kivételével nem azonos a kialakítandó geometria felszínével. A szakirodalomban különböző többlépéses pályatervezési stratégiákat dolgoztak ki, amikben számos kutatás során egy lépcsőzetes hiba jött létre a munkadarab alján [17]. A későbbiekben látható lesz, hogy ez a fajta geometriai hiba a saját kutatásom során is létrejött. Ennek a hibának a minimalizálására többféle pályatervezési stratégia létezik, amelyek a folytatásban bemutatásra is kerülnek. Emellett a célgeometriai alsó felületén kívüli pontosság javítására is léteznek szakirodalomban ismertett megoldások.

C. Su és társai kutatásának célja a többlépéses inkrementális lemezalakító stratégiák különböző paraméterű pályáinak összehasonlítása volt a munkadarab geometriai hibái alapján [17]. A kialakítandó munkadarab egy csonkakúp volt. Megvizsgálták olyan pályá- és megmunkálási paraméterek hatását, mint az axiális kompenzáció, radiális kompenzáció, változó oldalfal ferdeség paraméter és szerszám átmérő. Ezekből 3 kísérletből álló csoportokat hoztak létre, majd a kísérletek után a munkadarabokat kettévágták a függőleges szimmetria síkja mentén, majd a 7 mérési pont helyének definiálása után megmérték a kialakított geometria falvastagságát a megadott pontokban. Kimutatták kísérleteikkel, hogy a többlépéses alakítások során kialakulhat a munkadarab alján egy úgynevezett lépcsőzetes hiba. Az axiális kompenzáció eredménye az lett, hogy a kompenzáció értékét növelve a munkadarab minimális vastagsága csökken, emellett a geometriai hiba az alsó felszínen szintén csökken. A radiális kompenzáció eredményéül a minimum falvastagság szintén csökkent, miközben a lépcsőzetes hiba is növekedett. Másik csoportosításuk során kísérleteztek az első lépés és az utolsó lépés közötti oldalfal ferdeség közötti szög különbség különböző szétosztásában a lépések között. Három kísérletet végeztek el ezzel a céllal. Ezen kísérletekhez tartozó szilárdságtani végelelem módszeres szimulációk eredményei a 6. ábrán láthatóak. Az

első lépés oldalfal ferdesége minhárom kísérlet során 55° volt, valamint az utolsó lépés -azaz a célgeometria- oldalfal ferdesége szintén változatlanul 75° volt. Az ezek közötti 20°-os szöghelyettesítést az A1-es kísérletben 55°-60°-75°-ként, az A2-es kísérletben 55°-65°-75°-ként, az A3-mas kísérletben pedig 55°-70°-75°-ként osztották fel.



6. ábra: Különböző oldalfal ferdeség felosztásokkal végzett kísérletek szimulációja [17]

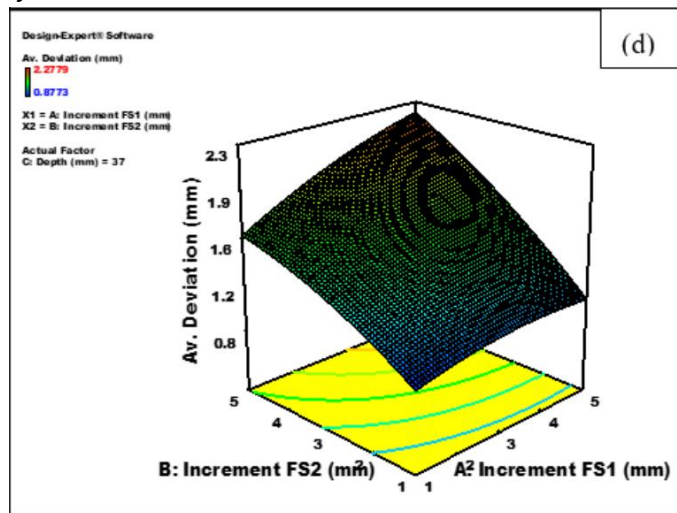
Ezekkel a kísérletekkel kimutatták C. Su és társai, hogy a különböző megmunkálási lépések közötti oldalfal ferdeség különbség lépésekre osztásának nincs szignifikáns hatása a fal elvékonyodására. A 6. ábrán végeselemes szilárdságtani szimuláció eredményei láthatóak, de ezek kellően pontosak voltak a valós mérésekkel összehasonlítva. Ez az 1. táblázatban látható. Kiderült a kutatásaikból, hogy az axiális kompenzáció elvékonyítja a geometria falát a csomópont alsó körlapjának szélén. Szintén az axiális kompenzáció vizsgálata rámutatott arra, hogy a munkadarab az alsó kör szélén hajlamos elszakadni.

1. táblázat: Különböző oldalfal ferdeség felosztásokkal végzett kísérletek mérési adatai [17]

Kísérleti csoport	Mérési pont	Szimulált falvastagság (mm)	Mért falvastagság (mm)	Hiba (%)
A1	1	0.982	0.987	0.6
	2	0.724	0.764	5.5
	3	0.369	0.351	4.9
A2	1	0.981	0.957	2.4
	2	0.752	0.807	7.3
	3	0.393	0.411	4.6
A3	1	0.980	0.943	3.8
	2	0.744	0.697	6.3
	3	0.370	0.404	9.4

Z. Yan és társainak kutatása a kétlépéses lemezalakítás technológia alakítási idejének és geometriai hibáinak optimalizálását tűzték ki célul [18]. A kutatás során használtak végeselem módszert az alakítás szilárdságtani szimulációira, majd ezt validálták is kísérleteikkel. Az eredményeik azt mutatták, hogy az első lépés spirálpályájának meredeksége - későbbiekben Δz [mm] - nem volt szignifikáns hatással a geometriai hibákra, azonban a második -és egyben utolsó- lépés során alkalmazott paraméter viszont jelentősen befolyásolta azt. A Δz hatását alaposan elemezték a megmunkálási időre vonatkozólag is. Ezekkel meghatároztak egy optimális Δz -t kétlépéses alakítás esetére.

Az eredményeik: $\Delta z_1 = 4,5 \text{ mm}$ és $\Delta z_2 = 1,6 \text{ mm}$ és $h = 39 \text{ mm}$. Ez optimális volt a munkadarab geometriai pontosságára és a megmunkálási időre vonatkozólag, eközben a lemez elvékonyodása szinte változatlan maradt.



7. ábra: Δz hatása a geometriai hibákra kétlépéses alakítás során [18]

H. K. Nirala és társai munkájának célja egy megmunkálási stratégia kifejlesztése volt, ami megakadályozza a többlépéses stratégiák során gyakran kialakuló lépcsőzetes hibákat, továbbá a hiba okának feltárása volt [3]. Ehhez használtak végeselemes szimulációt és kísérleteket is. Szerintük a lépcsőzetes hiba oka az, hogyha csak kívülről befelé típusú megmunkálással dolgozunk, akkor mindig ugyan olyan mélyre gyúri az anyagot a szerszám, és nem viszi vissza a maradék anyagot fölfelé belülről-kifelé típusú pályákkal. Ezt úgy magyarázták, hogy a szerszám csak a munkadarab alján mozog alakítás közben és egyszer sem halad végig újra a kúp palást felületén. A kutatás során kidolgoztak egy összesen hat lépésből álló stratégiát. Az első öt lépés négy, fokozatosan növekedő oldalfal ferdeségű csonkakúp kialakítását jelenti, míg az ötödik lépés már a kész munkadarab felületét alakítja ki. Az utolsó lépés során a szerszám a csonkakúp alsó alapkörén halad egy sík spirál pályán a munkadarab szimmetriatengelyéből a kúp oldalfaláig. Az utolsó lépés célja az előző öt lépés során kialakult lépcsőzetes hiba kijavítása volt. Ez sikeresnek bizonyult. A kutatásuk eredményeül azt kapták, hogy a minél több lépésből álló stratégiák minimalizálják a lépcsőzetes hiba mértékét, míg a csonkakúp alsó körfelületén végzett sík spirális megmunkálás teljesen eltünteti azt. Ezen kutatás szerint nem okoz szignifikáns különbséget a falvastagság eloszlásában az általuk kidolgozott stratégia, mivel a szerszám többször nem érinti a kúp palástját az alsó felületen végzett sík spirális megmunkálás közben. A következő kutatásban a lépcsőzetes hibák kialakulásának matematikai modelljét készítették el és azt használták a hiba kialakulását minimalizáló pályagenerálási algoritmus kifejlesztésére.

Szintén a lépcsőzetes hibák kialakulásának megakadályozása érdekében végezte a kutatását E. Ndip-Agbor. Ő definiálta a hibák kialakulásának geometriai és matematikai

modelljeit [19]. Megállapította, hogy a hibák kialakulásának oka az úgynevezett szilárdtest mozgás. A matematikai modell felépítése során definiálta a n -edik és az $n+1$ -edik lépés közötti szilárdtest mozgást, amihez kiszámította a szerszám és a munkadarab érintkező térfogatának szükséges értékeit. Végül létrehozott egy pályatervező algoritmust, amibe a matematikai modellt alkalmazta. A modelljének validálása során összehasonlította a modell által becsült szilárdtest mozgást és az alakítás után valós szilárdtest mozgást. A modell becslésének relatív hibája a 3 elvégzett kísérlete során 41%, 107% és 189% volt. A nagy relatív hibákat a lemez visszarugózásával magyarázta.

2.2.2. KUTATÁSOK AZ ALAKÍTHATÓSÁGI HATÁRRAL KAPCSOLATBAN

Az alakíthatósági határ azt a kritikus oldalfal ferdeséget jelenti, amit meghaladva a munkadarab fala az elvékonyodás következtében elszakad [5]. Erre hatással van a szerszám pályáján kívül a szerszám típusa, kenése, átmérője és mozgásának iránya, továbbá az előtolás értéke [20]. A saját kutatásom során kizárólag a szerszám pályáját fogom változtatni a jó összehasonlíthatóság érdekében.

A kritikus oldalfal ferdeség oka a kezdeti vízszintes lemez falvastagságának függőleges vetítése a végső geometriára, így ez számszerűsíthető az alábbi képlettel [7]:

$$t = t_0 \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

Ahol:

- t : kialakított geometria falvastagsága felületi normális irányban, mm
- t_0 : kezdeti geometria (lemez) falvastagsága, mm
- α : oldalfal ferdesége, [°]

Fontos figyelembe venni az alakíthatósági határ vizsgálata során az alakító erőket. Ez nyilvánvaló, hiszen a nagyobb alakító erők nagyobb feszültségeket okoznak a munkadarabban, ami annak szakadásához vezethet. Maaß és társainak kutatása alapján megállapítható, hogy a Δz paraméter növelése az alakítási erőket növeli, miközben a kevesebb körbefordulással rendelkező spirál rövidebb pályát, így rövidebb megmunkálási időt eredményez [16]. Bansal és társainak kutatása szintén a megmunkálás közben fellépő erőket vizsgálta több technológia paraméter függvényében [21]. Az alakítási erő axiális irányú komponensének közelítőleg lineáris növekedését eredményezte a szerszám átmérőjének lineáris növelése. Fontos eredményük volt továbbá az, hogy kísérleteikből levonható az a következtetés, hogy 50°-os oldalfal ferdeség mellett jelentkeztek a legnagyobb axiális erő. A modelljük szerint ez nagyjából 45°-nál kellett volna jelentkezzen, tehát ez megerősíti a mérés eredményét. Ezeket az eredményeket azonban némi fenntartással érdemes kezelni, ugyanis az egyes paraméterek hatásait mindössze két-három mérési ponttal validálták, emiatt a lineáris összefüggéseket is nehéz nagy biztonsággal megállapítani.

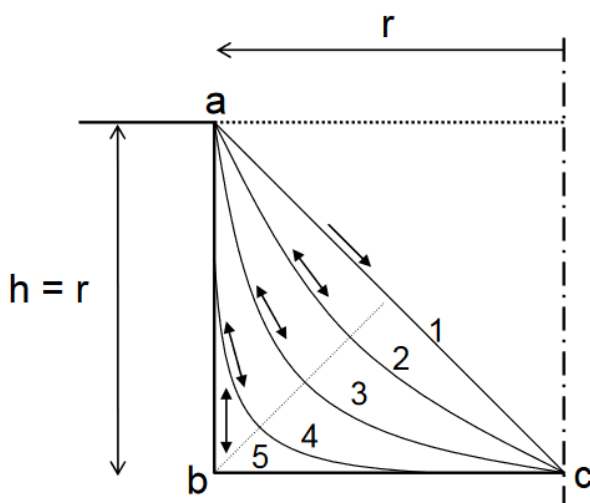
Verbert és társainak. (2008) kísérletei kimutatták, hogy a maximális elérhető oldalfal ferdeség 71° és 76° közötti értékeket vett fel a vizsgált alumínium ötvözetek esetében,

egylépcsős alakítást alkalmazva [5]. Az Al 3003-O-hoz és az AA 3103 alumíniumból készült előgyártmány lemezek vastagságai 2 mm és 0,85 mm közötti értékűek voltak. Ez azért volt fontos információ, mert a saját munkám egy 0,22 mm vastagságú alumínium lemez alakításához kapcsolódik, így ezekkel a kísérleti eredményekkel összehasonlítható lesz az előkísérleteim során megállapított maximális oldalfal ferdeség. Az eredmények összehasonlíthatósága érdekében fontos információ, hogy az Al 3003-O szakítószilárdsága 110 MPa [22], az AA 3103 ötvözeté minimum 140 MPa [23], míg a saját kísérleteim során használt AlMn1Mg1 ötvözeté 280 MPa [24].

2. táblázat: : Gyakori előgyártmány anyagok és a hozzájuk tartozó alakíthatósági határok [5]

Anyag	Vastagság (mm)	Szerszám átmérő (mm)	Maximális oldalfal ferdeség
Al 3003-O	1,2	10	71°
Al 3003-O	2,0	10	76°
AA 3103	0,85	10	71°
AA 3103	1,5	10	75°
Ti Grade 2	0,5	10	47°
DC01	1,0	10	67°
AISI 304	0,4	10	63°

M. Skjoedt és társai kidolgoztak 5 lépésből álló lemezalakítási stratégiákat. Céljuk az alakíthatósági határ kibővítése volt [4]. A célgeometria a kutatásuk során egy félgömb és egy henger volt. A henger kialakításához tartozó szerszám pályákkal való kísérletezés során az első lépés kivételével megvizsgálták a kívülről befelé és a belülről kifelé haladó szerszám pályák hatását.



8. ábra: Ötlépéses pályatervezési stratégia [4]

Kutatásuk sikerrel járt, mert sikeresen ki tudták alakítani a hengeres munkadarabot, ami 90° -os oldalfal ferdeséget, azaz alakíthatósági határt jelent. Ez az elérhető maximális alakíthatósági határ a 3 tengelyes CNC megmunkáló központokon, mivel a szerszám nem dönthető be az x vagy y tengely körül. A sikeres stratégia elemzése során beigazolódni látszott az a feltevés, miszerint az alakíthatósági határ növeléséhez szükséges az alakítási folyamatba bevonni a munkadarab olyan felületeit, amiket egy egy lépéses stratégiával a szerszám nem érintett volna. Erre abból következtettem, hogy az első lépésként M. Skjoedt és társai egy teljes kúpot alakítottak ki, ami a kialakítandó munkadarab mélységével azonos mélységű volt. Ezt a gondolatot felhasználtam a többlépéses alakítási stratégiák kidolgozása során.

2.3. Következtetések az irodalomkutatásból

Ebben a fejezetemben összefoglalom az irodalomkutatás során levont következtetéseket, amiket a későbbiekben esetlegesen felhasználok.

- Célszerű egyaránt belülről kifelé és kívülről befelé típusú pályákat alkalmazni, mert ez minimalizálja a munkadarab alján kialakuló lépcsőzetes hiba mértékét [17].
- C. Su és társainak eredményét a későbbiekben felhasználom olyan módon, hogy így már nem volt szükséges a pályatervezéseim során a lépések közötti szögműködés különféle felosztásával is kísérleteznem, az oldalfal szögének inkrementjét ezért egységesen 5° -nak vettem. Fontos megjegyezni azonban, hogy a fokozatosan csökkenő oldalfal szög különbség (A3) a minimális falvastagságot jelentősen tovább csökkenti, ezért ennek alkalmazása kerülendő [17].
- Marton Balázs előző félévben készített szakdolgozata alapján a lineáris oldalfal alkalmazása előnyösebb az alakíthatósági határ szempontjából, mint a görbe, ez egyértelműen következik a kör metszetű oldalfal érintőjének meredekségéből [7].
- A repedés még egyenes oldalfal esetén is a csonkakúp alján szokott megjelenni, ahol egyenes lesz a geometria [6].

Saját feltételezésem szerint másik előnye a kívülről befelé és belülről kifelé típusú pályák váltakozásának még az, hogy ebben az esetben rövidebb a megmunkálási idő, mivel alulról fölfelé rögtön lehet kezdeni a második lépést.

3. PÁLYATERVEZÉS A MEGMUNKÁLÁSOKHOZ

A dolgozat kidolgozása közben többféle egy- és többlépéses pályatervezési stratégiát is megvalósítottam. Egylépéses pályatervezésre és kísérletekre szükség volt, mert csak ezen kísérletek elvégzése után ismerhettem meg azt kritikus α_{krit} oldalfal ferdeséget, ami fölött minden egylépéses alakítással készített munkadarab elszakadna. Miután ezt az értéket meg tudtam határozni, elkezdhettem kísérletezni olyan többlépéses pályatervezési stratégiákkal, amikkel ez az α_{krit} alakíthatósági határ növelhető. Ha tehát egy olyan geometriát tudtam kialakítani ezen előkísérletek után, aminek az oldalfal ferdesége ennél a kritikus szög értéknél nagyobb lett, de a lemez nem szakadt el, az egyértelműen megmutatta az új megmunkálási pálya sikerességét.

A kialakítandó geometria (munkadarab) minden esetben egy $H = 20$ mm mélységű, $R_f = 30$ mm felső sugarú és változó α oldalfal ferdeségű csonkakúp volt. Az α oldalfal ferdeséget változtattam az alkalmazott megmunkálási pálya alakíthatósági határára vonatkozó hatékonyságának függvényében, tehát ha a megmunkálási pálya az alakíthatósági határt sikeresen bővítette, akkor a célgeometria oldalfalának ferdeségét növeltem, majd az újra generált megmunkálási pályával újra teszteltem. A pályák függvényeinek analitikus meghatározása után minden esetben saját MATLAB kódot használtam a G-kód generálására. Megkönnyítette a feladatomat, hogy az NCT vezérlés G-kódjában van külön funkció a kúpos spirálinterpolációra [25] [26]. A munkám során mindent szimbolikusan számoltam, mivel a legtöbb paraméter és változó változtatására szükség volt a kísérletek során, hiszen már a kialakítandó geometria oldalfal ferdeségének is változni kellett.

3.1. Egy- és többlépéses, kúpfelületen haladó spirál pálya

Az α_{krit} alakíthatósági határ meghatározásához és a többlépéses kúpos spirálinterpolációhoz egyaránt az itt ismertetett matematikai összefüggéseket és pályatervezési módszert használtam.

3.1.1. A CSONKAKÚP FELÜLETÉNEK DEFINIÁLÁSA

A munkadarab függőleges szimmetriatengelyét úgy definiáltam, hogy az egybeesik a CNC vezérlés munkadarab koordináta rendszerének (G54) Z tengelyével. A munkadarab felső alapköre a vezérlés koordináta rendszerének XY síkjában van, azaz $z=0$. A munkadarab alsó alapköre a vezérlés koordináta rendszerének $z = -H$ értékű, az XY síkkal párhuzamos síkjában van. Ez megkönnyíti a CNC megmunkáló központok kezelését, mert a nullpont bemérés után nem szükséges Z irányú eltolást megadni. A munkadarab körének sugara $z = 0$ magasságban R_f (felső), $z = -H$ magasságban pe-

dig R_a (alsó). Az utóbbi értékét a felső sugárból számoltam az α oldalfal ferdeség segítségével. Ennek az oka az oldalfal ferdeség egyszerű változtatása a pályatervezések során állandó H munkadarab magasság megtartása mellett.

$$R_a = R_f - \frac{H}{\tan(\alpha)} \quad (2)$$

Ahol:

- R_a : csonkakúp alsó körének sugara, mm
- R_f : csonkakúp felső körének sugara, mm
- H : csonkakúp magassága, mm
- α : csonkakúp oldalfal ferdesége, rad

A munkadarab definiált helyzete alapján a z bemenő változó értelmezési tartománya:

$$z \in [0; -H] \quad (3)$$

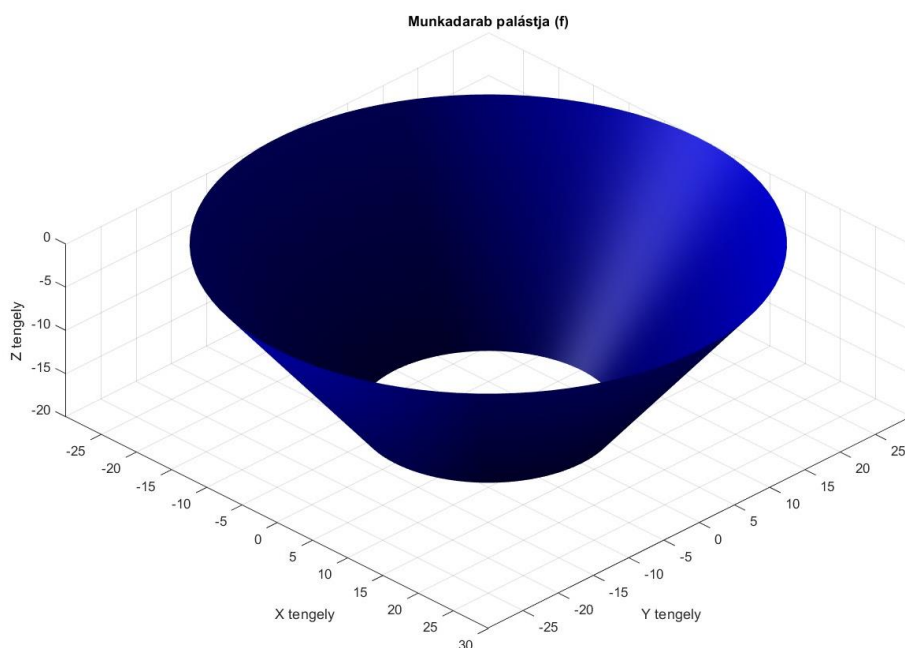
A kialakítandó késztermék a szerszám egy csonka kúp palástfelületén definiált spirál pályán való mozgása során jött létre. Először definiáltam a késztermék palástját. Ez a 3 dimenziós felületet egy vektor-vektor függvényként definiáltam. A φ -ből és z -ből álló vektorhoz egy, a Descartes-féle derékszögű koordináta rendszerben értelmezett x, y, z komponensekkel definiált vektort rendel a felületet megadó $\mathbf{f}$ függvény:

$$\mathbf{f}(\varphi, z) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \right) \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ahol:

- z : z irányú változó, mm
- φ : szögelfordulás változója, rad

Az $\mathbf{f}$ függvény által definiált felület a 9. ábrán látható. Ez a kialakítandó munkadarab palást felülete. Fontos, hogy a szerszám programozott pontja nem ezen a felületen haladt, ennek az okát a következő fejezetben fogom részletezni. Az $\mathbf{f}$ függvény által megadott felület a szerszám és a munkadarab közötti érintkező felületet adja meg, ami a munkadarab palástja is.



9. ábra: A kialakítandó geometria palástja

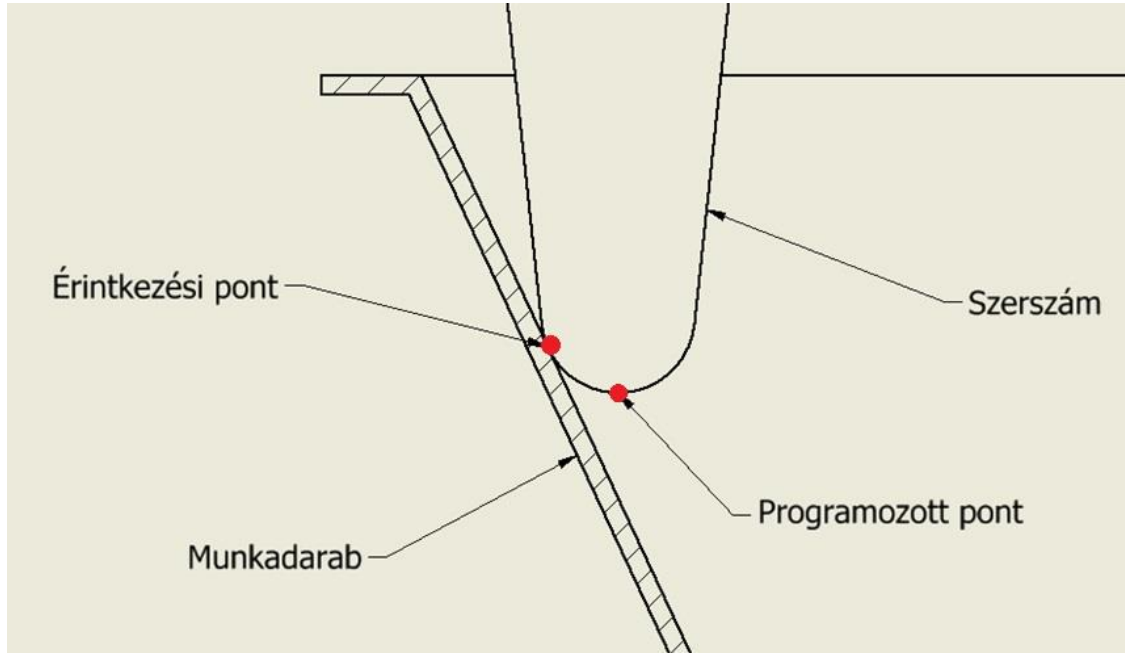
3.1.2. A TÉRBELI SUGÁRKORREKCIÓ KISZÁMÍTÁSA

A CNC vezérlők által beolvasott G kódokban megadott koordináták minden esetben a szerszám programozott pontjának koordinátáit adják meg a munkadarab koordináta rendszerben [27]. Szerszámhossz korrekció megadása esetén a CNC vezérlő ebből kiszámítja a vezérelt pont koordinátáit. A vezérlő a munkadarab koordináta rendszerből a vezérelt ponthoz tartozó koordinátákat egy homogén transzformációs mátrixszal átszámolja a gépi koordináta rendszerbe. Az így kapott koordináták alapján valósul meg a mozgás szabályozása.

Az általam használt szerszám vezérelt pontja a főorsó forgástengelyének és a szerszám végén elhelyezkedő félgömbnek a metszéspontja. Ezek alapján látható, hogy a vezérlés a munkadarab irányát és méreteit nem ismeri. Emiatt a G kód írásával közvetlenül nem valósítható meg a térbeli sugárkorrekció, amennyiben annak irány a munkadarab irányától és geometriájától függ. A vezérlés nem ismeri a kialakított munkadarab és a szerszám érintkezési pontját. Amennyiben a szerszámot a 4. egyenletben megadott $f(\varphi, z)$ felületen vezéreltem volna, úgy a szerszám a térbeli szerszámkorrekció hiányában egy nagyobb sugarú csonkakúpot alakított volna ki. Ennek az az oka, hogy a szerszám alján lévő programozott pont haladt volna azon a felületen, amin a szerszám és a munkadarab érintkezési pontja kellett volna haladjon.

Az előző fejezetben meghatározott f függvény a szerszám és a kész geometria érintkezési pontját adta meg. A G kód programban leírt szerszám pálya az előzőekben ismertetett okokból nem ezen a felületen haladt. Az érintkezési ponthoz képest mindig más

irányba volt a szerszám programozott pontja. Tehát meg kellett határoznom az érintési pont függvényében a szerszám programozott pontjának helyzetét. A programozott és az érintkezési pont az alábbi ábrán látható:



10. ábra: A szerszám és a munkadarab érintkezése

Először meg kellett határoznom a munkadarab kúp palástjának felületi normálvektorát. Ezt az $\mathbf{f}$ felület φ és z változók szerinti parciális derivált vektorok vektoriális szorzataként számoltam ki. Ezek a parciális derivált vektorok az $\mathbf{f}$ felület érintő vektorai és egyértelműen meghatározzák a felület adott φ, z helyéhez tartozó érintő síkját is. A két érintő vektor vektoriális szorzata pedig merőleges mindkét vektorra, ezért az érintő síkra is, így meghatározzák a felületi normális irányát. Mivel az érintővektorok nem egységnyi hosszúságúak, így a vektoriális szorzatuk kiszámolása előtt szükséges normalizálni őket. Erre azért van szükség, mert a szerszámkorrekciós vektor hosszát a szerszám sugara határozza meg.

A felület φ szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial \varphi} = \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \right) \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Mivel pedig a $\begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}$ vektor hossza egységnyi, ezért:

$$\left| \frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right| = R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \quad (6)$$

Tehát:

$$\mathbf{u}(\varphi, z) = \frac{\frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial \varphi}}{\left| \frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right|} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ahol:

- **u**: **f** felület egységnyi hosszú, φ változó szerinti parciális derivált vektora, dimenziótlan

A felület z szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial z} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \\ \sin(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A vektor hossza pedig:

$$\left| \frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial z} \right| = \sqrt{\sin^2(\varphi) \cdot \left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + \cos^2(\varphi) \cdot \left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1} = \sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1} \quad (9)$$

Tehát:

$$\mathbf{v}(\varphi, z) = \frac{\frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial z}}{\left| \frac{\partial \mathbf{f}(\varphi, z)}{\partial z} \right|} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \\ \sin(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ahol:

- **v**: **f** felület egységnyi hosszú, z változó szerinti parciális derivált vektora, dimenziótlan

Így a felület normálvektora kiszámolható, mint a két változó szerinti, egységnyi hosszúságú parciális derivált vektorok vektoriális szorzata. Ezt szimbolikusan az **i**, **j**, **k** egységnyi hosszúságú bázisvektorok és a két parciális derivált vektor által alkotott mátrix harmadrendű determinánsaként számoltam ki.

$$\mathbf{n}(\varphi, z) = \mathbf{u} \times \mathbf{v} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} u_y v_z - v_y u_z \\ -u_x v_z + v_x u_z \\ u_x v_y - u_y v_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ahol:

- **n**: **f** felület egységnyi hosszúságú felületi normális vektora, dimenziótlan

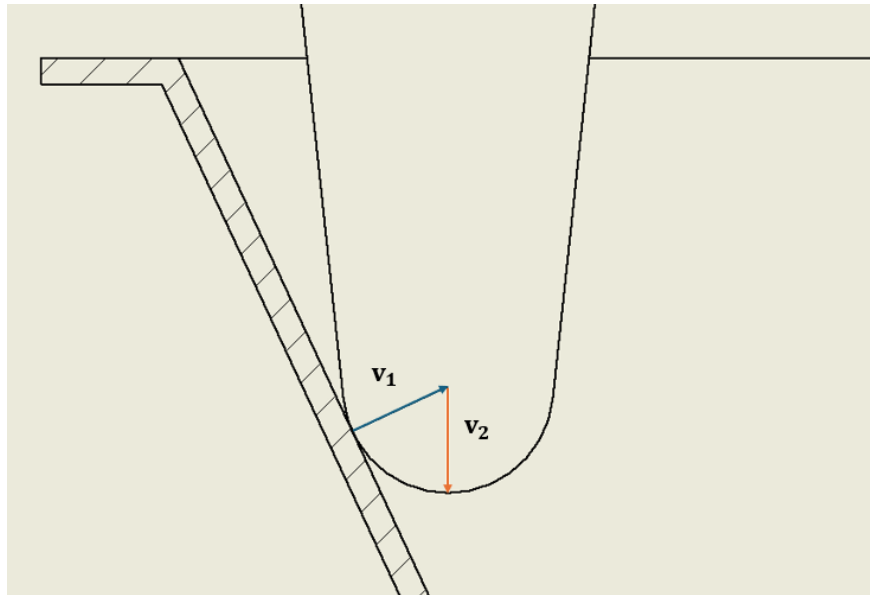
Behelyettesítve a vektoriális szorzatba:

$$\mathbf{n}(\varphi, z) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \\ \sin(\varphi) \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \\ -\sin^2(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} - \cos^2(\varphi) \cdot \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Egyszerűsítve az $\mathbf{f}$ felület normálvektora:

$$\mathbf{n}(\varphi, z) = \mathbf{n}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ \frac{R_a - R_f}{H} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Ez a normálvektor azonban kifelé mutatott a felületből, nekem azonban befelé kellett mutasson a helyes szerszám korrekciós irány miatt, ezért az előjelet negálnom kellett. Így már megadható az $\mathbf{f}$ felület bemenő változóihoz rendelt $\mathbf{p}_f$ térbeli szerszámkorrekciós felület. Ebből a programozott pont úgy adódott ki, hogy az érintkezési ponthoz hozzá kellett adnom a normálvektor irányú, $r_{szerszám}$ hosszú vektort, ami megadta a szerszám végén lévő félgömb középpontját, ehhez pedig hozzá kellett adni a szintén $r_{szerszám}$ hosszúságú, $(0,0,-1)$ irányú vektort, amivel a szerszám programozott pontját kaptam. Ez az alábbi ábrán látható:



11. ábra: Szerszámkorrekciós vektor meghatározása

A munkadarab és a szerszám érintkezési pontjából a programozott pontba mutató vektor ezek alapján:

$$\mathbf{p}_f(\varphi, z) = \mathbf{f}(\varphi, z) - r_{szerszám} \cdot \mathbf{n}(\varphi) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{szerszám} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Az ismert vektorokat behelyettesítve:

$$\mathbf{p}_f(\varphi, z) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z \right) \\ z \end{bmatrix} - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ \frac{R_a - R_f}{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Egyszerűsítés után:

$$\mathbf{p}_f(\varphi, z) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot z - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \right) \\ z - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H} - r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Az így kapott $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ felületet elemezve megállapítható lett, hogy ez ugyanúgy csonkakúp palást, mint a $\mathbf{f}(\varphi, z)$ felület, csak kisebb felső és alsó alapköre van. A felső és az alsó alapkör sugara ugyanakkora sugárkülönbséggel kisebb a $\mathbf{f}(\varphi, z)$ felülethez viszonyítva. Ezt a sugárkülönbséget az alábbi képlet adja meg:

$$\frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} \quad (17)$$

Emellett a szerszámhossz korrekciós $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ kúp palást magassága változatlan a $\mathbf{f}(\varphi, z)$ felülethez tartozó kúphoz képest, azonban más magasságról indul és ugyanennyivel más z magasságon ér véget azonos φ és z értelmezési tartomány esetén. A magasság különbség értékét az alábbi képlet adja meg:

$$-\frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H} \right)^2 + 1}} - r_{\text{szerszám}} \quad (18)$$

Ez azért volt kedvező a feladat megoldásának szempontjából, mert az NCT vezérlés kúpos spirálinterpolációs funkcióját tudtam továbbra is használni, csak ki kellett számoljam a korrekciós felület felső körének sugarát és azt a bemenő z -hez tartozó értelmezési tartományt, ami esetén a $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ felület kimenő z koordinátájának értékkészlete $z \in [0; -H]$.

3.1.3. SPIRÁLPÁLYA DEFINIÁLÁSA

Az eddig definiált felületekre létre kellett hoznom a spirálpályákat. Eddig két változó függvényeként adtam meg a felületeket, a pályák megadásához azonban egy változóra volt szükségem. Tehát a φ, z változók egyikét ki kellett fejezzem a másikkal, mindkettő hasznosnak bizonyult a feladatmegoldás során. Ez a megfeleltetés csak úgy lehetséges, ha megkülönböztetem a φ szögelfordulás 2π -vel eltolt értékeit.

$$z(\varphi) = \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi \quad (19)$$

Ahol:

- Δz : Egy körbefordulás (keringés) alatt megtett z irányú süllyedés, mm

A $z(\varphi)$ függvény inverze pedig:

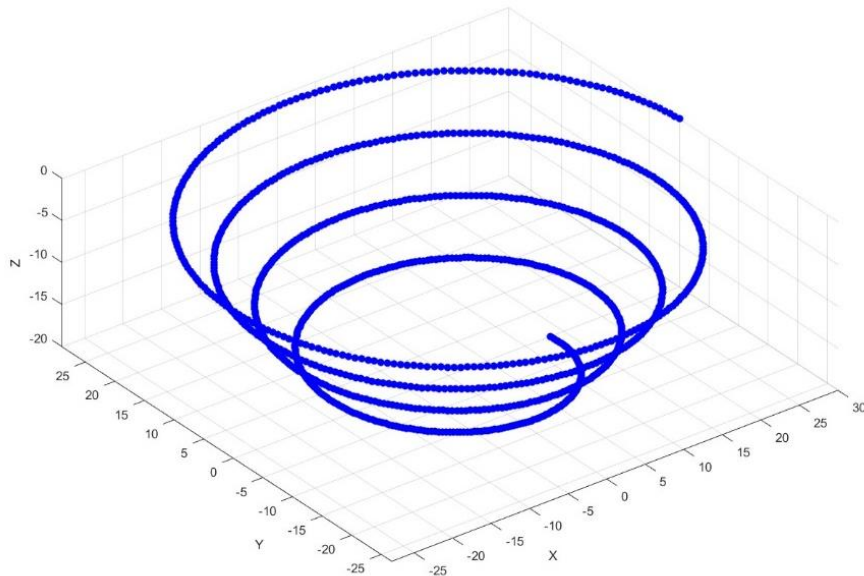
$$\varphi(z) = \frac{-2\pi}{\Delta z} z \quad (20)$$

Ezt behelyettesítve a $\mathbf{f}(\varphi, z)$ felület függvényébe megkaptam a $\mathbf{g}(\varphi)$ spirál pályát.

$$\mathbf{g}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi \right) \\ -\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi \end{bmatrix} \quad (21)$$

A z változó értelmezési tartománya alapján a φ változó értelmezési tartománya, $\varphi(z) = \frac{-2\pi}{\Delta z} z$ alapján:

$$\varphi \in \left[0; \frac{2H\pi}{\Delta z} \right] \quad (22)$$



12. ábra: Kontaktpont pályája az $\mathbf{f}$ felületen, $\Delta z = 5$ mm, $\alpha = 50^\circ$

Fontos, hogy a $\mathbf{g}(\varphi)$ függvény a munkadarab kúpfelületén haladó kontaktpont spirálpályáját írta le, nekem azonban a programozott pont pályájának függvényére volt szükségem. Ezt a 13. egyenlettel megadott térbeli szerszám korrekciós vektor felhasználásával tudtam meghatározni. A programozott pont pályájának függvényét $\mathbf{p}(\varphi)$ -vel jelölve adtam meg.

$$\mathbf{p}(\varphi) = \mathbf{g}(\varphi) - r_{\text{szerszám}} \cdot \mathbf{n}(\varphi) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{p}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi \right) \\ -\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi \end{bmatrix} - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ \frac{R_a - R_f}{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{p}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \right) \\ -\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} - r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Az így kapott $\mathbf{p}(\varphi)$ görbét elemezve látható, hogy ez ugyanúgy csonkakúp paláston haladó spirál pálya, mint a $\mathbf{g}(\varphi)$ görbe, csak kisebb felső és alsó alapkör sugara van. A felső és az alsó alapkör sugara ugyanakkora sugárkülönbséggel kisebb a $\mathbf{g}(\varphi)$ görbéhez viszonyítva. Ez teljesen analóg a $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ és az $\mathbf{f}(\varphi, z)$ felületek összehasonlítása során kapott eredményekkel, mert a $\mathbf{p}(\varphi)$ és $\mathbf{g}(\varphi)$ görbék ezeken a felületeken helyezkednek el. Az így kapott sugár különbség tehát megegyezik a 17. képlettel. Az analógiát felhasználva elmondható, hogy a spirál pályák kezdő- és végpontjainak Z irányú magasságaik is azonosak a felületek összehasonlítása során kapott 18. képlettel, azonos φ értelmezési tartomány esetén. Nekem azonban a $\mathbf{g}(\varphi)$ -vel azonos φ értelmezési határok nem voltak megfelelőek, ugyanis ezzel egy Z-ben lejjebb lévő csonka kúpot kaptam volna, ezért ki kellett még számoljam a $\mathbf{p}(\varphi)$ -hez tartozó φ értelmezési határokat.

Alsó z-t megadó φ határ:

$$\mathbf{p}(\varphi_{\text{alsó}}) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = -H \quad (26)$$

$$-\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi_{\text{alsó}} - \frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} - r_{\text{szerszám}} = -H \quad (27)$$

$$\varphi_{\text{alsó}} = \left(-H + \frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} + r_{\text{szerszám}} \right) \cdot \frac{-2\pi}{\Delta z} \quad (28)$$

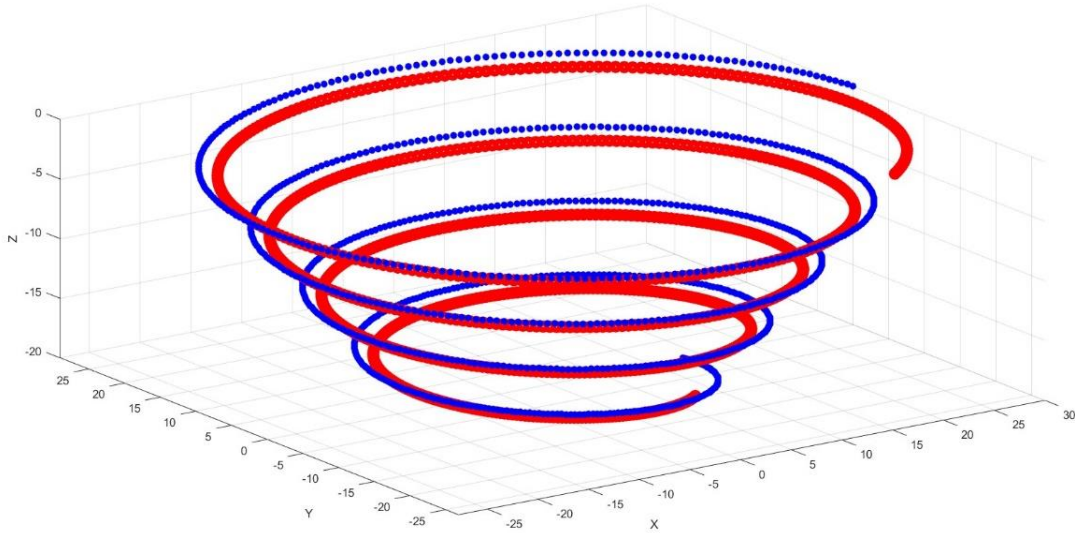
Felső z-t megadó φ határ:

$$\mathbf{p}(\varphi_{\text{felső}}) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (29)$$

$$-\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi_{\text{felső}} - \frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} - r_{\text{szerszám}} = 0 \quad (30)$$

$$\varphi_{\text{felső}} = \left(\frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} + r_{\text{szerszám}} \right) \cdot \frac{-2\pi}{\Delta z} \quad (31)$$

Az így kapott értelmezési tartományok használata mellett a **g** és **f** görbék az alábbi ábrán láthatóak:



13. ábra: Kontaktpont (kék) és a programozott pont (piros) pályája az **f** felületen, $\Delta z = 5 \text{ mm}$, $\alpha = 50^\circ$

Ezekkel az értékekkel már a munkadarab síkjából indult az interpoláció és a munkadarab alsó körén ért véget. A kísérletek elvégzése során kiegészítettem a pályát olyan módon, hogy a spirál pálya indulása előtt a felső körön tett még egy teljes kört és ugyanígy a spirál pálya vége után tett még az alsó körön is egy teljes kört a szerszám.

3.1.4. A PÁLYA G KÓDJÁNAK ELŐÁLLÍTÁSA

A pálya G kódját MATLAB kóddal hoztam létre, ami egy .txt file-ba írta a G kódot. A 3. táblázat 8. sorában látható az NCT vezérlő kúpos spirálinterpolációja [25] [26]. A spirálinterpoláció helyett lehetett volna a pontonkénti pályagenerálást is alkalmazni, majd az így kapott diszkrét pontokat szakaszokkal (G1-es lineáris interpolációval) összekötve megkaphattam volna a szerszám pályát. Ehhez a szükséges spirál egyenleteket elkészítettem. Ez azonban nagyobb számítási időt vett volna igénybe mind a MATLAB-beli G-kód megírására, mind pedig a CNC megmunkáló központ vezérlőjének az interpolációs adatok számítására. Ez akkor lehetett volna probléma, ha az előtolás eleendően nagy lett volna ahhoz, hogy két pont közötti mozgási idő kevesebb legyen, mint 10 ms [7]. Ugyanis a használt vezérlésen nagyjából ennyi időre van szükség egy NC mondat feldolgozásához. Emiatt a kúpos spirálinterpolációt választottam.

3. táblázat: Az előkísérletek során használt G-kód program

SOR-SZÁM	G-KÓD	FUNKCIÓ
1	G90 G54 G17	Abszolút méretmegadás, munkadarab koordináta-rendszer, XY sík kiválasztása.
2	G0 X28.85 Y-0.00	Gyorsmeneti mozgás a spirál kezdőpontja fölé.
3	G43 Z30 H8	H8-as regiszterhez tartozó szerszámhossz korrekciós érték alkalmazásával mozgás a z=30-as magasságra.
4	F1500 S2000 M3	1500 mm/min előtolás, 2000 1/min főorsó fordulatszám, óramutatóval megegyező irányú főorsó forgás irány.
5	G1 Z1	Mozgás előtolással z=1 magasságra.
6	#3006=001(START)	Megállás üzenettel.
7	G3 I-28.85 J0.00 Z0.00	Ráállás a munkadarabra.
8	G3 X17.30 Y-0.00 Z-20.00 I-28.85 J0.00 L200.00	Kúpos spirálinterpolációval haladás a felső átmérőről a legalsóra, 200 körülfordulással a paláston.
9	G3 X17.30 Y-0.00 I-17.30 J0.00	A munkadarab alján egy teljes kör megtétele.
10	G0 Z30	Gyorsmenettel szerszám kiemelés z=30-as magasságra.
11	M30	Program vége.

A 6. sorban látható program megállító mondat azért volt szükséges, mert ez a megállás alatt volt időnk a rezgés és az erőmérés elindítására.

3.2. Sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia

Ezzel a pálya típussal az volt a célom, hogy minél több anyagot tudjak átmozgatni az alakítás során a munkadarab alsó, középső felületéről az oldalfalba, mivel ez az alsó felület a megmunkálás során deformálatlan maradna egylépéses stratégiát alkalmazva. Ehhez azt a feltételezést használva jutottam el, hogyha sikerül az anyagot átmozgatni a korábban ismertetett középső zónából, úgy a munkadarab oldalfala ezzel az anyag többlettel vastagabb lesz, így kevésbé hajlamos a szakadásra a megnövekedett szilárdság miatt. Ezt azzal akartam elérni, hogy minél laposabb β oldalfal ferdeségű kúpfelületen haladó spirállal a lehető legközelebb jusson a szerszám a munkadarab függőleges szimmetria tengelyéhez, ezzel biztosítva az alsó felület bevonását az alakítási műveletbe.

A 3.1. fejezetben ismertetett, kúp paláston haladó spirál pályával ellentétben ezzel a stratégiával már nem ment a szerszám többször a kúp felső alapkörére és indult onnan újból lefelé. Ezzel a startégiával a szerszám először létrehozott egy $\Delta z = 0,1 \text{ mm}$ mélységű lapos kúpot ($1^\circ - 2^\circ$ oldalfal ferdeségű), majd ezt egy sík spirállal kibővítette a célgeometria oldalfaláig. Ezután ebből a pontból ismételte ezt a két lépést egészen addig, míg le nem ért a kúp aljáig. A szerszám minden esetben az XZ síkból indult és ugyanebbe a síkba tért vissza egy, vagy több egész fordulatot megtéve a paláston. Ezt a mozgást azért definiáltam ilyen módon, mert így lényegesen egyszerűbb lett a pálya matematikai leírása és a MATLAB kód is. Ezzel a leírással nem volt szükség az egyes térbeli és síkbeli spirálok függvényeinek és értelmezési tartományainak kiszámítására, hanem elegendő volt a pálya XZ síkban vett metszetében értelmezett vektorok meghatározása. Ez a fajta leírás azonban azzal a következménnyel járt, hogy az XY síkban vizsgált sík spirál és térbeli spirál pályának mindig azonos irányban voltak metszéspontjai. Ez azonban nem okozott problémát a geometria kialakításában, mert a szerszám továbbra is a kúpfelületen haladt.

3.2.1. A PÁLYA XZ SÍKBELI LEÍRÁSA

Az XZ síkban három fő vektorral definiáltam a pálya elejét és ismétlődő egységét, ezek: $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ vektorok. A $\mathbf{v}_0$ vektor a munkadarab felső körének (R_f) középpontjából az XY síkban a térbeli spirál kezdőpontjába mutatott. Ezt a kezdőpontot a $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ függvényvel számoltam ki, ahol $\varphi = \pi$ és $z = z_0$. Az utóbbi értéket az alábbi módon számoltam ki:

$$z_0 - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H} - r_{\text{szerszám}} = 0 \quad (32)$$

Ahonnán:

$$z_0 = \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H} + r_{\text{szerszám}} \quad (33)$$

A $\mathbf{v}_1$ vektor a térbeli spirál kezdőpontjából a végpontjába mutató vektor. Ennek a vektornak a kezdőpontját az origóból kiinduló $\mathbf{v}_0$ vektor végpontja határozta meg. A végpontját pedig a β oldalfal ferdeség és a $-\Delta z$ mélység határozta meg. A $\mathbf{v}_2$ vektor kezdőpontját a $\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1$ összeg adta meg. A végpontját pedig a $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ korrekciós felület határozta meg, ahol $\varphi = \pi$ és $z = z_0 - \Delta z$. Ezekkel a kezdő- és végpont koordinátákkal kiszámoltam a vektorokat. Mivel a $\mathbf{p}_f(\varphi, z)$ korrekciós felületet használtam a pályatervezésre és ez a függvény a munkadarab felületét megadó $\mathbf{f}(\varphi, z)$ függvény paramétereit és változóit használta, ezért nem kellett újra számolnom a szerszámkorrekciót ehhez a stratégiához.

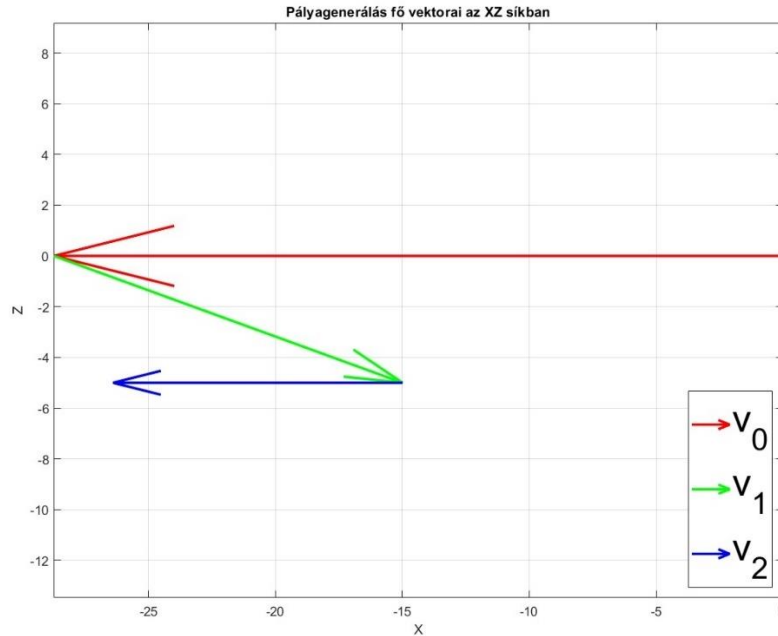
Tehát a három vektor:

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{p}_f(\pi, z_0) \quad (34)$$

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta z}{\tan(\beta)} \\ 0 \\ -\Delta z \end{bmatrix} \quad (35)$$

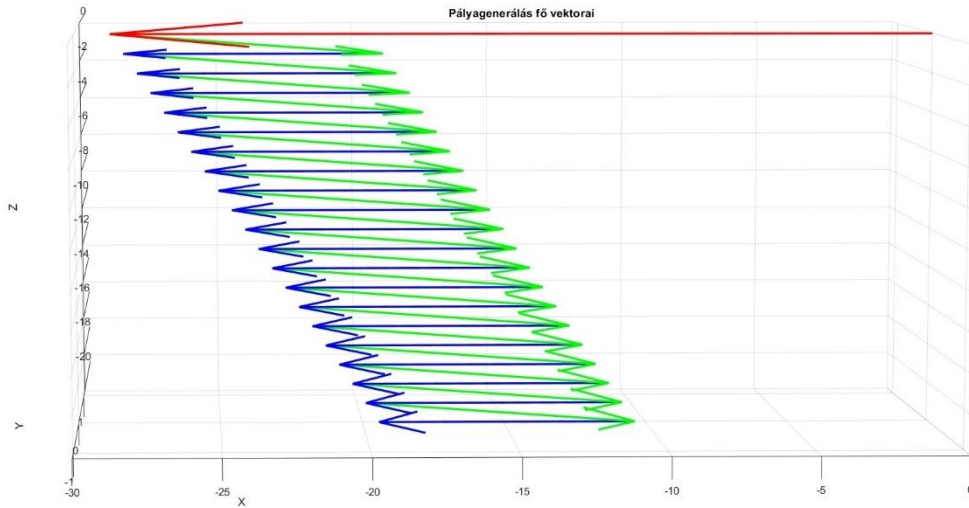
$$\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} \Delta z \cdot \left(\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Az alábbi ábrán látható a feljebb ismertetett 3 fő vektor. Az ábrán egy $\alpha = 65^\circ$ oldalfal ferdeségű munkadarabhoz tartozó $\beta = 20^\circ$ és $\Delta z = 5$ mm pálya paraméterű megmunkáláshoz tartoznak.



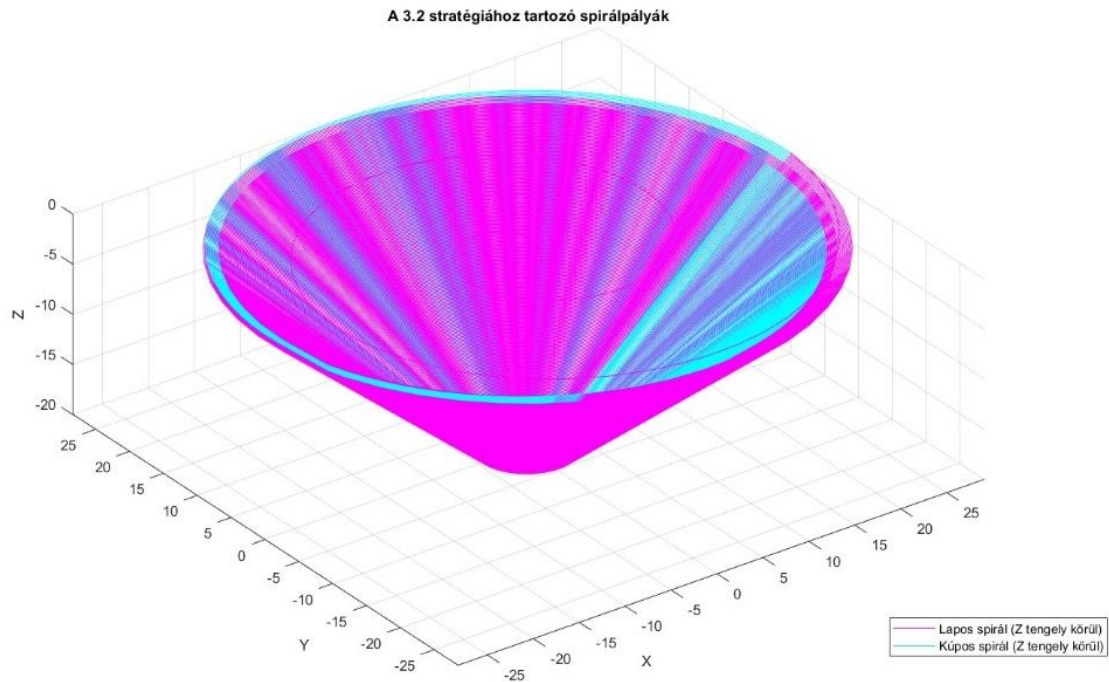
14. ábra: Pályagenerálás fő vektorai az XZ síkban

A $\mathbf{v}_1$ és $\mathbf{v}_2$ vektorok ismétlésével létrehozott teljes pályatervezés XZ síkbeli metszete a következő ábrán látható. A pályaparaméterek itt eltérnek a 14. ábrán használtaktól a szemléletes ábrázolás érdekében.



15. ábra: A pályagenerálás vektorainak ismétlődése az XZ síkban ($\beta=6^\circ$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$)

A 15. ábrán látható vektorok mindegyike egy sík vagy térbeli spirális interpolációs mozgás kezdőpontjából az adott spirál végpontjába mutató vektor. A spirális pályák az alábbi ábrán láthatóak:



16. ábra: Sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia szerszámpályája ($\beta = 2^\circ$)

Ennél a pályatípusnál figyelni kellett arra, hogy a $\Delta z, \beta, \alpha$ paramétereknek olyan értéket adjak, hogy a pályagenerálás során ne jusson át a szerszám egyik $\mathbf{v}_1$ vektor hozzáadása után se a pozitív x oldalra, hiszen ekkor önmetszés valósulna meg. A pályát megadó vektorok által definiált pálya legnagyobb x értékű pontját kellett ehhez megadnom. Ez azt jelenti, hogy létre kellett hoznom az alábbi kritériumot a $\Delta z, \beta, \alpha$ paraméterek megválasztására:

$$\mathbf{p}_f(\pi, z_0) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{H}{\Delta z} \cdot \frac{\Delta z}{\tan(\beta)} + \left(\frac{H}{\Delta z} - 1 \right) \Delta z \cdot \left(\tan(\alpha) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right) < 0 \quad (37)$$

$$\mathbf{p}_f(\pi, z_0) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + H \cdot \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \tan(\alpha) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right) - \Delta z \cdot \left(\tan(\alpha) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right) < 0 \quad (38)$$

Ezt a feltételt felhasználtam a MATLAB kód megírása során is, így a kód jelzett, ha nem megfelelő paramétereket választottam.

3.2.2. A PÁLYA G-KÓDJÁNAK ELKÉSZÍTÉSE

A MATLAB kódokat a lehető legtöbb változó paraméteres megadásával készítettem, így egyszerűen generálható volt velük a más pálya paraméterű, de azonos alakító stratégiájú szerszám pálya. A munkadarab geometriájának továbbra is egyetlen paramétere az oldalfal ferdesége maradt. A pályagenerálásnak azonban négy paramétere volt. A β annak a térbeli kúpnak az oldalfal ferdeségét határozta meg, amit a $\mathbf{v}_1$ vektor definiált az XZ síkban. A Δz az egy keringés alatti z irányú süllyedést adta meg. Az $L_{sík}$ paraméter az XY síkkal párhuzamos síkban elhelyezkedő, $\mathbf{v}_2$ vektor által meghatározott végpontú spirál körbefordulásainak számát határozza meg. Az $L_{térbeli}$ paraméter a térbeli, $\mathbf{v}_1$ vektor által meghatározott végpontú spirál körbefordulásainak számát határozza meg. Az alábbi paramétereket hoztam létre a kód elején:

- R_a : csonkakúp alsó körének sugara, [mm]
- α : célgeometria oldalfalának ferdesége [rad]
- H : csonkakúp magassága, [mm]
- Δz : spirál z tengely süllyedése egy körülfordulás alatt, [mm]
- β : belső, laposabb kúp oldalfalának ferdesége [rad]
- $L_{térbeli}$: belső, laposabb kúpon Δz süllyedés alatt megtett keringések száma [-]
- $L_{sík}$: síkspirálban megtett keringések száma [-]

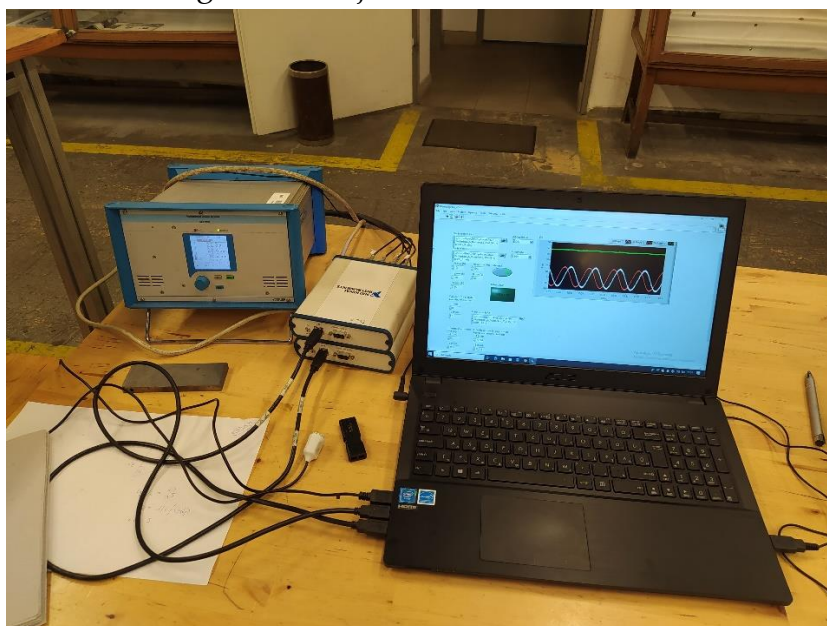
4. ALAKÍTÁSI KÍSÉRLETEK, EREDMÉNYEK

Ebben fejezetben bemutatom az alakítási kísérletek körülményeit, és azok elvégzése során levont tapasztalatokat is ismertetem. Ezután a kísérletek eredményeit kiértékelem a munkadarab oldalfalának szakadása és az erőmérések adatai alapján.

4.1. Kísérlet körülményei és megfigyelések

Az alakítási kísérleteket BME G épületében végeztem el Jacsó Ádám és Tancsa Viktor segítségével. A megmunkálást végző gép egy 3 tengelyes KONDIS 640B CNC megmunkáló központ volt, NCT 300-as típusú vezérléssel. A munkadarabot rögzítő készülék és az alumínium lemez előgyártmány rendelkezésre állt a tanszéken. Ez a készülék két lemez közé szorította az előgyártmányt. A felső lemez célja az egy pontos inkrementális lemezalakításoknál gyakran fellépő ráncosodás megakadályozása volt [2]. Az előgyártmány egy 0,22 mm vastagságú AlMn1Mg1 alumínium lemez volt.

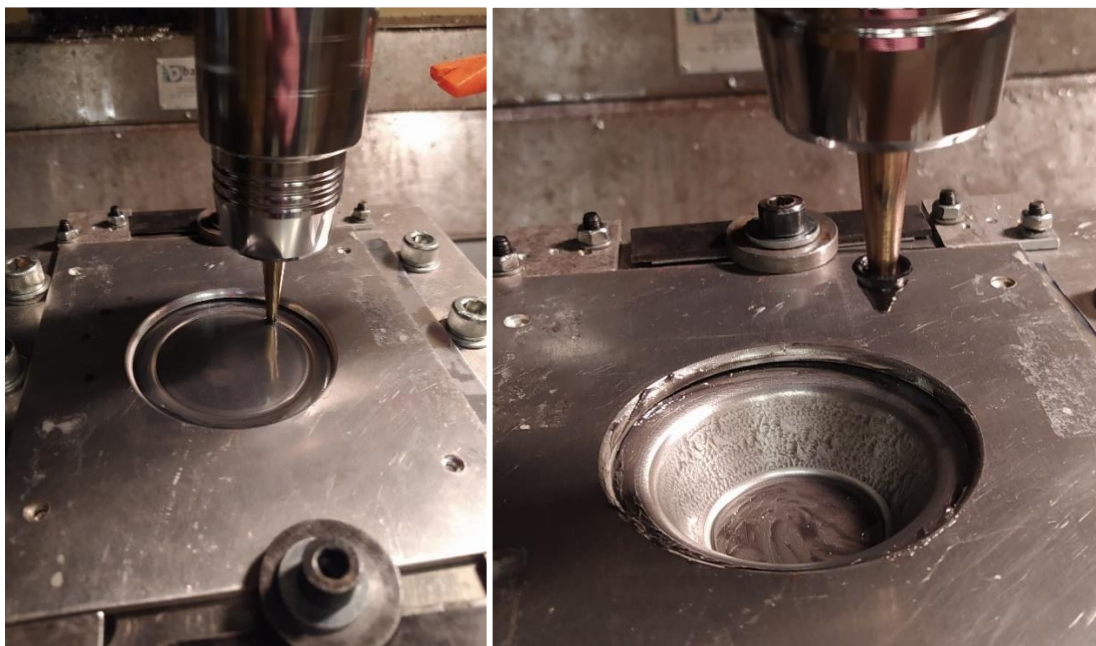
A megmunkálási kísérletek során a munkadarabot befogó készüléket egy háromdimenziós Kistler gyártmányú erőmérő lapra szereltük. Az erőmérő piezoelektromos elven működött, így figyelembe kellett venni a mérések kiértékelése során a szenzor idővel növekedő mérési hibáját [28], mivel a mérések rendszerint több percre tartottak. A szenzor analóg jeleit először egy Kistler 5070A töltéserősítő nagyította. A töltéserősítő analóg jeleit két National Instruments gyártmányú USB-4431 azonosítójú ötcsatornás dinamikus jelgyűjtő modul digitalizálta. Ezeknek az összesen két digitális USB kimenetüket egy laptopba csatlakoztattuk. Az erőmérő szoftvert Bíró István készítette LabVIEW-ban. Ezeket tdms kiterjesztésű fájlokba mentette a szoftver, amit utólag MATLAB-ban fel kellett dolgozzak, majd ábrázolnom kellett őket.



17. ábra: Az erőméréshez használt berendezések

Az első 13 kísérlet során - ami magába foglalta az összes előzetes kísérletet is – egy SCHUNK gyártmányú iTENDO szenzoros szerszám befogóval mértük az alakítás közben fellépő szerszám rezgéseket. Ezeket az adatokat vezeték nélküli kapcsolattal továbbította a gyártó által szolgáltatott tabletre, amin azt valós időben ellenőrizhettük.

Az megmunkálási paramétereknek minden kísérlet esetében 1500 mm/min előtolást és 2000 1/min főorsó fordulatszámot használtunk az eredmények összehasonlíthatósága érdekében.



18. ábra: A geometria kialakításának menete (balra) és a gépzsír feltapadása a szerszámmra (jobbra)

A kísérletezés közben kipróbáltuk a szánkenő olajos és a gépzsíros kenési módot egyaránt. Ennek az oka az, hogy a 3.1 fejezetben alkalmazott többlépéses pályatervezési stratégia esetében a szánkenő olaj összegyűlik a munkadarab alján. Emiatt nem jut elegendő kenés a szerszámhoz, amikor az a korábbi lépésekben kialakított mélységnél magasabban, egy új Z-magasságban dolgozik. A gépzsíros kísérletek esetében a zsír feltapadt a szerszám végére, ezzel folyamatos kenést biztosítva. Ez a 18. ábra jobb oldalán látható. Ez biztosította a megfelelő kenést ezekben az esetekben is.

4.2. Előkísérletek és eredményeik

Az előkísérletek elsődleges célja a 3. fejezetben ismertetett α_{krit} oldalfal ferdeség kísérleti meghatározása volt. Ezekhez a kísérletekhez kizárólag egy lépéses alakító stratégiákat használtam, hiszen a célom a lemez alakíthatósági határának és az ehhez tartozó kritikus oldalfal ferdeség meghatározása volt. Minden előkísérlet során ugyanolyan sűrűségű spirál pályákat alkalmaztam. A célgeometriának minden paramétere azonos volt az előkísérletek során, csak az oldalfal ferdesége változott értelemszerűen. Ennek céljából először egy $\alpha = 45^\circ$ -os oldalfal ferdeségű kúpot készítettem el a technológiával, felhasználva, hogy Marton Balázs kísérleteiben hasonló oldalfal ferdeség esetében

a három kísérlete során egyszer sem szakadt el a munkadarab fala [7]. Amennyiben az adott oldalfal ferdeségű célgeometria esetében nem szakadt el a munkadarab fala, akkor 5°-kal növeltem az α oldalfal ferdeséget, és újraindítottam a kísérletet egy új előgyártmánnyal.

A fenti módszert alkalmazva eljutottam az $\alpha = 65^\circ$ oldalfal ferdeségig, ahol a munkadarab fala elszakadt, tehát $\alpha_{\text{krit}} = 60^\circ$ -nak állapítottam meg az alapanyag alakíthatósági határát 5°-os oldalfal ferdeség felbontás mellett. A biztos érték érdekében két kísérletet is végrehajtottuk és mindkét kísérlet során elszakadt a munkadarab a 65°-os oldalfalú kúpnál. A későbbi kísérleteink is ezt a határt megerősítő eredményekkel végeztek. Az 4. táblázatban összefoglaltam az előzetes kísérletek eredményeit.

4. táblázat: Az előkísérletek eredményei

mérés sorszáma	Lépések száma	oldalfal ferdeség (elméleti munkadarab)	Elszakadt?
1.	1	45°	nem
2.	1	50°	nem
3.	1	55°	nem
4.	1	60°	nem
5.	1	65°	igen
6.	1	65°	igen

Az első kísérlettel kialakított munkadarab a 19. ábrán látható. Ez egy lépéses pályatervezés alkalmazásával gyártódott. Az oldalfal ferdesége 45°.



19. ábra: Első alakítási kísérlet eredménye (balra) és a 6. sorszámú kísérlet eredménye (jobbra, nagyított kép)

A munkadarab elszakadása mindig az alakító szerszám közvetlen környezetében történt, az aktuálisan kialakított forma alján, ahogyan azt kiemeltem a szakirodalmak elemzéséből a 2.3. fejezetben. A 6. sorszámú előzetes kísérlet során jól látható a munkadarab falának elszakadása.

4.2.1. ERŐMÉRÉSEK EREDMÉNYEI

A mérési adatok szűrése

Az erőmérések 1000 Hz mintavételezési frekvenciával történtek. A mérési adatok szűrését MATLAB-ban végeztem el. Az adatok feldolgozásához és konvertálásához szükséges MATLAB kódok megírása során a szintaxisok és függvények felkutatására egyaránt használtam a MATLAB Help Center-ben elérhető dokumentációkat és a Chat-GPT segítségét. Az utóbbi által generált kód részleteket minden esetben javítanom és implementálnom kellett a saját felhasználásomra, de ezen másodlagos kódok írását így is jelentősen gyorsította. A szűréshez Gauss szűrőt használtam. A szűrést a „gausswin” és a „filter” függvények használatával valósítottam meg [29]. Az előbbi működése során minden adat körüli további 40 mérési adat értékét súlyozta a szoftver egy Gauss függvény – más néven normális eloszlás – szerint [30]. A Gauss függvény szórását be lehetett állítani a „gausswin” függvény második paraméterével. Én ezt a paramétert 5-re állítottam be. Ez a paraméter fordítottan arányos a normális eloszlás szórásával, így az általam beállított érték alapján a szórás viszonylag nagy, ami azt eredményezi, hogy kevésbé számítanak nagy súllyal az adott 40 pont középső adatai. A MATLAB az alábbi képlettel számítja ki a súlyozás együtthatóit [30]:

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\alpha \cdot \frac{n}{\frac{L-1}{2}}\right)^2} \quad (39)$$

Ahol:

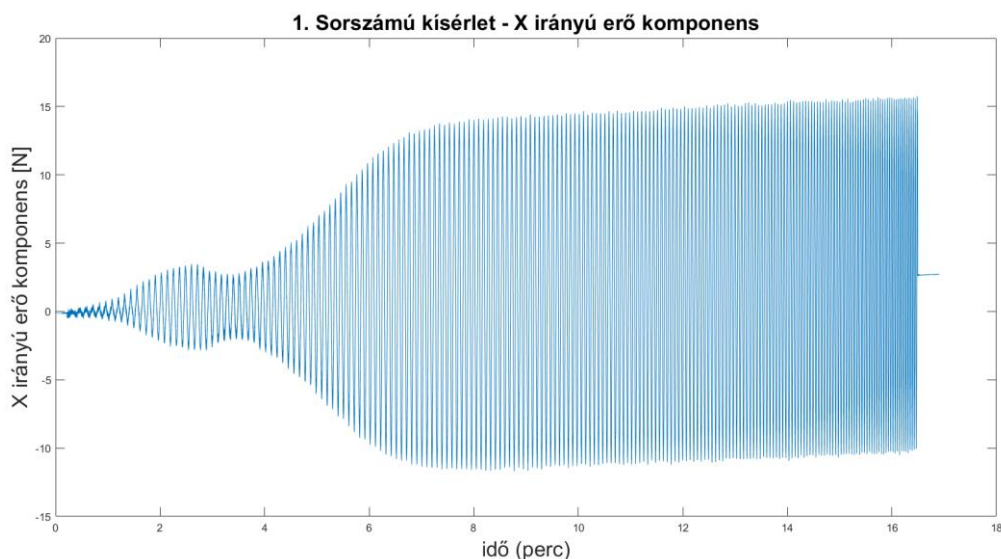
- α : A „gausswin” függvényben megadott második paraméter, ez fordítottan arányos a normális eloszlás szórásával, dimenziótlan.
- w : A „gausswin” függvény által kiszámított súlyozási együtthatók, dimenziótlan.
- L : A „gausswin” függvény első megadott paramétere, ez határozza meg a súlyozott pontok darabszámát, dimenziótlan.
- n : Az adott mérési pont és az eloszlás várható értékétől való előjeles távolságot jelenti, dimenziótlan.

Ezután az így kapott súlyozott pontok és az adott pont körüli eredeti 40 mérési adatot szűrtem a „filter” függvénnyel. Ez a függvény a „Z-transzformációs tartományban” a „racionális átviteli függvénnyel” szűri az adatokat [31] [32]. Ez az eredeti mérési pontokat kisimította, majd vissza transzformálta az időtartományba. Az így kapott adatok könnyebben átláthatóbbak lettek és jelentősen csökkent a mérési zaj. A következő fejezetben bemutatom a mérési eredményeket.

Mérési eredmények kiértékelése

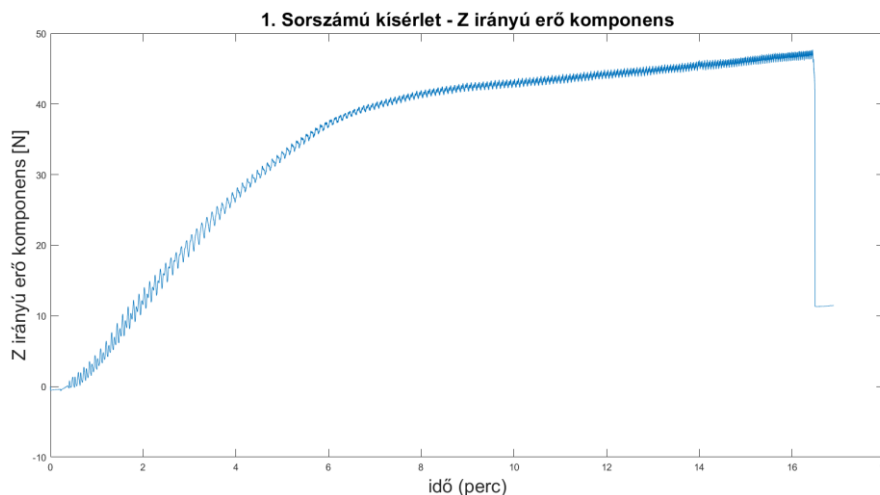
Az előkísérletek során elvégzett kísérletek mindegyike egy lépéses stratégia volt. Az erőmérések grafikonjai emiatt hasonló jelleget mutattak. A grafikonok közti eltérések

csak a maximális erőben voltak láthatóak. Az első előzetes kísérlet eredményeit az alábbi három ábrán mutatom be. Az alábbi ábrán az X irányú erőkomponense látható az első alakítási kísérletnek. Ekkor az oldalfal ferdeség 45° volt. Mivel az alakító erő feltehetőleg mindig ugyan olyan irányban áll a pálya érintőjéhez képest, ezért az X tengely irányú vetületében szinuszos jelet kaptam. A munkadarab csonkakúp, aminek lefelé csökken az átmérője. Mivel az előtolás és az egy körbefordulás alatti Δz süllyedés azonos, ezért kevesebb idő alatt tesz meg a szerszám egy körbefordulást a palást mentén, ezért látható a csökkenő hullámhossz az első kísérlet X irányú erőkomponensének ábráján. A szimmetria miatt az Y irányú erő mérése teljesen analóg eredményt adott az X irányú eredményével (90° fázistolással), ezért azt külön nem mutatom be.



20. ábra: 1. kísérlet X irányú erőkomponensének grafikonja

Az X és a Z irányú erőmérések eredményeiből látható, hogy az alakító erő növekedő trendet mutat az alakítás során. A Z irányú erő a keringés által meghatározott hullámzás kivételével szigorúan monoton növekedik. Ennek az egyik oka az alakítás során a már kialakított régiók felkeményedése lehet. A felkeményedésnek az az oka, hogy ahol a szerszám már elhaladt ott a munkadarabban már nagyobb feszültség van, mert már előre haladt a szakítógörbén. Ez azt jelenti, hogy ahol már képlékenyen alakult az anyag ott az felkeményedik és ezért nagyobb lesz a rugalmassági modulusa is, ami miatt nagyobb erő szükséges az ugyan olyan mértékű megnyújtásához, ezért egyre nagyobb erővel alakít a szerszám.



21. ábra: 1. kísérlet Z irányú erőkomponensének grafikonja

Másik lehetséges oka a növekedő erőnek az lehet, hogy a pályatervezést úgy valósítottam meg, hogy egységnyi Δz süllyedés alatt a szerszám mindig ugyan annyi körbefordulást tesz meg a paláston. Eközben palástnak lefelé haladva egyre kisebb átmérője van, ami miatt lefelé a kerülete egyre csökken. Ez azt eredményezi, hogy a kiterített paláston vizsgált pálya meredeksége növekedik (abszolút értékben) ahogyan a szerszám egyre mélyebbre süllyed a Z tengely mentén. Ez a növekedő meredekség a Z irányú erő növekedésének lehet magyarázata, az XY síkban értelmezett komponenseknek nem.

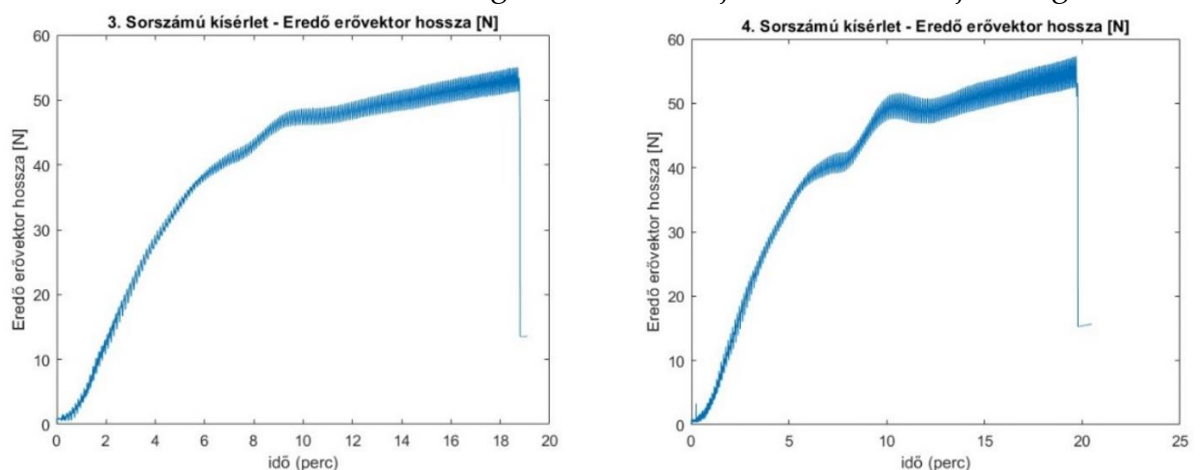
Harmadik lehetséges oka az erő növekedésnek a mérési hibából származhat. Mivel a piezoelektromos erőmérők kapacitív jellegűek, így azok idővel elveszítik a rajtuk létrehozott elektromos töltés szétválasztódást, ezért az idő telésével a mérési hibájuk növekedik [28].

Az X, Y, Z irányú vektor komponenseket összegeztem, majd az így kapott alakító erő hosszát kiszámoltam mérési pontonként. Ez az adott kísérletben végzett alakítást jobban összegzi, emiatt könnyebben összehasonlíthatóak így a kísérletek eredményei. Emiatt a későbbiekben csak az eredő vektor hossza alapján hasonlítottam össze a különböző kísérleteket. Az így kapott vektor hosszát elsősorban a Z irányú erőkomponens befolyásolta, mivel ez volt a legnagyobb a három komponens közül. Ezért a Z irányú erőkomponens grafikonjához nagyon hasonlít, csak nagyobb az eredő alakító erő vektor grafikonja, ami az alábbi ábrán látható.



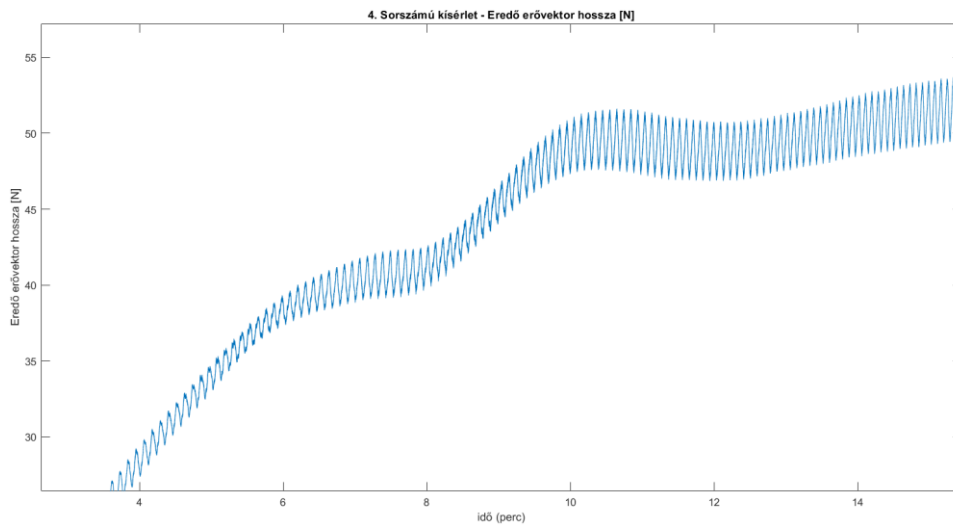
22. ábra: 1. kísérlet során fellépő eredő alakító erő grafikonja

A mérési adatokból kiszámított eredő erők grafikonjain egy érdekes jelenség figyelhető meg. A 6. perctől a 11. percig egy érdekes, szinuszos hullám szerű mintázat szuperponálódását véltem felfedezni az adatok kiértékelése során. A szakadás alapján meg tudtam állapítani, hogy ez nagyjából -6,5 mm mélységet jelent minden esetben, hiszen az előtolás azonos minden esetben, az eltérő oldal ferdeség pedig ezen becslés hibáját kis mértékben növeli csak. Részletesebben a mintázat egy $-\sin(x)$ -hez hasonlító függvényre emlékeztet, ami a mérési görbére szuperponálódik. Változó mértékben, de ez a mintázat szinte az összes erőmérés grafikonján fellelhető maradt a későbbi kísérletek során is, közel azonos idő intervallumban. Az alábbi ábrákon a 3. és a 4. sorszámú mérésekhez tartozó grafikonokon is jól kivehető ez a jelenség.



23. ábra: A hullámszerű jelenség a 6. és a 11. percek között a 3. és 4. kísérletek során

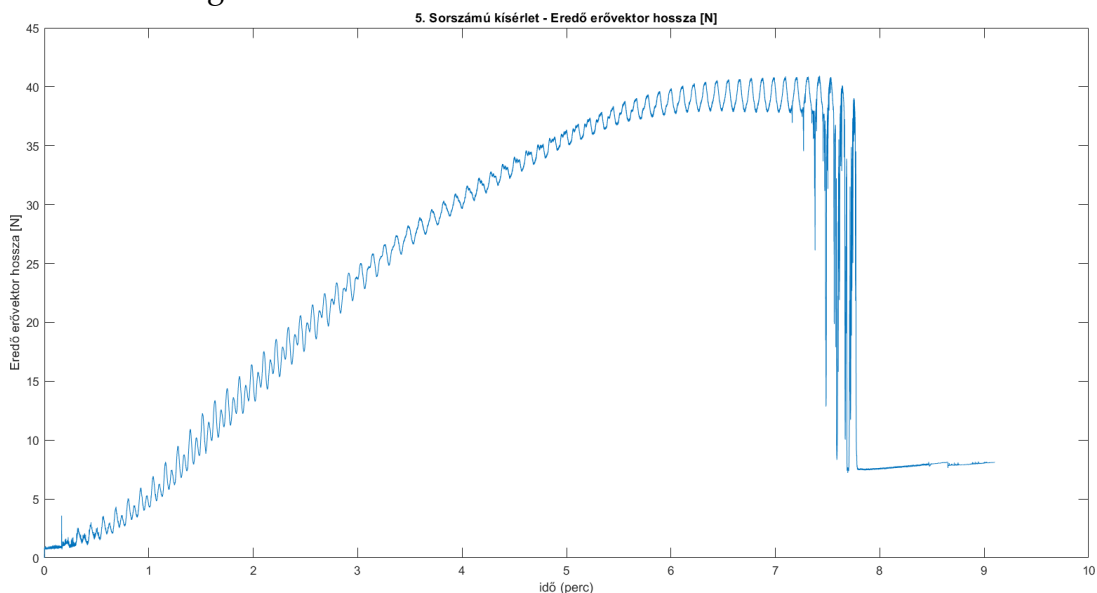
Az alábbi ábrán kinagyítva is látható a 4. sorszámú mérés során a tárgyalt jelenség:



24. ábra: A hullámszerű jelenség nagyított ábrája a 4. kísérletek során

Feltételezésem szerint ennek a jelenségnek egy lehetséges oka a fémek szakítógörbéjén a rugalmas és a plasztikus alakváltozás közötti feszültség csökkenés lehet. Ezen jelenség okainak feltárása azonban további kutatást igényelhet.

Az 5. kísérlet volt az első kísérlet, ami során a munkadarab fala elszakadt. A szakadás a hullámszerű erő ingadozás elején, -6,6 mm mélyen történt. Minden kísérlet során, amikor a munkadarab oldalfala elszakadt, a szakadás előtti néhány másodpercben az alakító erő jelentős ingadozást mutatott. Ez az eredő erő diagramján is jól látható, a 26. ábrán. Ez a szakadás előtti intenzív erőingadozás volt az oka annak, hogy az első 13 kísérlet során mértük a szerszám rezgéseit is az iTENDO típusú rezgés-mérő szerszámbefogóval.



25. ábra: Az ötödik kísérlet, ami során már elszakadt a munkadarab fala

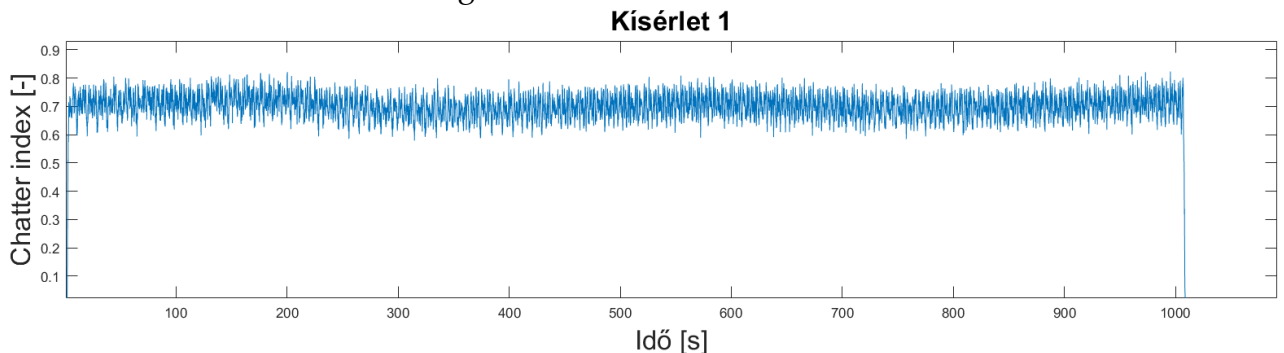
4.2.2. A REZGÉSMÉRÉSEK EREDMÉNYEI

A rezgésmérések elvégzéséhez az alakító szerszámot egy SCHUNK gyártmányú, gyorsulás mérő szenzorokkal rendelkező szerszám befogóba rögzítettük. A szerszám befogó akkumulátorról kapta a tápfeszültséget. A szerszám befogó a mérési adatokat a gyártó által biztosított tabletre vezeték nélküli kommunikációval küldte. Ezen okokból semmilyen vezetékes összeköttetésre nem volt szükség a rezgések méréséhez. A rendszer 0,1 másodperces időközönként rögzítette a mérési adatokat [33]. A szenzoros szerszám befogó az alábbi ábrán látható:



26. ábra: iTENDO rezgésmérő szerszámbefogó [33]

Sajnos a várakozásokkal ellentétben a rezgésmérések eredményeiből nem voltak kivethetőek a tranziens jelenségek, amik az erőmérések esetében a szakadás kezdetét jelezték. A rezgések Fourier-transzformáltjának időbeli változása alapján sem volt észrevehető a szakadás. A szakadás előjelzésére megbízhatóbb és egyértelműbb információt biztosít az alakító erő mérése. Ezért amennyiben ennek az előrejelzése a cél, a saját eredményeim alapján az erőmérést javaslom a szerszám rezgésének mérése helyett. Az első kísérlethez tartozó rezgésmérések az alábbi ábrán láthatóak:



27. ábra: Az első alakítási kísérlet rezgés mérési adatai

4.3. Az első többlépéses alakítási kísérletek

Az első többlépéses alakítási kísérletek során azonos alapsíkú és szimmetria tengelyű, de különböző α oldalfal ferdeségű csonkakúp felületeken haladó spirálpályákat generáltam. A szerszámpályákat kísérleti úton teszteltük a CNC megmunkáló központtal, a kisebb oldalfal ferdeségtől 5°-os növekményekkel fokozatosan haladva a nagyobb oldalfal ferdeség irányába. A pályatervezés során kétlépéses és háromlépéses alakítási stratégiákat is kidolgoztam.

Fontos jellemzője ennek a fajta pályagenerálásnak, hogy az egymás után következő lépések kiinduló pontja azonos, míg a végső pontjuk különböző. Ez azt eredményezi, hogy az egymást követő lépések a munkadarab felső síkjából nem von be több anyagot az alakításba. A csonkakúp alsó felületéből azonban bekerül többletanyag az alakítási folyamatba. Az eredményekből kiderült, hogy ez sikeresen megnövelte az oldalfal vastagságát, mivel annak alakíthatósági határa megnövekedett.

Az előzetes kísérletek elvégzése után elkezdtük az egyszerűbb többlépéses inkrementális lemezalakítási kísérleteket. Ezen kísérletek során a 3.1 fejezetben ismertetett matematikai leírást és MATLAB kódokat kombináltam olyan módon, hogy az egyik lépésben kialakított kúp oldalfal ferdeségét megnöveltem, és az így kapott meredekebb kúpot alakítottam ki a következő lépés során. A paraméteresen definiált matematikai leírás és MATLAB kódok miatt ez többlépéses pályagenerálás rendkívül egyszerű és hatékony volt. Az 5. táblázatban láthatóak a kísérletek eredményei.

5. táblázat: Első többlépéses alakítási kísérletek eredményei

Mérés sorszáma	Lépések száma	Oldalfal ferdeség	Elszakadt?
7.	2	60° (1. lépés)	nem
8.		65° (2. lépés)	nem
9.	2	60° (1. lépés)	nem
10.		70° (2. lépés)	igen
11.	3	60° (1. lépés)	nem
12.		65° (2. lépés)	nem
13.		70° (3. lépés)	igen

Az eredményekből látszik, hogy az alkalmazott kétlépéses alakítási stratégiával az $\alpha_{\text{krit}} = 60^\circ$ -os alakíthatósági határt sikeresen kibővítettük, mivel sikeresen kialakítottuk a $\alpha = 65^\circ$ -os oldalfal ferdeségű csonkakúpot. A háromlépéses stratégiához tartozó 11.-13. sorszámú kísérletek eredményéből látható, hogy az egymás után kialakított kúpok stratégiájának az alakíthatósági határa 65° -os oldalfal ferdeség.

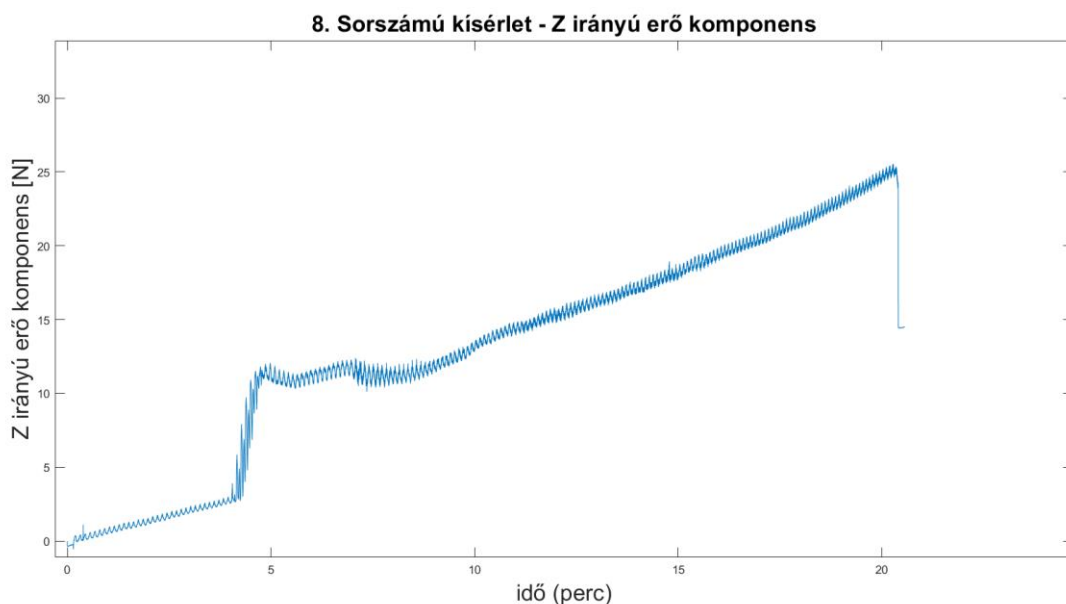
A többlépéses alakítás során jelentkeztek a lépcsőzetes hibák a munkadarab alján. A szakirodalom kutatása során erről a jelenségről értesültem, így ez mások megfigyelését ismételten alátámasztja. Ez a geometriai hiba az alábbi ábrán látható:



28. ábra: Lépcsőzetes hiba a 8. kísérlet végén

4.3.1. AZ ELSŐ TÖBBLÉPÉSES STRATÉGIA ERŐMÉRÉSÉNEK EREDMÉNYEI

Az előzetes inkrementális alakítási kísérletek erőmérései során tapasztaltakkal azonos összefüggéseket tudtam megállapítani ezen többlépéses alakítások eredményeiről is. A hullámszerű jelenség itt is jelen volt, ami ugyanúgy nagyjából -6,5 mm mélységtől indulva nagyjából -14 mm-ig tartott. Ezen kívül azonban első lépés utáni összes többi lépés erőmérési diagramja jelentősen eltért az első lépések diagramjaitól. Ennek a lehetséges oka az, hogy az előgyártmány geometriája is jelentősen eltér a két esetben, hiszen az első lépés során egy éppen olyan mélységű csonkakúp, ahol a szerszám tart, míg a későbbi alakítási lépések során már egy -20 mm mélységű, de kisebb oldalfalú csonkakúpot alakít a szerszám. Az első lépések diagramjaihoz képest még azt a különbség látható, hogy azok konkáv jellegűek voltak, míg a nem első lépések grafikonjai inkább lineáris, vagy minimálisan konvex jelleget mutattak. A lineáris növekedésnek az oka az oldal irányú fogásvétel lineáris növekedése lehet. Ez azért van, mert a két különböző oldalfal ferdeségű kúp átmérője közötti különbség is a Z irányú süllyedés közben lineárisan növekedik. A 8. kísérlet erőmérésének grafikonja az alábbi ábrán látható:



29. ábra: A 65°-os oldalfal ferdeségű kúp kialakításának második lépése

4.4. A sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia kísérleti eredményei

A 3.2. fejezetben ismertetett többlépéses pályatervezési stratégiát öt kísérlettel teszteltük. A 4.3. fejezetben ismertetett többlépéses stratégiához képest ebben az esetben már jelentősen több pálya paraméter megadására volt lehetőség. A pályagenerálás négy paraméterének változtatásával jelentősen eltérő pályákat tudtam létrehozni. A kísérletek paraméterei és eredményei az alábbi táblázatban láthatóak:

6. táblázat: A sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia kísérleti eredményei

Mérés sorszáma	Oldalfal ferdeség	β	Δz [mm]	$L_{\text{sík}}$ [-]	$L_{\text{térbeli}}$ [-]	Elszakadt?
2.1.	65°	0,5°	0,1	2	2	igen
2.2.	65°	2,2°	0,7	4	2	igen
2.3.	65°	10°	3	15	15	igen
2.4.	65°	6°	2	15	20	igen
2.5.	65°	6°	1	15	20	igen

Ehhez a stratégiához tartozó összes kísérlet során $\alpha = 65^\circ$ oldalfal ferdeségű munkadarab kialakítását tűztem ki célul, mivel az előző fejezetben olvasható többlépéses stratégiával már sikeresen ki tudtuk alakítani az $\alpha = 65^\circ$ oldalfal ferdeségű kúpot.

Mind az öt kísérlet során a munkadarab fala elszakadt. Az 2.1. és 2.2. sorszámú kísérletek során közelítőleg 7,7 mm mélyen szakadt el a munkadarab. Ebből a két kísérlet eredményéből arra következtettünk, hogy ennek a túl kicsi Δz érték az oka. A nagyobb Δz azt eredményezi, hogy kevesebb darabszámú számú, de nagyobb értékű fogásvétellel alakítja ki a szerszám a munkadarabot. Az ezt követő kísérletek pályagenerálása

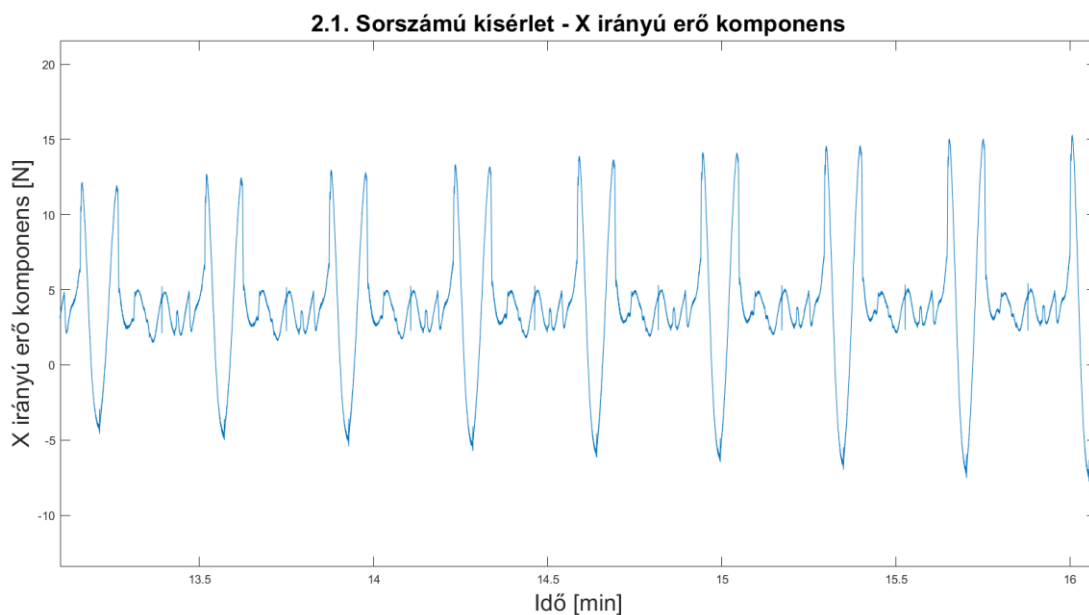
során nagyobb Δz értéket alkalmaztam. Lehetséges, hogy ezen paraméter állítása miatt történt a szakadás a további három kísérlet során mélyebben.

A 2.3., 2.4. és 2.5. kísérletek során a fal elszakadása 12,5 mm, 12,0 mm és 10,1 mm mélyen történt. A nagyobb $L_{\text{sík}}$ és $L_{\text{térbeli}}$ paraméterek alkalmazásának a nagyobb Δz érték megadása volt az oka, mivel a nagyobb fogásvétel miatt a több anyagot célszerűbb hosszabb pályán mozgatni az anyagot a kisebb átmerőről a nagyobbra.

Ezen stratégiához tartozó minden kísérlet során elszakadt a munkadarab fala, de érdemes lenne további kísérleteket végezni nagy Δz érték használatával, míg a többi paramétert változtatva, azok hatását jobban meg lehetne vizsgálni. Erről a stratégia használhatóságáról csak akkor lehetne tényleges ítéletet mondani, ha a kísérletek során meg lehet vizsgálni az optimális pályatervezési paraméterek hatását is.

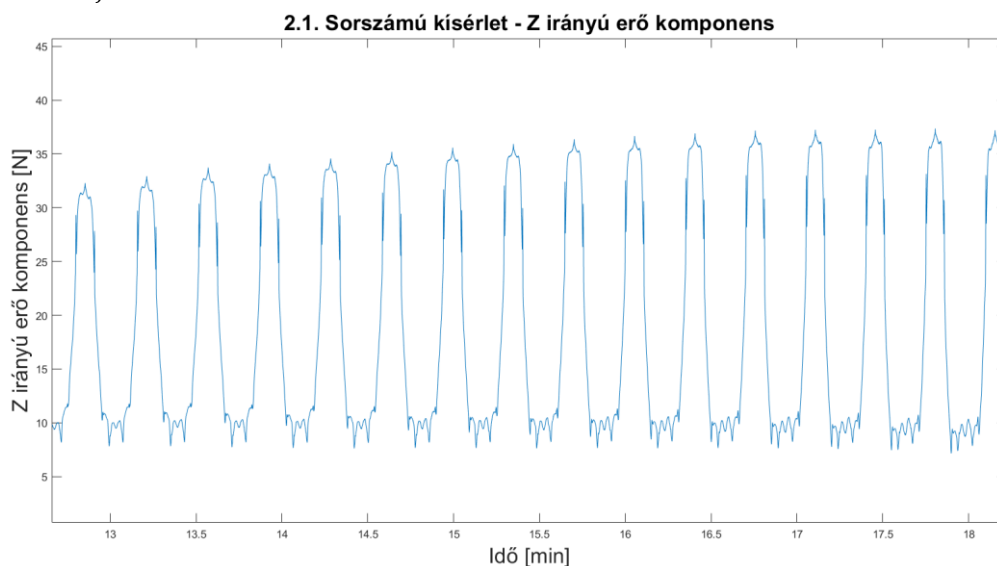
4.4.1. A STRATÉGIA ERŐMÉRÉSI EREDMÉNYEI

Az erőmérések során egyértelműen megállapítható volt, hogy a nagyobb Δz értékű süllyedés nagyobb XY síkbeli erőket eredményez a nagyobb fogásvétel miatt. Az adatok szűréséhez ebben az esetben a „gausswin” függvény első paraméterének 60 értéket adtam meg, míg a másodiknak 5-öt, mert a korábbi kísérletekhez képest más jellegű volt a mérési zaj, emiatt az eredeti szűrés paramétereit használva több szűretlen zaj maradt volna a mérési eredményekben. Az alakító erők X irányú komponensének grafikonján látható, hogy amikor a szerszám az XY síkban lévő sík spirális mozgást végzi, akkor az X irányú erő jelentősen megnövekedik, míg a szerszám térbeli spirális mozgása közben pedig lecsökken, ez kinagyítva látható a 28. ábrán. Ez azt az elméletet támasztja alá, miszerint a síkbeli spirális mozgással anyagot mozgatunk a munkadarab szimmetria tengelyének irányából kifelé haladva. Ezt akartam elérni ezzel a pályatervezési stratégiával, azonban ez a fal elszakadásából következőleg mégsem növelte meg elegendő mértékben a falvastagságot.



30. ábra: A 2.1. sorszámú kísérlet eredményei, nagyított ábra

A Z irányú erővektor komponens grafikonján látható, hogy amikor a szerszám a térbeli spirálon halad, akkor nyomja lefelé az anyagot, ezért nagy Z irányú erő ébred, míg amikor a szerszám a síkbeli spirális pályán halad, akkor a Z irányú erő jelentősen kisebb. Ennek az az oka, hogy a síkbeli spirális pályán haladva szerszám főleg oldalirányba nyomja az anyagot, lefelé nem. Az alábbi ábrán látható a Z irányú komponens nagyított ábrája.



31. ábra: A 2.1. sorszámú kísérlet Z irányú erő komponensének nagyított ábrája

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakirodalmi kutatás során megismertem és részleteztem az inkrementális lemezalakítás technológiájának alkalmazhatóságát, különös tekintettel az egyponthoz inkrementális lemezalakításra.

A dolgozat elkészítése során kidolgoztam a különböző pályák és többlépéses alakítási technológiák matematikai leírását. A térbeli szerszámkorrekció analitikus kidolgozásának célja részben az volt, hogy ezzel a matematikai absztrakcióval könnyen alkalmazható a módszer tetszőleges bonyolultságú felületekhez is. Emellett nem szükséges azonos szerszám alkalmazása sem, hiszen annak geometriáját is paraméteresen adtam meg. Ezek után a MATLAB-ban készítettem olyan kódokat, amikkel eredményesen használni tudtam a pályák matematikai modelljeit, különös tekintettel a térbeli szerszámkorrekcióra. Ezekkel a MATLAB kódokkal különböző pályák paraméterek megadása után gyorsan és hatékonyan tudtam generálni a különféle szerszámpályákat. Az összes generált G kód hiba nélkül és a tervezett módon működött a CNC vezérlésű szerszámgépen. A pályatervezési munkáim így sikerrel jártak.

A dolgozat céljából kitűzött alakíthatósági határ bővítése sikerült az első többlépéses alakítási módszerrel. Ez a stratégia így egyszerűbbnek és hatékonyabbnak bizonyult a második stratégiához viszonyítva. A második kidolgozott többlépéses alakítási módszer alkalmazásával az alakíthatósági határ kibővítése nem járt sikerrel. Ennek részben az is az oka, hogy az ezzel a stratégiával végzett öt kísérlet feltételezésem szerint nem volt elegendő a pályaparaméterek optimális beállításához, így elképzelhető, hogy nem a legmegfelelőbb paraméterkombinációkat alkalmaztam a kísérletek során.

A szakirodalom kutatása során fellépő geometriai hibát sikeresen alá tudtam támasztani a saját kísérleteimmel is. Továbbá jelentősen fejlődött a MATLAB tudásom a feladat kidolgozása során.

Az első többlépéses pályatervezési stratégia sikeres volt, azonban a szakirodalom felkutatása során levont következtetéseim alapján az itt elért 65° -os oldalfal ferdeség tovább növelése nem lehetséges ugyanezt a módszert alkalmazva. A második többlépéses pályatervezési módszert alkalmazva lehetséges, hogy más pályaparaméter választás mellett az alakíthatósági határ tovább bővíthető. Továbbá az erőmérések során tapasztalt hullámszerű jelenség pontos okainak meghatározása hasznosnak bizonyulhat az inkrementális lemezalakítás mechanikai és anyagtudományi modelljének fejlesztésére vagy validálására.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] M. Tisza and P. Kovács, 'INNOVATÍV ALAKÍTÓ ELJÁRÁSOK – INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁS'. GÉP, LXI. évfolyam, 2010., 2010.
- [2] I. Paniti, 'A lemezalapú gyors prototípusgyártás új módszerei'. Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, 2014. [Online]. Available: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2014/honlap/Paniti_Imre_hu.htm
- [3] H. K. Nirala, P. K. Jain, J. J. Roy, M. K. Samal, and P. Tandon, 'An approach to eliminate stepped features in multistage incremental sheet forming process: Experimental and FEA analysis', *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 2, pp. 599–604, Feb. 2017, doi: 10.1007/s12206-017-0112-6.
- [4] M. Skjoedt, N. Bay, B. Endelt, and G. Ingarao, 'Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup', *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. 1, pp. 1199–1202, Apr. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0156-3.
- [5] J. Verbert *et al.*, 'Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming', *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. 1, pp. 1203–1206, Apr. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0157-2.
- [6] S. Wu, Y. Ma, L. Gao, Y. Zhao, S. Rashed, and N. Ma, 'A novel multi-step strategy of single point incremental forming for high wall angle shape', *J. Manuf. Process.*, vol. 56, pp. 697–706, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.009.
- [7] B. Marton, 'A szerszámpálya hatásának kísérleti vizsgálata egy pontos inkrementális lemezalakítás során', BME, Budapest, 2024.
- [8] W. C. Emmens, G. Sebastiani, and A. H. Van Den Boogaard, 'The technology of Incremental Sheet Forming – A brief review of the history', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 8, pp. 981–997, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014.
- [9] T. McAnulty, J. Jeswiet, and M. Doolan, 'Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art', *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 43–54, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.cirpj.2016.07.003.
- [10] Sherwan Mohammed Najm], 'Parametric Effects of Single Point Incremental Sheet Forming', Doktori értekezés, BME, 2022.
- [11] T. Trzepieciński, V. Oleksik, T. Pepelnjak, S. M. Najm, I. Paniti, and K. Maji, 'Emerging Trends in Single Point Incremental Sheet Forming of Lightweight Metals', *Metals*, vol. 11, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/met11081188.
- [12] I. Paniti, 'New Solutions in Incremental Sheet Forming', PhD Disszertáció, BME, Budapest, 2014.
- [13] E. Ndip-Agbor *et al.*, 'Optimization of Relative Tool Position in Accumulative Double Sided Incremental Forming Using Finite Element Analysis and Model Bias Correction', *Int. J. Mater. Form.*, vol. 9, Jan. 2015, doi: 10.1007/s12289-014-1209-4.
- [14] SmarterEveryDay, *ROBOFORMING: The Future of Metalworking? (I Had NO IDEA This Was Possible) - Smarter Every Day 290*, (Sep. 16, 2023). Accessed: Oct. 23,

2024. [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=dCXu8Ju_fdY
- [15] T. J. Grimm and L. Mears, 'Investigation of a radial toolpath in single point incremental forming', *Procedia Manuf.*, vol. 48, pp. 215–222, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.040.
 - [16] F. Maaß, M. Hahn, and A. E. Tekkaya, 'Interaction of Process Parameters, Forming Mechanisms, and Residual Stresses in Single Point Incremental Forming', *Metals*, vol. 10, no. 5, Art. no. 5, May 2020, doi: 10.3390/met10050656.
 - [17] C. Su *et al.*, 'Research on the effects of machining paths and variable parameters of different passes on defects in multi-pass single-point incremental forming', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 131, no. 9, pp. 4663–4682, Apr. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13292-6.
 - [18] Z. Yan *et al.*, 'Multistage Tool Path Optimisation of Single-Point Incremental Forming Process', *Materials*, vol. 14, no. 22, Art. no. 22, Jan. 2021, doi: 10.3390/ma14226794.
 - [19] E. Ndip-Agbor, P. Cheng, N. Moser, K. Ehmann, and J. Cao, 'Prediction of rigid body motion in multi-pass single point incremental forming', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 269, pp. 117–127, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.02.007.
 - [20] Y. H. Kim and J. J. Park, 'Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130–131, pp. 42–46, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00788-4.
 - [21] A. Bansal, R. Lingam, S. K. Yadav, and N. Venkata Reddy, 'Prediction of forming forces in single point incremental forming', *J. Manuf. Process.*, vol. 28, pp. 486–493, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.016.
 - [22] 'Aluminum 3003-O'. Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fd4a40f87d3f4912925e5e6eab1fbc40&n=1&ckck=1>
 - [23] '3103 Aluminium Technical Datasheet'. Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/3xxx/3103.pdf>
 - [24] 'Aluminum 3004-H38'. Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e836f33f9ee74daeb5735745c88255e6
 - [25] Erdős F., 'NC irányítás és programozás', vol. 5. NC Marás, p. 20.
 - [26] NCT Ipari Elektronikai kft., 'Marógép és megmunkáló központ vezérlő Programozási leírás'. 0 29, 2002.
 - [27] F. Erdős, 'NC irányítás és programozás-2. NC Gépek modellezése',
 - [28] B. Farkas, 'Gyártási mérés technika 7. előadás, Folyamat mérés'. BME, Apr. 26, 2024.
 - [29] Chunru, 'MathWorks, MATLAB Answers, "How to do Gaussian Filter 1D?"', MathWorks, MATLAB Answers. Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available:

- https://jp-mathworks-com.translate.goog/matlabcentral/answers/1608600-how-to-do-gaussian-filter-1d?_x_tr_sl=ja&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc
- [30] *MATLAB, Help Center, gausswin Documentation*. 1994-2024 The MathWorks, Inc.
- [31] 'Z-transform', *Wikipedia*. Nov. 01, 2024. Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Z-transform&oldid=1254671101>
- [32] *MATLAB, Help Center, filter Documentation*. 1994-2024 The MathWorks, Inc.
- [33] 'iTENDO²', *SCHUNK*. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: https://schunk.com/de/en/tool-clamping-technology/toolholders/tendo-hydraulic-expansion-toolholder/itendo2/c/PGR_6468

7. SUMMARY

During the literature research, I explored and detailed the applicability of incremental sheet metal forming technology, with special emphasis on single-point incremental sheet forming. While working on the thesis, I developed the mathematical description of different paths and multi-step forming strategies. The aim of the analytical development of spatial tool correction was partly to make the method easily applicable to surfaces of any complexity with this mathematical abstraction. Moreover, it is not necessary to use the same tool, as I also defined its geometry parametrically. After that, I created codes in MATLAB with which I could effectively use the mathematical models of the paths, with particular emphasis on spatial tool correction. With these MATLAB codes, after specifying different path parameters, I was able to quickly and efficiently generate various tool paths. All the generated G-codes operated without error and as planned on the CNC-controlled machine tool. Thus, my path planning work was successful.

The extension of the formability limit set as the goal of the thesis was achieved with the first multi-step forming strategy. This strategy proved to be simpler and more effective compared to the second strategy. The extension of the formability limit using the second developed multi-step forming method was not successful. This is partly because, according to my assumption, the five experiments conducted with this strategy were not sufficient to optimally set the path parameters, so it is possible that I did not apply the optimal parameter combinations during the experiments.

I was able to successfully substantiate the geometric error encountered during the literature research with my own experiments. Furthermore, my MATLAB skills improved significantly during the development of the task.

The first multi-step path planning strategy was successful, but based on my conclusions drawn during the literature review, further increasing the 65° sidewall inclination achieved here is not possible using the same method. Using the second multi-step path planning method, it is possible that with different path parameter selection, the formability limit could be further expanded. In addition, determining the exact causes of the wave-like phenomenon experienced during force measurements could prove useful for the development or validation of the mechanical and material science models of incremental sheet metal forming.