



SAPIENTIA
ERDÉLYI MAGYAR
TUDOMÁNYEGYETEM
Marosvásárhelyi Kar

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

FORGÁCSOLÁSI ERŐKOMPONENSEK MÉRÉSE ESZTERGÁLÁSKOR

Konzulens Dr. Gergely Attila Levente

Egyetemi Docens

Szerzők Dénes Dávid

Gépészmérnöki szak, IV. évfolyam

Keresztes Kristóf

Mechatronika szak, IV. évfolyam

Marosvásárhely, 2024

SAPIENTIA ERDÉLYI MAGYAR TUDOMÁNYEGYETEM

FORGÁCSOLÁSI ERŐKOMPONENSEK MÉRÉSE ESZTERGÁLÁSKOR
MEASUREMENT OF CUTTING FORCE COMPONENTS DURING
TURNING

Dénes Dávid

Keresztes Kristóf

Konzulens:

Dr. Gergely Attila Levente

Abstract

The aim of this thesis is to design and build a device that is capable of simultaneous measurement of all three components of the cutting force during turning operations. Knowledge of the cutting force is essential for the optimisation of machining processes and the design of the cutting tool. The equipment designed is a laboratory tool that allows students to observe the effect of different cutting parameters on the components of the cutting force. The device provides the possibility to hold a cutting tool in such a way that displacement in all three directions is possible during cutting. The three force components are measured by three load cells, whose signals are processed by three HX-711 amplifiers and an ESP32 based microcontroller. The user interface was developed using the National Instruments LabVIEW software, which allows visualisation and output of the measured values.

Keywords: turning, cutting force, load cell, design, machining.

Kivonat

A dolgozat célja egy olyan berendezés tervezése és kivitelezése, amely képes a forgácsolási erő mindhárom komponensének szimultán mérésére esztergálási megmunkálás során. A forgácsolási erő ismerete elengedhetetlen a megmunkálási folyamatok optimalizálásához, illetve a forgácsolási szerszám tervezéséhez. A tervezett berendezés egy olyan laboratóriumi eszköz, amely segítségével a hallgatók megfigyelhetik a különböző forgácsolási paraméterek hatását a forgácsolási erő komponenseire. A berendezés lehetőséget ad egy fogácsoló szerszám befogására, oly módon, hogy mindhárom irány menti elmozdulás lehetséges legyen a fogácsolás során. A három erőkomponenst három erőmérő cella hivatott mérni, melyek jeleinek feldolgozhatóságáért három darab HX-711 típusú erősítő felel, illetve egy ESP32 alapú mikrovezérlő. A felhasználó felület a National Instruments LabVIEW programjával készült el, mely segítségével vizualizálhatjuk és kimenthetjük a mért értékeket.

Kulcsszavak: esztergálás, forgácsolási erő, erőmérő cella, tervezés, megmunkálás.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezető	9
1.1.	A forgácsolás	9
1.1.1.	A forgácsolásról általánosan	9
1.1.2.	Forgácsolási eljárások	9
1.1.3.	A forgácsolási folyamat, mozgások	11
1.2.	A forgácsolási erő	15
1.2.1.	Szabad forgácsolás esete	15
1.2.2.	Kötött forgácsolás esete	16
1.3.	A forgácsolási erő meghatározásának módszerei	18
1.3.1.	Mérésekkel, kísérleti úton történő meghatározás.....	18
1.4.	Forgácsolási erő mérésével kapcsolatos cikkek feldolgozása.....	21
1.4.1.	Egy dinamométer tervezése a vágóerők méréséhez esztergálás esetén	21
1.4.2.	Forgácsolási erő mérésére szolgáló dinamométer fejlesztése esztergálási megmunkálásokhoz	22
1.4.3.	Dinamométer tervezése és építése, a szerszám homlokszögének hatása a forgácsolási erőre	22
1.4.4.	Háromtengelyes dinamométer tervezése és kialakítása keresztpánt típusú érzékelők felhasználásával	23
1.4.5.	Három komponensű dinamométer fejlesztése az esztergálás során fellépő forgácsolóerő méréséhez	24
2.	A tervezett forgácsolási erőmérő berendezés bemutatása	24
2.1.	A forgácsolási erőmérő berendezés működése.....	24
2.2.	Az erőmérő felépítése.....	26
2.2.1.	A külső egység	26
2.2.2.	A belső „mag” egység.....	28

2.2.3.	A lineáris csapágysak	29
2.2.4.	Az erőmérő cellák	31
2.2.5.	Jelfeldolgozó egység	32
2.3.	A program	34
2.3.1.	Definiálás	34
2.3.2.	Setup	35
2.3.3.	Végtelen ciklus	36
2.4.	LabVIEW	37
2.5.	A szenzorok kalibrálása	39
2.6.	Kritikusan igénybevett elemek ellenőrzése	41
2.6.1.	A késtartó csap ellenőrzése	41
2.6.2.	A külső egység ellenőrzése	45
2.6.3.	A csavarok ellenőrzése	47
2.7.	Mérési eredmények, következtetések	49
3.	Irodalomjegyzék	52

Ábrajegyzék

1.ábra: Az egyetemes eszterga gép felépítése [2].....	11
2.ábra: Előtolás és fogásmélység [1].....	12
3.ábra: Forgácsoló sebességek esztergálás esetén.....	13
4.ábra: Forgácsolási sebességek ábrázolása komplex generálógörbájű munkadarab esetén [1] ...	15
5.ábra: Forgácsolási erőviszonyok szabadforgácsolás esetén [1]	16
6.ábra: A forgácsoló erő komponensei kötött forgácsolás esetén.....	17
7.ábra: Mechanikus erőmérő berendezés elvi vázlata [1]	19
8.ábra: Hidraulikus erőmérő berendezés elvi vázlata [1].....	19
9.ábra: Az általam tervezett villamos erőmérő berendezés működési vázlata	20
10.ábra: Forgácsoló erőmérő berendezés	25
11.ábra: A külső egység robbantott nézete	27
12.ábra: A belső egység robbantott nézete	28
13.ábra: MGN 9C típusú lineáris csapágyak [3]	30
14.ábra: A lineáris csapágyak méretei [3]	30
15.ábra: RC15-5 típusú erőmérő cella [4]	31
16.ábra: Kapcsolási rajz	33
17.ábra: Az elektronikai doboz,	34
18.ábra: LabVIEW interfész	38
19.ábra: A valós erő kiszámítása	39
20.ábra: Az 1-es szenzor hitelesítési görbéje	40
21.ábra: A 2-es szenzor hitelesítési görbéje	40
22.ábra: A 3-as szenzor hitelesítési görbéje	41
23.ábra: A késre ható nyomaték	42
24.ábra: A csapra ható eredő erő	43
25.ábra: A csap ellenőrzése hajlításra	43
26.ábra: A csap elhajlása	44
27.ábra: A csap ellenőrzése nyírásra	44
28.ábra: Ellenőrzés elmozdulásra	46
29.ábra: Feszültségek alakulása	47

30.ábra: Ellenőrzés nyírásra.....	48
31.ábra: Ellenőrzés húzásra.....	48
32.ábra: Mérési eredmények 0.32 mm/fordulat-os előtolás mellett.....	50
33.ábra: Mérési eredmények 0.56 mm/fordulat-os előtolás mellett.....	51

1. Bevezető

1.1. A forgácsolás

1.1.1. A forgácsolásról általánosan

A forgácsleválasztás által történő megmunkálás kezdete visszanyúlik egészen az ősidőig, amikor is a fából vagy kőből készült eszközökkel történő megmunkálás egyfajta forgácsolási folyamatot jelentett. A ma is jól ismert ipari forgácsolás csak jóval később jelent meg a 18. – 19. században az ipari forradalom során, mely magával hozta a gépek és gyártási eljárások rohamos fejlődését.

Számos módszert különböztethetünk meg a munkadarab kívánt alakjának megvalósítására. Ezek közül az egyik fő módszer a fölösleges anyag eltávolításával való megmunkálás, vagy más néven a forgácsolás, amely a termelési folyamatok közül az egyik legfontosabb és legelterjedtebb technológia a fémek és más kemény anyagok megmunkálására.

A forgácsolás az a megmunkálási eljárás, amely során anyagot távolítanak el egy munkadarabról a kívánt alak, méret és felületi minőség eléréséhez. Számos típusa létezik, mint például az esztergálás, marás, köszörülés, fúrás stb. Minden típusnak megvan a maga előnye és felhasználási területe. A technológia fejlődésével, valamint a CNC (*Computer Numerical Control*) szerszámgépek megjelenésével a forgácsolás sokkal hatékonyabb, gyorsabb és pontosabb folyamat lett, ezzel lehetővé téve a komplex geometriájú és szigorú minőségi követelményeknek megfelelő alkatrészek gyártását.

Dr. Hollanda Dénes „A forgácsolás alapjai” című könyvében nagyon szépen megfogalmazta, hogy tulajdonképpen mi is az a forgácsolás, mégpedig: „*Forgácsolási megmunkálás folyamán generálják a munkadarabot határoló felületet vagy felületeket.*” [1]

Összességében a forgácsolás a modern nyersanyag megmunkálás kulcsfontosságú elemévé vált, mely lehetővé teszi különféle termékek jó minőségű, pontos és relatív egyszerű gyártását, ezzel hozzájárulva a különböző iparágak fejlődéséhez.

1.1.2. Forgácsolási eljárások

Esztergálás, marás és fúrás, ezek a legelterjedtebb és leggyakrabban használt forgácsolási módszerek. Jellemző rájuk az univerzalitás és a sokoldalúság, magas pontosságot és részletes megmunkálást tesznek lehetővé. Ezen eljárásokhoz rendelkezésre álló szerszámválaszték

sokrétűsége lehetővé teszi a munkadarab igényeihez való alkalmazkodást. E három eljárás mellett megemlíthetjük még a vésést, gyalulást, üregelést, köszörülést, szikraforgácsolás, fogaskerék megmunkálás. Ez csupán néhány példa a forgácsolási eljárások széles skálájából.

Mivel az általam tervezett berendezés a forgácsolási erő mérésére fog szolgálni esztergálás közben, a továbbiakban a számos forgácsolási eljárás közül az esztergálást vesszük górcső alá és tárgyalom részletesebben.

1.1.2.1. Az esztergálás

Az esztergálás az egyik legrégebb forgácsolási folyamat, melynek célja az adott nyersanyag kívánt alakra és méretre levő alakítása egy adott felületi minőség mellett. Ez a technika rendkívül széles körben alkalmazható és szinte bármilyen kemény anyag forgácsolására képes, mint például fa, fémek vagy akár műanyagok megmunkálása. A folyamat során a munkadarabot az esztergagép forgó részéhez rögzítik majd egy forgácsolószerszámmal (esztergakés) eltávolítják a fölösleges anyagot, létrehozva a kívánt alakot és méretet. Esztergagépen számos, különböző típusú és alakú alkatrészt/munkadarabot készíthetünk el, mint például:

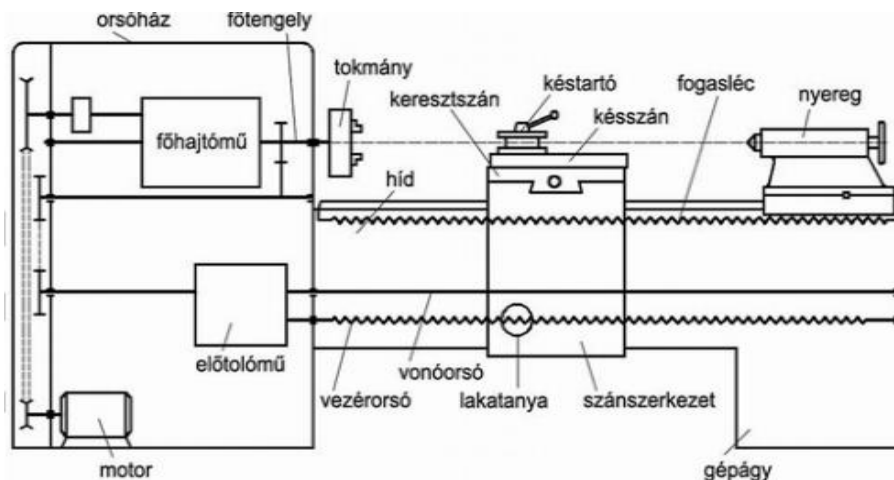
- Menetes alkatrészek, mint anyák, csavarok;
- Tengelyek;
- Hengeres és kónuszos alkatrészek
- Különféle profilok

Köszönhetően a számítógép által vezérelt esztergagépeknek ma már szinte minden alkatrészt vagy munkadarabot képesek vagyunk megmunkálni, minden munkadarabot, amely rendelkezik forgástengellyel.

Ahhoz, hogy részletesebben tárgyalhassunk az esztergálási folyamatról elengedhetetlen az esztergagép működésének és felépítésének ismerete.

1.1.2.2. Az eszterga gép felépítése és működése

Az esztergagép egy speciális gép, melyet az esztergálás általi forgácsolási eljárás végrehajtására terveztek. Ezek lehetnek manuálisak vagy számítógép által vezéreltek (CNC). Ezen gépek méretét és teljesítményét a munkadarab méretének és anyagának függvényében választják meg.



1.ábra: Az egyetemes eszterga gép felépítése [2]

A motor: Létfontosságú eleme az esztergának, a motor hozza létre azokat a mozgásokat melyek elengedhetetlenek a forgácsolás megvalósításához. Az említett mozgásokat a későbbiekben részletesebben is tárgyaljuk.

Gépágy: Az esztergapad szilárd alapját képezi, amelyen az összes többi alkatrésze helyezkedik el. Merev és stabil felületet biztosít, ami szintén elengedhetetlen a precíz és jó minőségű forgácsoláshoz.

Orsóház: Tartalmazza a főorsót és a főhajtóművet, valamint azokat a mechanizmusokat, melyek az orsó fordulatszám szabályzásában játszanak szerepet.

Főtengely: Merev, üreges csőtengely, a főforgácsoló mozgást továbbítja.

Tokmány: A főtengelyhez csatlakozik, szerepe a munkadarab könnyű és biztonságos rögzítése.

Híd: Biztosítja a munkadarab és a szerszám közötti munkakapcsolatot, lehetővé téve a forgácsolási folyamatok pontos és hatékony végrehajtását.

Keresztcszán: Lehetővé teszi a szerszám vízszintes elmozdítását (a főtengellyel párhuzamosan) a munkadarab különböző részeinek eléréséhez.

1.1.3. A forgácsolási folyamat, mozgások

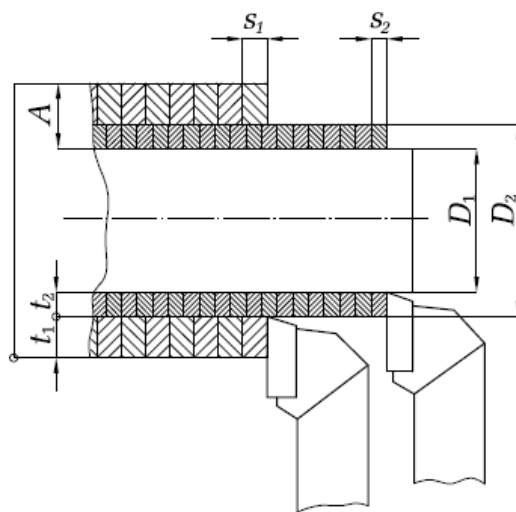
A forgácsolás elkezdése előtt, első lépésben a megmunkálandó darabot a tokmányba helyezzük majd gondosan rögzítjük, annak érdekében, hogy a megmunkálás során fellépő erők ne tudják elmozdítani, különben nem kívánt eredményt kapunk. Legalább ennyire fontos a

vágószerszám pontos beállítása és rögzítése annak érdekében, hogy hatékony és precíz munkát tudjon végezni. Amint ezek a kezdeti beállítások megvannak kezdődhet a forgácsolás.

Ahhoz, hogy a forgácsolás létrejöjjön, relatív mozgásra van szükség a munkadarab és a forgácsoló szerszám között, értelemszerűen ezt a mozgást/mozgásokat forgácsolómozgásnak nevezik. Esztergálás esetében ez egy folytonos és összetett mozgás, melynek két komponense van: a munkadarab által végzett forgó mozgás és a szerszám által végzett előtoló mozgás. E két mozgás eredője adja az effektív forgácsolómozgást, melynek pályája egy helix térgörbe (csavarvonal).

A munkadarab által végzett forgó mozgást főmozgásnak nevezzük és a főhajtómű hozza létre. Forgácsolási eljárások során a főmozgásnak van mindig a legnagyobb teljesítményigénye.

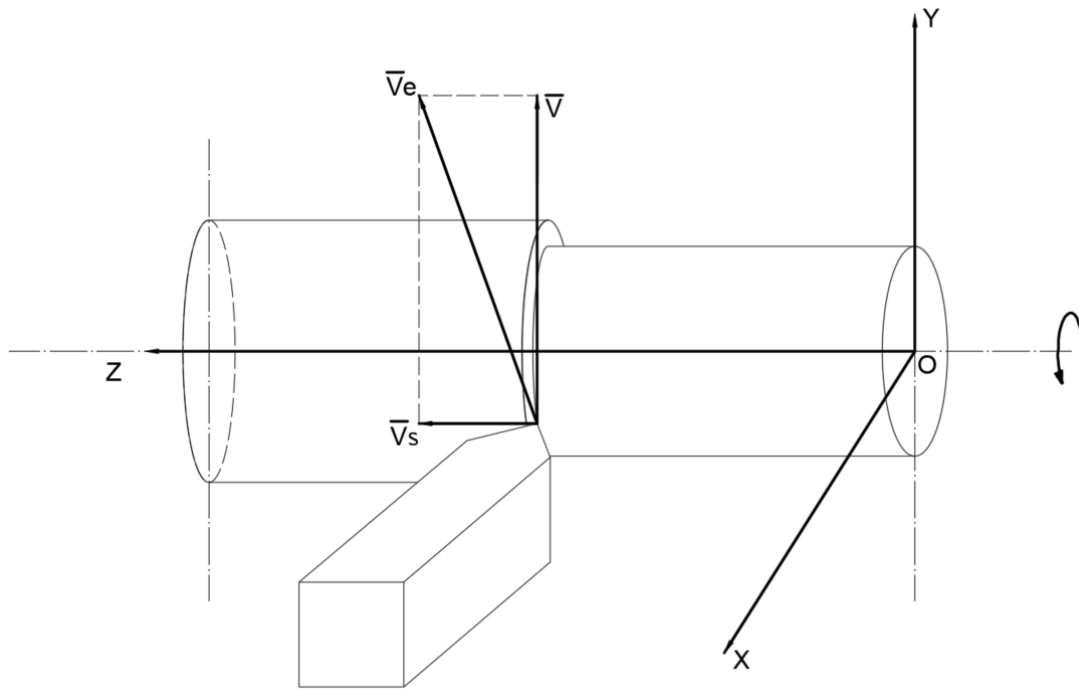
A szerszám mozgásai a mellékmozgások, ez a hossz és kereszt előtolási irány lehet. Hosszanti irányú előtoláskor (s) a szerszám bármely pontja által leírt pálya (egyenes) párhuzamos a munkadarab tengelyével. Tulajdonképpen az „ s ” előtolás a munkadarab egy teljes fordulata során az előtoló mozgás irányába megtett út hosszát jelenti, ebből adódóan a mértékegysége a *mm/fordulat*. Kereszt irányú előtolás esetén a forgácsolószerszám a főtengelyre merőleges irányba mozdul el. Ebben az esetben a fogásmélységet a szerszám szélessége határozza meg így adjuk meg, mértékegysége a *mm*.



2.ábra: Előtolás és fogásmélység [1]

Annak érdekében, hogy a forgácsolás optimális legyen, mint minőség, hatékonyság és a szerszám éltartamának szempontjából, meg kell határoznunk az ideális forgácsolási sebességet.

Esztergálás esetében beszélünk fővágósebességről és mellékvágó-sebességről (előtoló sebesség), melyek összege adja az effektív vágósebességet.



3.ábra: Forgácsoló sebességek esztergálás esetén

Az effektív vágósebesség meghatározásához ismernünk kell a komponensek értékeit, melyeket a következő összefüggésekkel tudunk kiszámolni:

$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V} + \mathbf{V}_s + \mathbf{V}_r \quad (1)$$

$\mathbf{V}_e$ – effektív vágósebesség

$\mathbf{V}$ – fővágósebesség

$\mathbf{V}_s$ – hosszanti előtoló mozgás sebessége

$\mathbf{V}_r$ – kereszt irányú előtolás sebessége

- Fővágósebesség: a munkadarab tangenciális sebessége m/perc – ben kifejezve.

$$V = \frac{2\pi R \cdot n}{1000} = \frac{\pi D \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{perc} \right] \quad (2)$$

R – a munkadarab sugara [mm]

D – a munkadarab átmérője [mm]

n – a munkadarab / főtengely fordulatszáma [fordulat/perc]

- Hosszanti előtoló sebesség: a szerszámnak a főtengellyel párhuzamos haladási sebessége, melynek mértékegysége m/perc.

$$V_s = \frac{s}{2\pi} \cdot \frac{\omega}{1000} = \frac{s \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{perc} \right] \quad (3)$$

s – előtolás értéke [mm/ford]

ω – a munkadarab / főtengely szögsebessége [rad/s]

n – a munkadarab / főtengely fordulatszáma [fordulat/perc]

- Kereszt irányú előtoló sebesség: a szerszámnak a főtengelyre merőleges haladási sebessége m/perc – ben kifejezve. Ez a komponens összetett előtolás, leszúrás, z tengely irányú megmunkálások esetén van jelen.

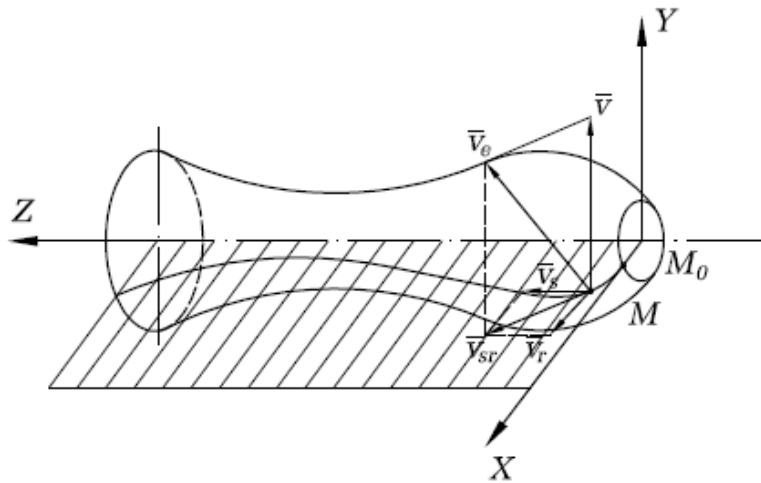
Az acél esztergálása során a hosszanti előtolás körülbelül 0,05 – 0,25 mm/fordulat. Megvizsgálva a (2) és (3) összefüggéseket világossá válik, hogy az előtolás sebessége számottevően kisebb, mint a fővágósebesség. Ebből kifolyólag az effektív vágósebesség meghatározásakor az előtoló sebességet elhanyagolhatjuk, ekkor:

$$V_e = V \quad (4)$$

Nagy emelkedésű menetek vagy olyan anyagok megmunkálása esetén melyek megengedik azt az előtoló sebességet, amely már nem elhanyagolható a fővágósebességhez képest, az effektív vágósebesség e két sebesség vektoriális összegével. Abban az esetben, ha a munkadarab megmunkálása összetett előtoló mozgást igényel, a tengely irányú előtolás mellett szükségünk van radiális előtolásra is.

- Axiális előtolás
$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V} + \mathbf{V}_s \quad (5)$$

- Axiális és radiális előtolás
$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V} + \mathbf{V}_s + \mathbf{V}_r \quad (6)$$



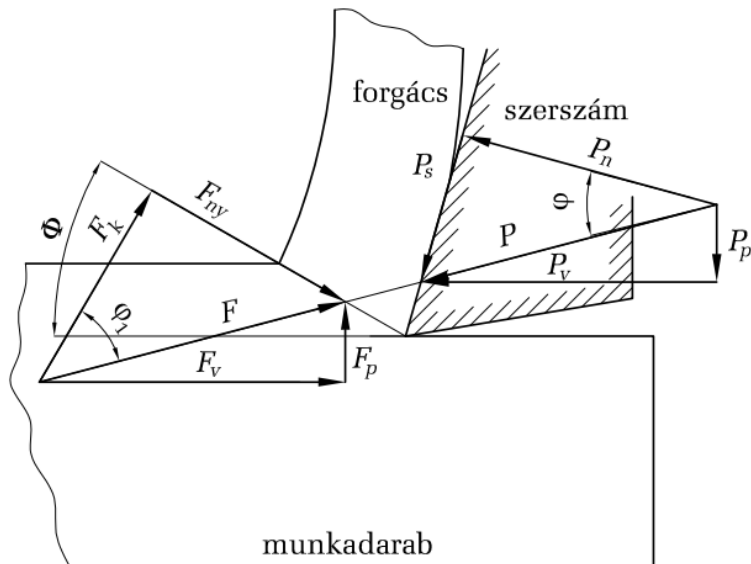
4.ábra: Forgácsolási sebességek ábrázolása komplex generálógörbéjű munkadarab esetén [1]

1.2. A forgácsolási erő

Azt az erőt, amelyet a munkadarab gyakorol a forgácsoló szerszámmra a ráhagyás leválasztásának az érdekében, forgácsolási erőnek nevezzük. Ahhoz, hogy a forgácsolás megtörténjen ennek az erőnek nagyobbak kell lennie, mint az anyagot összetartó erők. A forgácsoló erő nagyságát számos tényező befolyásolja, mint például a leválasztandó forgács keresztmetszete, a szerszám élgeometriája, a megmunkálandó anyag szilárdsága.

1.2.1. Szabad forgácsolás esete

Szabad forgácsolás esetén feltételezzük, hogy a szerszám élei közül egyedül a fő él forgácsol és annak minden pontja ugyanazon feltételek mellett. Az ortogonális szabadforgácsolás egy forgácsolástechnikai eljárás, melynek során a szerszám éle merőleges a munkadarab forgásirányára és a főmozgásra is. Ez a megközelítés ideális elméleti vizsgálatokhoz, mivel leegyszerűsíti a forgácsolási folyamatot, és lehetővé teszi a forgácsképződés törvényszerűségeinek alapos tanulmányozását.



5.ábra: Forgácsolási erőviszonyok szabadforgácsolás esetén [1]

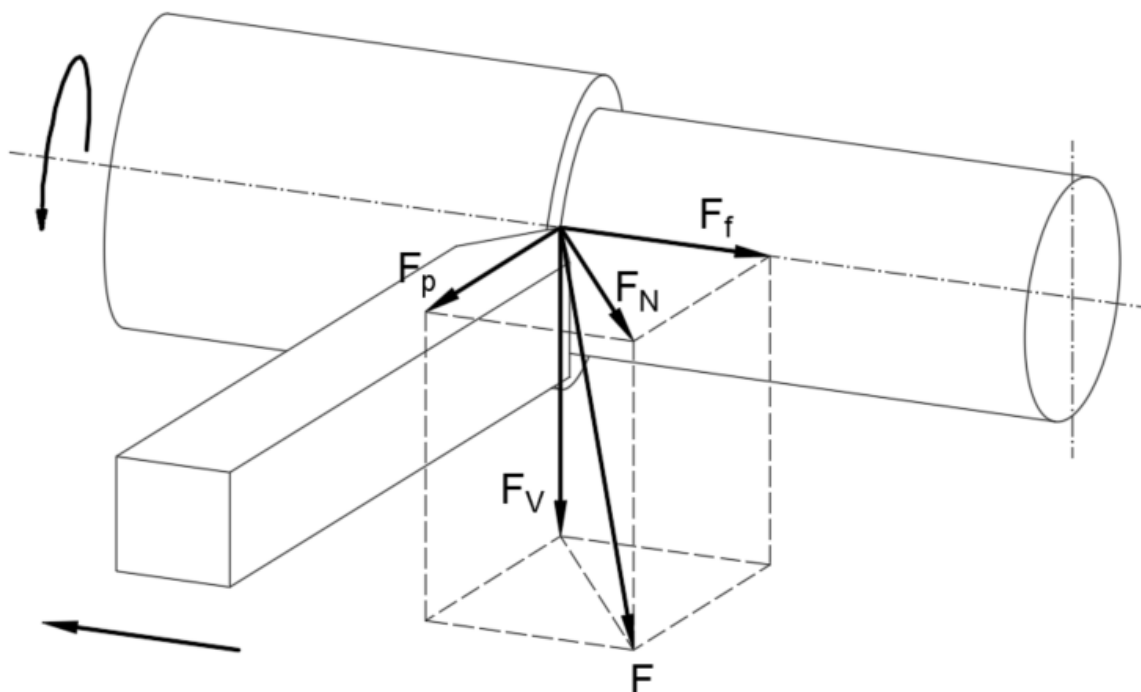
A forgácsoló szerszám a munkadarabra P erővel hat, ez az erő abszolút értékben megegyezik a szerszámra ható F forgácsolási erővel, viszont értelmük ellentétes. A forgácsolást e két erő ellentétes hatása tartja egyensúlyban.

$$\mathbf{P} + \mathbf{F} = 0 \quad (7)$$

1.2.2. Kötött forgácsolás esete

Mivel az általam tervezett berendezés az esztergáláskor fellépő forgácsolási erő komponenseit hivatott mérni, ahol a kötött forgácsolás esete érvényesül, ezért a továbbiakban ezt fogjuk tárgyalni.

Kötött forgácsolás esetén (pl. hosszesztergálás), ellentétben a szabadforgácsolással a szerszám főélén kívül a mellékél is forgácsol, ebből az következik, hogy a forgácsolási erő térbeli erőként jelenik meg, melyet három, egymásra merőleges komponense alkot.



6.ábra: A forgácsoló erő komponensei kötött forgácsolás esetén

F_V – a fő forgácsoló erő, a komponensek közül a legnagyobb, amely a szerszám élét a munkadarab felületére nyomja és leválasztja a forgácsot, iránya megegyezik a forgácsolósebesség irányával;

F_f – az előtolási erő, a szerszám mozgatásáért felelős, melynek iránya párhuzamos a munkadarab tengelyével, irányítása pedig ellentétes az előtoló mozgás irányításával;

F_p – passzív erő, melynek iránya merőleges a munkadarab tengelyére, irányítása pedig a munkadarabtól a szerszám fele mutat.

Mivel ezek a komponensek merőlegesek egymásra az eredő forgácsolási erő a következőképpen alakul:

$$F = \sqrt{F_V^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (8)$$

Nagyoló forgácsolás esetén nincs számottevő különbség az eredő forgácsolási erő és a főforgácsoló erő között, mivel a passzív erő és az előtolási erő annyira kicsik a főforgácsoló erőhöz képest, hogy azokat elhanyagolhatjuk. A tapasztalati értékek alapján:

$$F \approx (1.1 \div 1.3) \cdot F_V \quad (9)$$

$$F_f = (0.1 \div 0.4) \cdot F_V \quad (10)$$

$$F_p = (0.3 \div 0.8) \cdot F_V \quad (11)$$

1.3. A forgácsolási erő meghatározásának módszerei

A forgácsolási erő meghatározása elengedhetetlen a sikeres és hatékony forgácsolási folyamathoz. A paraméterek megfelelő beállítása lehetővé teszi a minőségi termék előállítását, a szerszámok hosszabb élettartamát és az energiatakarékosságot. A megfelelő gyártóeszköz kiválasztásához nélkülözhetetlen a forgácsolási erő ismerete, akárcsak az új eszközök/ szerszámok tervezésénél egyaránt. A forgácsolóerő meghatározására három alapvető módszert ismerünk.

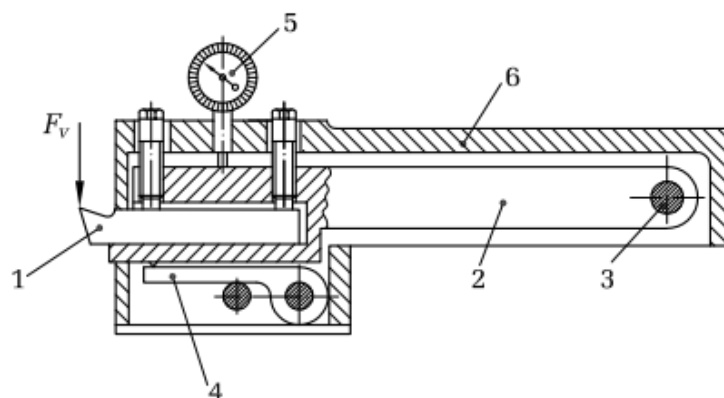
- Mérésekkel, kísérleti úton
- Tapasztalati képletekkel
- Forgácsolási teljesítményből

1.3.1. Mérésekkel, kísérleti úton történő meghatározás

A kísérleti módszerekkel történő meghatározás kétféleképpen történhet: teljesítmény méréssel közvetett úton, valamint közvetlen erőméréssel. A közvetlen erőméréssel működő készülékek a forgácsoló erő komponenseit külön-külön mérik (egy, kettő vagy három összetevő), melyekből a (8) képlet segítségével számolható az eredő forgácsolási erő. A gyakorlatban is használt forgácsolási erőmérő készülékek különböző elveken működhetnek, melyek a következők.

1.3.1.1. Mechanikus erőmérő berendezés

A mechanikus erőmérő berendezések általában ugyanaz az elv alapján működnek, mégpedig, hogy a fellépő erő által létrehozott alakváltozás mértéke egy rugalmas anyagban egyenesen arányos az erő nagyságával.

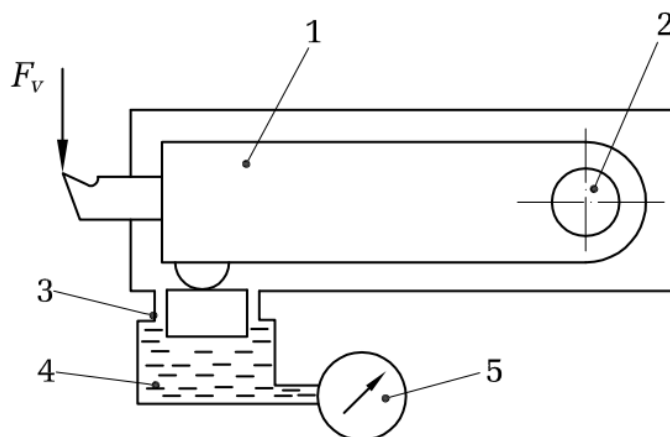


7.ábra: Mechanikus erőmérő berendezés elvi vázlata [1]

A berendezés előnye, hogy felépítése és működése egyszerű, a forgácsoló erő hatására a 3-as csap körül elforduló 2-es kar a 4-es rugólapra a főforgácsolási erő irányával megegyező nyomást gyakorol, aminek következtében az elasztikus alakváltozást szenved. A merev tartószerkezethez rögzített mérőóráról leolvasható az alakváltozás mértéke, amelyből a műszer hitelesítő diagramjának segítségével meghatározható a forgácsolási erő fő összetevője (F_v). Hátránya, hogy az eredő forgácsolási erő három komponense közül egyszerre csak az egyiket lehetséges mérni.

1.3.1.2. Hidraulikus erőmérő berendezés

Hasonlóan a mechanikus erőmérő berendezésekhez, hidraulikus változatuk szintén egyszerű felépítésű és működésű. Működési elve a folyadékok összenyomhatatlanságán alapszik, holott tudjuk, hogy ez a feltevés nem helyes, esetünkben annyira minimális az összenyomódás, hogy nem befolyásolja a mérési eredményeket, ezért ettől eltekintünk.



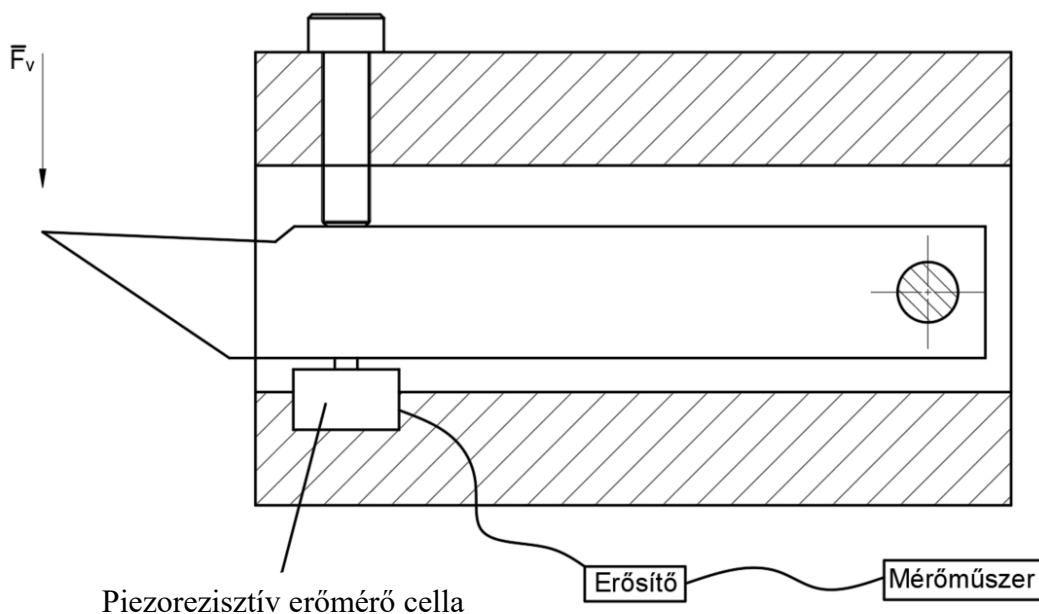
8.ábra: Hidraulikus erőmérő berendezés elvi vázlata [1]

Működése egyszerű, a forgácsoló erő által az 1-es kar elfordul a 2-es csap körül, ami ezáltal a 3-as hidraulikus henger dugattyújára fejt ki hatását, ennek következtében a hengerben nyomásnövekedés lép fel, amit az arra szerelt manométerrel mérhetünk. Két féle megvalósítás létezik, a manométerről leolvassuk az aktuális nyomás értékét majd egy hitelesítő diagram segítségével meghatározzuk az ahhoz tartozó erő nagyságát, vagy a mérőműszer számlapja már úgy van kialakítva, hogy a nyomás helyett az erő értékét jelezze. Hátránya, hogy kevésbé érzékeny a forgácsolás közben fellépő rezgésekre és érzékenyek a hengerben levő folyadék hőmérséklet változására.

1.3.1.3. Villamos erőmérő berendezés

Akárcsak a mechanikus vagy a hidraulikus berendezések, a villamos erőmérő készülékek is a forgácsolás folyamán fellépő alakváltozásokat használják fel a forgácsoló erő meghatározásához. A ma használatos érzékelők és villamos jelátalakítók lehetővé teszik az elmozdulások pontosabb rögzítését, ezzel a forgácsolási erő komponenseinek precízebb meghatározását. A villamos erőmérő készülékeket az alkalmazott jelátalakítók típusa alapján csoportosítjuk, melyek lehetnek piezoelektromos, induktív, kapacitív, rezisztív és egyéb típusú jelátalakítók által működtetett eszközök.

Esetünkben a berendezés piezorezisztív erőmérő cellákat használ fel az esztérgálás során fellépő forgácsoló erő meghatározásához/méréséhez.



9.ábra: Az általam tervezett villamos erőmérő berendezés működési vázlata

A 9.ábrán látható egy villamos forgácsoló erőmérő berendezés működési vázlata. A berendezés piezorezisztív terhelésmérő cellákkal van ellátva, melyek hivatottak a forgácsoló erő mérésére. A rögzített szerszám a főforgácsoló erő hatására elfordul a csap körül és ezzel együtt a közvetlen alatta elhelyezett szenzort is deformációra kényszeríti. A szenzorban létrejövő elektromos ellenállás változást egy mérőműszer segítségével jelenítjük meg, a létrejött ellenállásváltozás értéke arányos a deformációt létrehozó erő nagyságával. Ahhoz, hogy megkapjuk a forgácsoló erő mértékét szükséges a szenzor hitelesítési görbéje, melyet a következő fejezetekben fogunk meghatározni.

A piezorezisztív hatás az a jelenség, amikor egy anyag elektromos ellenállása mechanikai feszültség hatására megváltozik. Ez a hatás leginkább fémekre és félvezetőkre jellemző, de minimális mértékben kimutatható szigetelők esetében is. Két fő tényező hozza létre, egyik ilyen a méretváltozás, mivel egy adott anyag ellenállása függ annak hosszától, szélességétől és vastagságától is, ezért egy mechanikai erő által okozott deformáció megváltoztatja az anyag ellenállását. Másrészt, ha az anyagot mechanikai stressz éri, a kristályrács deformálódik, ezáltal megváltoztatva a szabad elektronok mozgását, ami ellenállásváltozást von maga után.

1.4. Forgácsolási erő mérésével kapcsolatos cikkek feldolgozása

1.4.1. Egy dinamométer tervezése a vágóerők méréséhez esztergálás esetén

Ebben a tanulmányban Süleyman Yaldiz és Faruk Ünsacar a törökországi Selcuk Egyetem műszaki karának diákjai egy olyan dinamométert készítettek, amely képes a statikus és dinamikus forgácsoló erő mérésére egyaránt. A szenzorokat olyan formában helyezték el a berendezésben, hogy maximalizálják az érzékenységet, valamit minimalizálják a kereszt-érzékenységet. Annak érdekében, hogy megbizonyosodjanak, a nyúlásmérő bélyeg és piezoelektromos gyorsulásmérőkből felépített dinamométer pontosságáról, a berendezést számos tesztnek vetették alá, hogy meghatározhassák a statikus és dinamikus jellemzőit.

Ez a dinamométer képes egyszerre mérni a forgácsolási erő mindhárom komponensét, legfeljebb 3,5 kN-ig $\pm 5\text{ N}$ –os pontossággal. A dinamométert különböző tesztekkel kalibrálták, például keresztérzékenységre és excentricitásra. Az eredmények alapján a dinamométer megbízhatónak bizonyult a vágóerők mérésére. Bár eredetileg esztergára tervezték, alkalmazható maráshoz és fúráshoz is.

1.4.2. Forgácsolási erő mérésére szolgáló dinamométer fejlesztése esztergálási megmunkálásokhoz

K. Umurani és R.A Siregar az indonéziai Muhammadiyah Sumatera Utara egyetem tagjai egy egyszerű dinamométert terveztek és építettek meg az esztergálás során fellépő főforgácsoló erő méréséhez. A berendezés tervezésének fő célja az volt, hogy egyszerű, költséghatékony eszközt hozzanak létre, amelyet hagyományos esztergagépekre lehet felszerelni.

Megépítéséhez egy hasáb alakú erőmérő cellát használtak, amelyet a szerszámtartóhoz rögzítettek. A mért adatokat egy Arduino mikrokontroller segítségével monitorizálták és MS Excelben rögzítették. A dinamométer teljesítményét két alacsony rugalmassági modulusú munkadarabbal tesztelték, Polioximetilén (POM) valamint Politetrafluoretilén (PTFE). A kísérlet során vizsgálták a forgácsoló sebesség, valamint a fogásmélység hatását a főforgácsolási erő mértékére.

A mérési eredmények feldolgozásával arra jutottak, hogy a magasabb rugalmassági moduluszal rendelkező anyag (POM) forgácsolásának nagyobb az erőigénybevétele, mint a kisebb rugalmassági moduluszal rendelkező anyagnak (PFTE). Az is kiderült, hogy amíg a fogásmélység nagysága nagy mértékben befolyásolja a forgácsolási erő nagyságát, addig a forgácsolási sebességnek csak minimális hatása van.

A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a dinamométer alkalmas az alapvető erőmérésekre esztergálási megmunkálások során. Egyszerűsége és alacsony költsége miatt vonzó megoldás, viszont hátránya, hogy csak a főforgácsoló erő mérésére alkalmas.

1.4.3. Dinamométer tervezése és építése, a szerszám homlokszögének hatása a forgácsolási erőre

Ebben a tanulmányban Mustafa Gunay, Ulvi Seker és Gokhan Sur, az Ankara-i Gazi Egyetem tagjai egy olyan dinamométert terveztek és építettek meg, amely alkalmas a forgácsolási erő mérésére különböző homlokszög értékek esetében. A forgácsolás során fellépő kihajlást két darab gerenda típusú szenzorral mérik, amelyből a hitelesítési görbe segítségével számolják ki a forgácsolási erő komponenseit, tulajdonképpen kettőt, mégpedig a főforgácsoló erőt és az előtoló erőt. A dinamométert úgy alakították ki, hogy a késtartó része elforgatható legyen a passzív síkra merőleges tengely körül, ezzel lehetővé téve a homlokszög értékének változtatását (-12° , $+12^{\circ}$) tartományban.

A homokszög hatásának vizsgálata érdekében esztergálási tesztekkel végeztek AISI 1040 acélból készült munkadarabon, nyolc különböző homlokszög használatával, valamint szögenként öt különböző forgácsolási sebességen, miközben a fogásmélység és az előtolás konstansok voltak.

A mérések eredményeinek elemzése után azt a következtetést vonták le, hogy a homlokszög mértékének növekedésével csökken a főforgácsolási erő nagysága. A mérési eredményeket igazolja, hogy az elméletileg kiszámított értékek a főforgácsolási erőre, valamint a mért eredmények csak kis mértékben térnek el egymástól és hasonló korrelációt mutattak. Az adatokból a csapat arra jutott, hogy a tervezett és épített dinamométer megbízhatóan lehet használni a forgácsolási erő mérésére.

1.4.4. Háromtengelyes dinamométer tervezése és kialakítása keresztpánt típusú érzékelők felhasználásával

Muhhamad Rizal, Jaharah A. Ghani és Amir Zaki Mubarak az indonéziai Syiah Kuala egyetem tagjainak fő célja egy, piezorezisztív nyúlásmérő bélégekkel ellátott keresztpánt típusú erőmérő kifejlesztése volt, melyet egy háromtengelyes dinamométer kialakításához használtak fel. A berendezés képes a forgácsolási erő komponenseinek szimultán mérésére. Az erőmérő érzékelőt úgy tervezték, hogy érzékenysége a lehető legjobb, valamint az interferencia hiba a lehető legkisebb legyen. Az igénybevétel eloszlásának vizsgálatát és a szenzorok elhelyezését végelem analízis segítségével határozták meg.

Az elkészített dinamométer, mely jó linearitással, ismételhetőséggel és hiszterézissel rendelkező képes volt akár 2000 N főforgácsoló erőt, előtoló erőt és passzív erőt mérni, melyekre az érzékenysége $32,799 \mu \frac{V}{N}$, $23,269 \mu \frac{V}{N}$ és $7,741 \mu \frac{V}{N}$ érzékenységet állapítottak meg, amiből létrehozták a berendezés hitelesítési görbáját. Tesztelve és elemelve azt eredményeket arra jutottak, hogy az összfrekvencia hiba 3% alá esett, természetes rezgés frekvenciája pedig 2253 Hz, 2317 Hz és 2957 Hz voltak az x, y és z irányokban.

A mérési adatokból és azoknak elemzéséből arra következtettek, hogy a három tengelyes dinamométer prototípus hatékonyan bizonyult a forgácsolási erő komponenseinek mérésére esztergálási műveletek során.

1.4.5. Három komponensű dinamométer fejlesztése az esztergálás során fellépő forgácsolóerő méréséhez

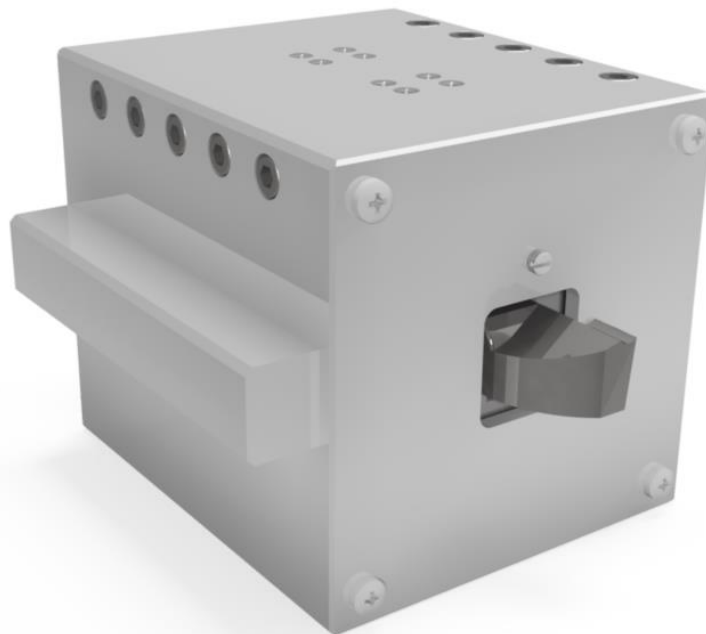
T.H. Panzera, P.R Souza, J.C.C. Rubio és T.R. Mansur közösen egy olyan berendezést hoztak létre, amely képes az esztergálás során fellépő forgácsolási erő egyidőben való mindhárom komponensének mérésére. Ahhoz, hogy ezt megvalósítsák egy olyan anyagból készült üreges rudat kellett kifejlesszenek, melynek megfelelő az érzékenysége a hajlításra és a csavarásra nézve. Végül arra jutottak, hogy az AISI 4340 -es acélt választották a rúd elkészítéséhez, melyet nyúlásmérő bélyegekkel láttak el, ahhoz, hogy mérhessék a forgácsolási erő komponenseit. Annak érdekében, hogy kompenzálják a hőmérsékletváltozás okozta hibákat, a bélyegeket teljes Wheatstone-hídként kötötték össze és egy fém borítást is kapott a forgácsoktól való védelemre.

A tervezett és megépített dinamométerrel vizsgálták a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység hatását a forgácsolási erőre. A mérési eredmények alapján arra jutottak, hogy a három erőkomponenst a vágósebesség mértéke nem érinti szignifikánsan, viszont az előtolás és a fogásmélység már nagy mértékben befolyásolják a forgácsolási erő komponenseinek alakulását. Saját eszközüket összehasonlították egy, kereskedelemben kapható dinamométerrel, amelyből kiderült, hogy az általuk tervezett berendezés közelebbi értékeket mutatott, különösen nagyobb fogásmélység esetén.

2. A tervezett forgácsolási erőmérő berendezés bemutatása

2.1. A forgácsolási erőmérő berendezés működése

A megépített berendezés (10. ábra) a forgácsoló erőkomponensek mérésére és monitorizálására szolgál esztergálási megmunkálás során. A mérőeszközbe elhelyezett három darab piezoerezisztív terhelésmérő szenzor segítségével egyidőben mérhetjük a forgácsoló erő mindhárom komponensét, valamint azoknak változásait különböző anyagok és forgácsolási paraméterek mellett.



10.ábra: Forgácsoló erőmérő berendezés

A mérőműszer az erre a célra kialakított gallér segítségével kerül befogásra az esztergapad késtartójába. Annak érdekében, hogy a kés csúcsát a főorsó tengelyének magasságába lehessen beállítani, a gallér és a kés tájolófelülete egy síkban kell legyen. Mivel a berendezés szélessége relatíve nagy (124 mm), ezért csak $\sim 300\text{ mm}$, vagy ennél hosszabb, csúccsal megtámasztott próbatest esztergálására alkalmas. Ellenkező esetben nagy lenne a kockázata annak, hogy a berendezés a tokmányba ütközik.

A berendezés két fő részből tevődik össze, melyek funkcionális és műszaki jellemzők alapján egyértelműen megkülönböztethetőek. Az első rész egy álló, stabilizáló külső egység, amely rögzített pozícióban tartja a készüléket a mérés során, és lehetővé teszi a belső egység mozgását y irányban. A belső egység lineáris csapágyak segítségével mozdul el a külső részben, annak érdekében, hogy mérhető legyen a passzív erő. Ezenkívül megfelelően rögzíti az esztergakést és helyet ad az x és z irányú erőket mérő szenzoroknak.

A rendszerben a terhelésmérő szenzorok kimeneti jeleit egy – egy HX711 típusú erősítő segítségével optimalizáljuk, mielőtt azokat továbbítanánk egy ESP32 típusú mikrovezérlőhöz, amely képes fogadni és feldolgozni a szenzorok által érzékelt adatokat. Egy számítógépes szoftver segítségével valós időben megjeleníthető a terhelés mértéke egy grafikonon, lehetővé téve a felhasználók számára, hogy azonnal láthassák és értelmezhessék az aktuális terhelési viszonyokat.

Emellett a szoftver rögzíti a mérési eredményeket, amiket a szenzorok hitelesítési görbéjének segítségével erővé konvertálhatunk.

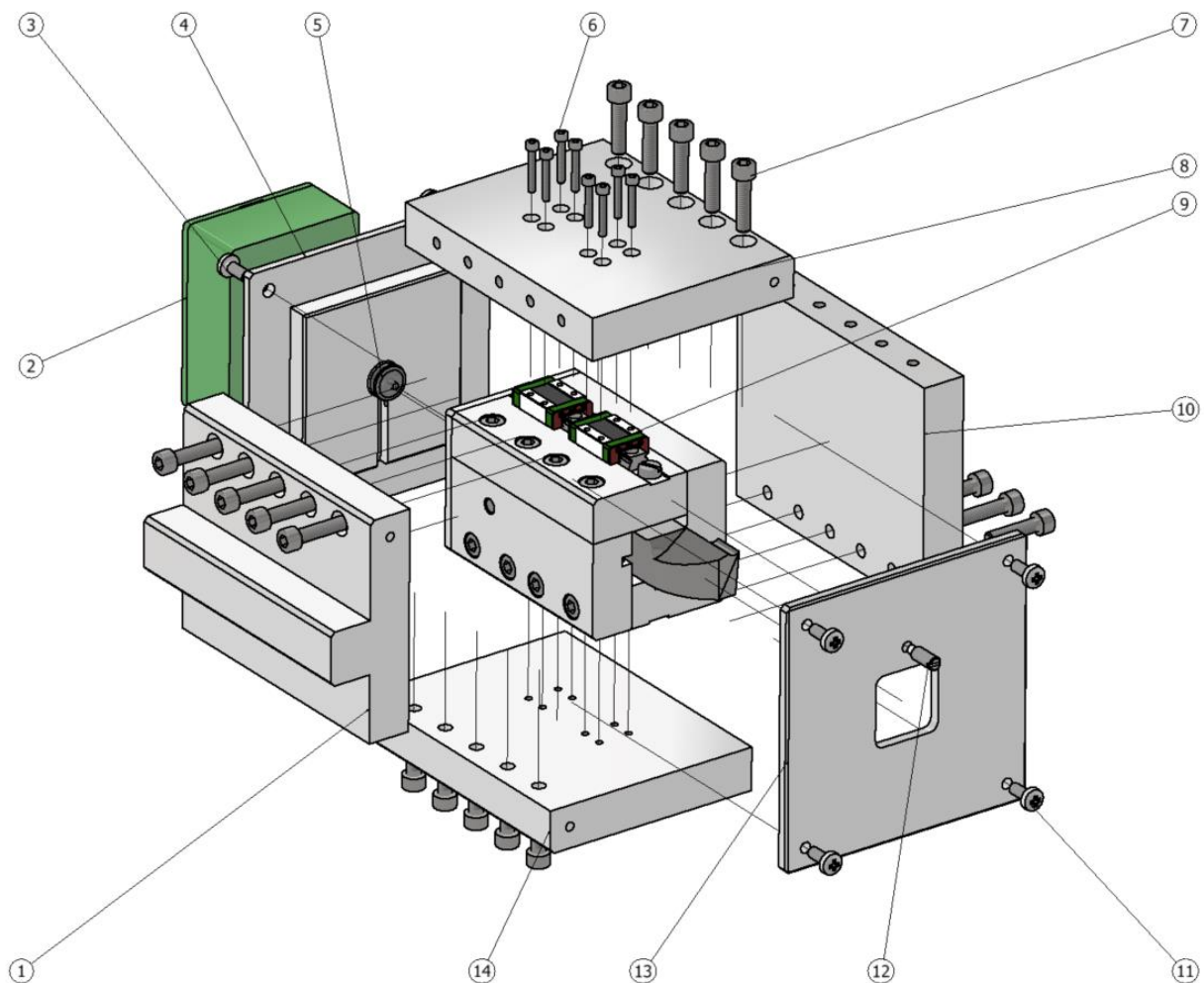
2.2. Az erőmérő felépítése

2.2.1. A külső egység

A berendezés külső egységének anyaga EN AW-7075 típusú alumínium, annak érdekében, hogy kellőképp ellenálljon a mérési folyamatok során fellépő feszültségeknek. Fő szerepe, hogy a késtartóba helyezve mereven tartja a berendezést, megakadályozza a forgács és egyéb szilárd anyagok belső egységbe való jutását, amik esetlegesen kárt tehetnének a csapágyak működésében, melyek a belső mag egység y irányú mozgását teszik lehetővé.

Az alábbi robbantott nézet (11. ábra) részletezi a külső egység szerkezeti felépítését, mely 14 komponensből áll. Az 1-es számú elem egy 20 mm vastagságú, gallérral ellátott lemez és szerepe a berendezés eszterga gép késtartójába való rögzítése. A belső egység felső és alsó részén egyaránt két-két lineáris csapágy található, melyek a 6-os számú csavarokkal vannak rögzítve a 8-as és 14-es elemekhez. Ez az elrendezés lehetővé teszi a belső rész szabad elmozdulását az y tengely mentén. Az 1-es, 8-as és 14-es elemek, kiegészítve a 10-es komponenssel, együttesen alkotják a külső egység keretét, melyek a 7-es számú csavarokkal vannak egymáshoz rögzítve. Ez a keretrendszer biztosítja a berendezés számára az elengedhetetlen szilárdságot és stabilitást a változó forgácsolási körülmények között is.

A 4-es számú hátsó fedőlap, amely a 3-as számú csavarokkal van rögzítve a keretrendszerhez, korlátozza a belső rész mozgástartományát, megakadályozza, hogy lecsússzon a sínekről, valamint helyet ad az 5-ös számú szenzornak is. Az 5-ös számú szenzor a forgácsolási erő y irányú komponensét, a passzív erőt méri. Mégpedig úgy, hogy a belső rész a megmunkálás során a csapágyakon elcsúszik és nekifeszül a hátsó fedőlapban található szenzornak. Ehhez az alkotóelemhez van még rögzítve a 2-es számú elektronikai doboz, melyben a három darab HX711 típusú erősítő és egy ESP32 mikrovezérlő foglal helyet.



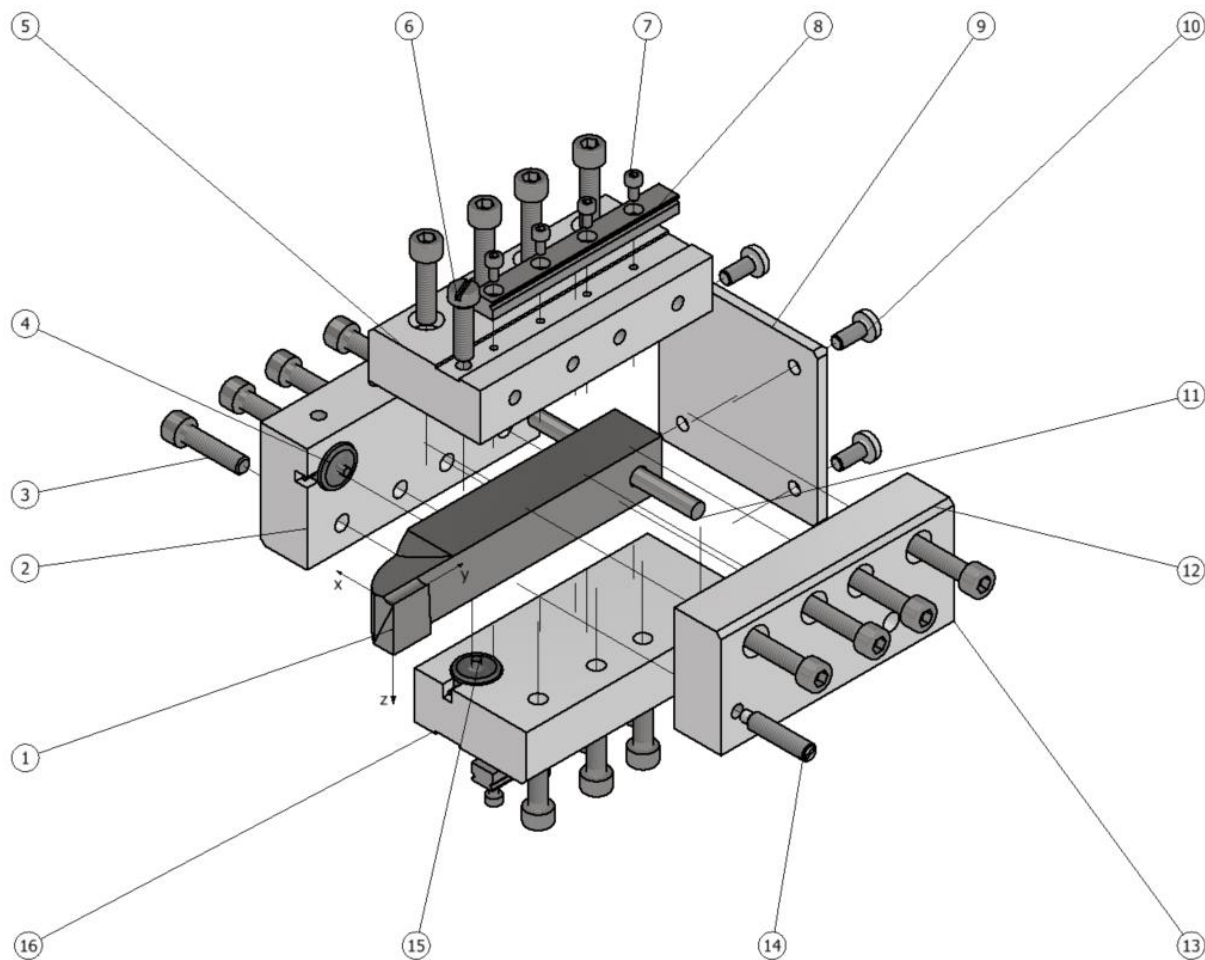
11.ábra: A külső egység robbantott nézete

A 13-as számú előlap, mely a 11-es számú csavarokkal kerül rögzítésre a keretrendszerhez, szerepe, hogy bizonyos mértékben kizárja a forgácsot a belső egység munkateréből, megóvva ezzel a szenzorokat és csapágyakat az esetleges károsodásuktól. Emellett lehetővé teszi az 5-ös szenzor előfeszítését, mégpedig úgy, hogy a 12-es számú csavar szorításával a belső egységet hátra toljuk.

Összességében a berendezés külső egységének a berendezés rögzítésében, stabilan tartásában és a belső mag egység, valamint a vezetékek védelmében van szerepe.

2.2.2. A belső „mag” egység

Az erőmérő berendezés belső egységének anyaga EN AW-6068 típusú alumínium, ennek mechanikai tulajdonságai elmaradnak az EN AW-7075 típusétól, amiből a külső egység készült, viszont nem is kell akkora feszültségeket elviseljen.



12.ábra: A belső egység robbantott nézete

A fenti robbantott nézeten (12. ábra) látható a belső egység robbantott nézete. Itt foglal helyet az esztergakés, valamint két, a főforgácsoló erő és az előtolás-irányú erő mérésére szolgáló szenzor.

Az 1-es számú esztergakés a 11-es számú csappal kerül rögzítésre, mely megengedi a szerszám x tengely körüli szabad elfordulását, ezzel lehővé téve a z irányú, főforgácsoló erő

mérését a 15-ös számú szenzor segítségével. Annak érdekében, hogy megtörténjen az előtolás-irányú erő mérése is, a késen levő furat átmérőben 1mm-rel nagyobb, mint a csap, ezzel megengedve a szerszámnak az x tengely menti elmozdulást, valamint egy minimális elfordulást a z tengely körül. Ez a minimális elfordulás kellően elegendő ahhoz, hogy a szerszám nyomást gyakoroljon a 4-es számú szenzorra.

Szerkezetét négy darab 20 mm vastagságú alumínium lemez alkotja, melyek a 3-as számú csavarokkal vannak egymáshoz rögzítve. A 2-es és 16-os számú komponensek helyet adnak a két terhelésmérő szenzornak, ezen kívül a 2-es és 5-ös számú lapokra kerülnek felszerelve a 7-es számú csavarok segítségével a lineáris csapágy sinei is, melyek biztosítják a belső rész elmozdulását. A hátsó fedőlapot a 9-es elem alkotja, mely a 10-es számú csavarokkal kerül rögzítésre, ezen a fedőlapon keresztül lép kontaktusba a belső egység a külső egység hátsó fedőlapjába szerelt szenzorral.

A szenzorok előfeszítése ebben az esetben is kulcsfontosságú a rendszer stabilitásának fenntartásában és a mérési pontosságban. Az előfeszítés, amely a 6-os és 14-es számú csavarokkal hajtható végre, biztosítja, hogy a szenzorok szorosan rögzüljenek a helyükre, és stabil pozícióban legyenek. Az előfeszítéssel az esztergálás is elfoglalja a kívánt pozíciót, hogy a forgácsolás kezdetekor már stabil, rögzített állapotban legyen.

2.2.3. A lineáris csapágyak

Ahogy már a fentiekben is említésre került, a belső egység összesen négy darab MGN9C típusú csapágyon mozdul el a külső egységben. Ezem típusú csapágyak sima és alacsony súrlódású mozgást biztosítanak, ezzel lehetővé téve a zökkenőmentes lineáris mozgást, mely elengedhetetlen a berendezés pontos működésében.

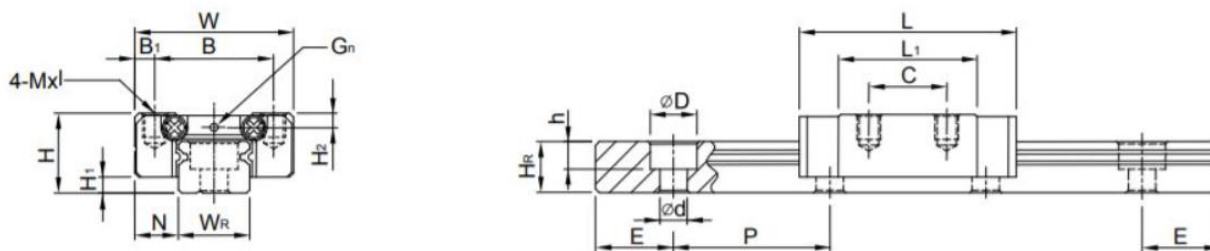
1. táblázat: MGN 9C típusú lineáris csapágy méretei

MGN9C	Szerelési Méretek (mm)			Csapágy Méretei (mm)						Sín Méretei (mm)					Alapvető dinamikus terhelési érték (kN)	Alapvető statikus terhelési érték (kN)
	H	H2	W2	W	BxC	G	L1	L	SxI	W1	H1	P	E	dxDxh		
	10	2	5.5	20	15x10	Ø1.4	18.9	28.9	M3x3	9	6.5	20	7.5	3.5x6x3.5	1.86	2.55



13.ábra: MGN 9C típusú lineáris csapágyak [3]

Bár kis méretűek és könnyűek, meglehetősen jó teherbírással rendelkeznek. A gyártó által megadott maximális statikus terhelés $C_0 = 2.55 \text{ kN}$, így négy csapágy alkalmazása bőven elegendő ahhoz, hogy ellenálljanak a forgácsolás során fellépő feszültségeknek.



14.ábra: A lineáris csapágyak méretei [3]

Szerelési szempontból elengedhetetlen a belső és a külső egység távolságának pontos beállítása, ellenkező esetben a csapágyak sínre való illesztése megvalósíthatatlan.

2.2.4. Az erőmérő cellák

Az erőmérő berendezés kulcsfontosságú eleme az erőmérő szenzorok, melyek nélkülözhetetlenek ennek a projektnek a megvalósításában. Ezek a szenzorok felelnek a forgácsolási folyamat során fellépő forgácsolási erő mindhárom komponensének egyidejű és precíz méréséért.

Köszönet a CavityEye vállalatnak, akik lehetővé tették számunkra, hogy az általuk fejlesztett kiváló minőségű szenzorokat használhassuk ehhez a projekthez. Ezek a szenzorok nem csupán technológiai csúcsminőséget képviselnek, hanem az általuk nyújtott pontosság és megbízhatóság teszi őket valóban kiválónak.



15.ábra: RC15-5 típusú erőmérő cella [4]

A fent látható RC15-5 típusú erőmérő cellák (15. ábra) a piezorezisztív effektust használják fel az mechanikai erő mérésére. Ezek az érzékelők egy vékony rétegű piezorezisztív anyagból készülnek, amelynek ellenállása megváltozik a rá ható mechanikai erő következtében. Ezt az ellenállás változást a 16.ábrán látható áramkör segítségével értékeljük ki. Az ellenállásváltozás mértéke egyenesen arányos a szenzorra ható erő nagyságával.

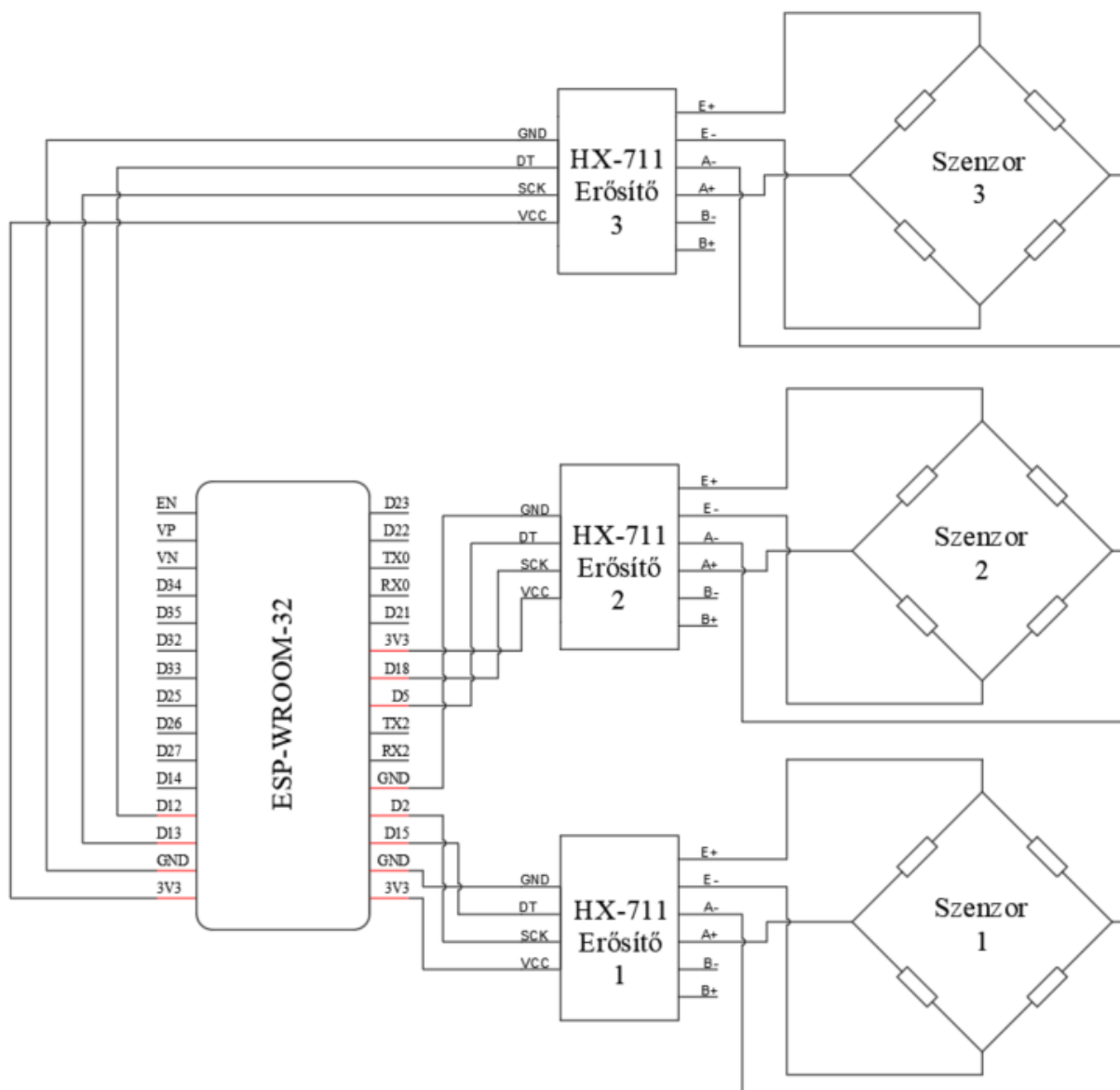
2. táblázat: RC15-5 erőmérő cella technikai adatai

Technikai Adatok		
RC15-5		
	Mértékegység	Érték
Átmérő gyűrűvel	mm	16
Átmérő gyűrű nélkül	mm	15
Magasság	mm	8
Keménység	HRC	45
Üzemi hőmérséklet tartomány	°C	(-40, 150)
Gerjesztő feszültség	V	5
Védelmi szint	IEC:60529:1989	IP67
Maximális terhelés	kN	5
Linearitástól való eltérés (Linearity deviation)	%	<1
Elhajlás maximális terhelésnél	mm	<0.06
Vezeték Színekódok		
Ground		Fekete
Gerjesztés		Piros
Differential signal +		Fehér
Differential signal -		Sárga

Ezek az erőmérő cellák nagy pontossággal, linearitással és érzékenységgel rendelkeznek, amint az a fenti táblázatban is látható a linearitástól való eltérése kevesebb mint egy százalék. Maximális terhelhetősége 5kN, ami kellően elegendő a forgácsolás során fellépő erők méréséhez, még magasabb szakítószilárdsággal rendelkező acélok esetében is.

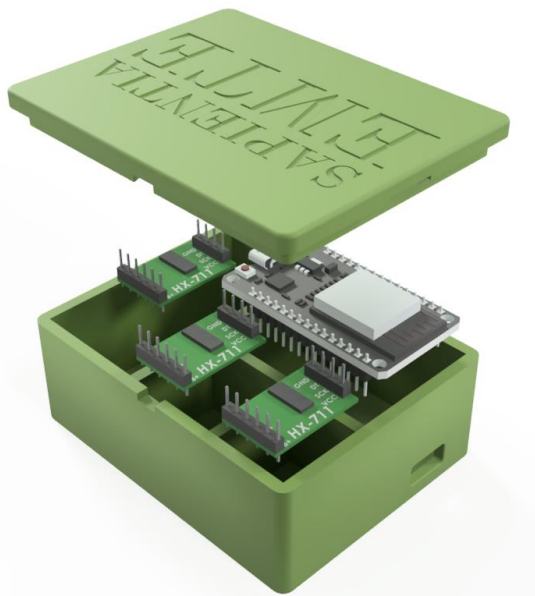
2.2.5. Jelfeldolgozó egység

Annak érdekében, hogy a szenzoroktól származó jeleket feldolgozzuk az alábbi kapcsolásra van szükség, melyet a 16. ábrán láthatunk. Alapvetően három fő komponensre épül: az erőmérő cellákra, az azokhoz kapcsol HX-711 típusú erősítőkre és az ESP-WROOM-32 mikrovezérlőre.



16.ábra: Kapcsolási rajz

Az erőmérő cellák felelnek azért, hogy a mechanikai erőt analóg jellé alakítsa, amely a mi esetünkben egy ellenállásváltozás. Mivel ez az ellenállásváltozás nagyon kicsi még 5kN nagyságú erők esetében is, ezért szükségünk van minden szenzorhoz egy HX-711 típusú erősítőre. Amellett, hogy felerősíti a szenzorokból kapott jeleket, mielőtt továbbítaná azt az ESP32 alapú mikrovezérlőhöz még átalakítja őket digitális jelekké. Az Arduino környezetben programozott ESP32 végzi el a szenzoradatok gyűjtését és kiíratását.



17.ábra: Az elektronikai doboz,

A felsorolt elemeknek a szenzorok kivételével, a fenti ábrán látható, 11. ábrán 2-es számmal jelölt elektronikai doboz ad helyet, mely tökéletesen megfelel arra, hogy az erősítőket és a mikrovezérlőt ne érje külső fizikai hatás. Emellett a dobozban levő rekeszek megóvják a bennük elhelyezett elemeket az esetleges érintkezéstől, amely zavart okozhatna a mérési eredményekben, vagy még rosszabb esetben tönkre tenné a berendezést.

2.3. A program

A szenzorok értékeinek kiíratásához nélkülözhetetlen a mikrovezérlő programozása, tulajdonképpen meg kell mondjuk neki mit csináljon. Az Arduino IDE környezetben megírt program három részben épül fel:

- Definiálás
- Setup - inicializálás
- Végtelen ciklus

2.3.1. Definiálás

Ebben a részben előkészítjük a mikrovezérlőt, hogy kommunikáljon és adatokat olvasson ki a három különböző szenzortól. Itt neveztük el a mikrovezérlőnek azon lábait, amelyeket a kommunikációhoz használunk.

```
#include <HX711.h>

const int VCC2 = 19;
const int VCC3 = 14;
const int GND2 = 4;

const int LOADCELL_DOUT_PIN_S1 = 15;
const int LOADCELL_SCK_PIN_S1 = 2;

const int LOADCELL_DOUT_PIN_S2 = 5;
const int LOADCELL_SCK_PIN_S2 = 18;

const int LOADCELL_DOUT_PIN_S3 = 12;
const int LOADCELL_SCK_PIN_S3 = 13;

HX711 scale1;
HX711 scale2;
HX711 scale3;
```

A program első sorában a HX711 könyvtárat importáljuk, ami lehetővé teszi a mikrovezérlő és az erősítők közötti kommunikációt. A mikrovezérlő eredetileg két földelés lábbal és egy tápfeszültség lábban van ellátva, ami nem elegendő mindhárom szenzor gerjesztéséhez és földeléséhez, ezért szükséges még két darab tápfeszültség és egy darab földelés láb definiálása, ami a harmadik-ötödik sorban történik.

A nyolcadik-tizenötödik sorban a változók a mikrovezérlő azon lábait jelölik, ahova a HX711 erősítők DOUT (Data Out) és SCK (Serial Clock) lábai csatlakoznak. A DOUT a szenzorok által küldött, felerősített adatokat továbbítják a mikrovezérlő fele, valamint az SCK az erősítők és a mikrovezérlő közötti szinkron kommunikáció órajele.

A program részlet utolsó három sora lehetővé teszi, hogy egyszerre több szenzort kezeljünk egyetlen mikrovezérlővel, minden szenzorhoz külön objektumot létrehozva, így egyszerűen és hatékonyan olvashatjuk, kezelhetjük az adatokat, amelyeket a szenzorok küldenek.

2.3.2. Setup

A setup függvény előkészíti és inicializálja a hardvert és a szoftvert a szenzorokkal történő kommunikációhoz és mérésekhez.

```

void setup() {
  pinMode(VCC2, OUTPUT);
  pinMode(VCC3, OUTPUT);
  pinMode(GND2, OUTPUT);
  digitalWrite(VCC2, HIGH);
  digitalWrite(VCC3, HIGH);
  digitalWrite(GND2, LOW);

  Serial.begin(115200);
  scale1.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S1, LOADCELL_SCK_PIN_S1);
  scale2.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S2, LOADCELL_SCK_PIN_S2);
  scale3.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S3, LOADCELL_SCK_PIN_S3);

  scale1.tare();
  scale2.tare();
  scale3.tare();
}

```

Első sorban szükségünk van az első részben definiált gerjesztő és föld típusú tűskéket kimeneti módra állítani, valamint megadni, hogy milyen funkciót töltsenek be, azaz 3.3V-os gerjesztés (HIGH) és földelés (LOW). Ezáltal minden szenzornak külön tápfeszültséget és földelést biztosítottunk.

A harmincharmadik sorban levő parancs a mikrovezérlő és a számítógép közötti soros kommunikációt aktiválja 115200 baud rátával. A következő három sorban pedig külön-külön inicializáljuk a soros kommunikációt az erősítővel.

Általában az erőmérő cellák nulla erőt érzékelve is kimenő jelet produkálhatnak. Ez az eltolódás vagy nulla terhelésű kimeneti offset a gyártási folyamatból vagy a környezeti tényezők behatásából eredhet. Annak érdekében, hogy mérésakor ezt a hibát kiküszöböljük a függvény utolsó három sorában a “tare()” funkcióval rögzítjük a jelenlegi kimeneti jelet referenciaként, amely a terhelés nélküli állapotot reprezentálja, azaz a szenzorokat nullára kalibráljuk.

2.3.3. Végtelen ciklus

Tulajdonképpen a végtelen ciklusban levő kód folyamatosan ellenőrzi, hogy bármelyik terheléscella készen áll-e, akkor beolvassa azok adatait és egy soros monitorra kiírja őket.

```

void loop() {
  if (scale1.is_ready() || scale2.is_ready() || scale3.is_ready()) {
    long rawValue1 = scale1.read();
    long rawValue2 = scale2.read();
    long rawValue3 = scale3.read();

    Serial.print(rawValue1);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(rawValue2);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(rawValue3);
  }
}

```

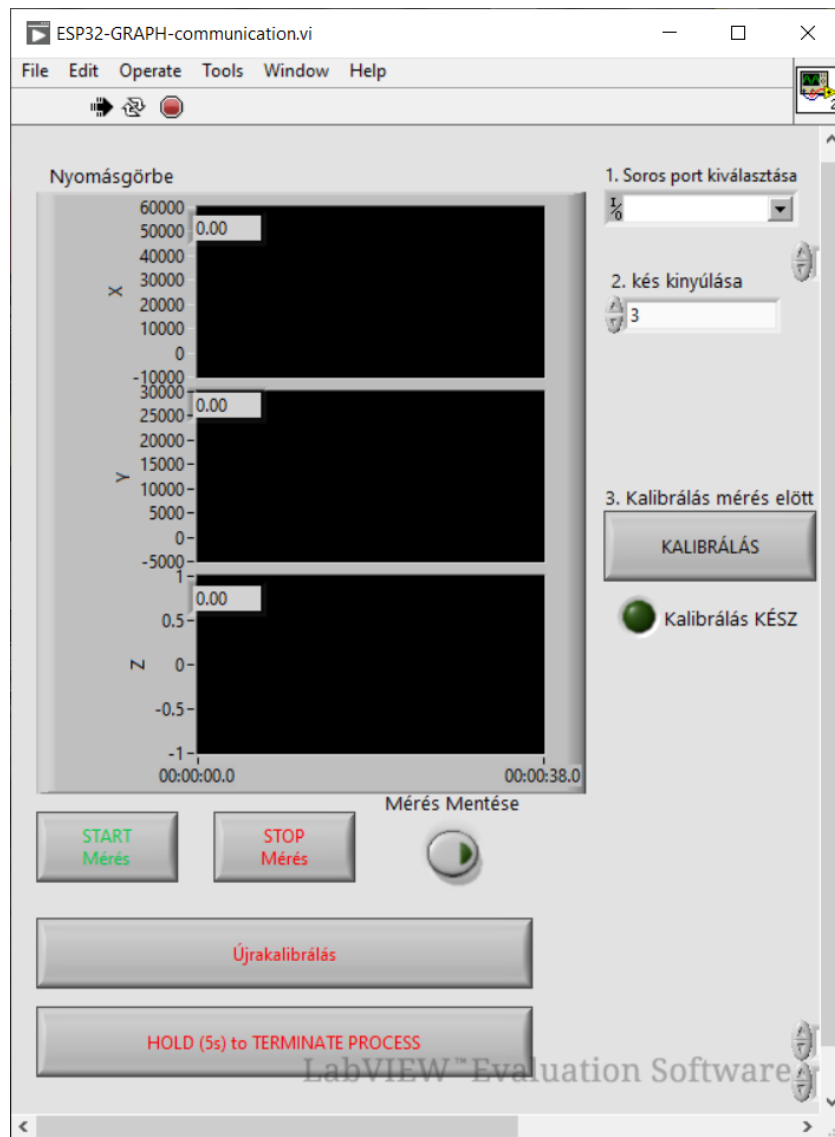
A végtelen cikluson belüli if feltétel vizsgálja a szenzorok készenlétét, ha legalább egy terheléscella kész akkor lefut az if blokkon belüli kód. Amíg a feltétel igaz a program egy változóban tárolja az aktuális szenzor értékeket és kiírja azokat a soros monitorra.

Ezek az értékek csupán a szenzorok nyers értékei, számunkra semmitmondóak és további feldolgozást igényelnek, mely a LabVIEW szoftver keretein belül valósul meg, annak érdekében, hogy ne a mikrovezérlőt terheljük ezzel a feladattal.

2.4. LabVIEW

A cél egy olyan letisztult interfész létrehozása volt mely segítségével monitorizálhatjuk a mérési eredményeket, valamint azokat könnyen értelmezhetjük. Egy jól átlátható felület elengedhetetlen a mérési adatok megértéséhez és feldolgozásához.

Az alábbi ábrán látható kezelőfelület mindamelllett, hogy egyszerű és könnyen átlátható, helyet ad az összes szükséges funkciónak, amelyek a mérési folyamat során szükségesek. Mint ahogy azt már tárgyaltuk a 2.3.2.-es részben is, mérések előtt elengedhetetlen a szenzorok nullpont referenciáját felvenni, ami gombnyomásra megoldható a “KALIBRÁLÁS” gomb segítségével, ezt követően indulhat is a mérés. A grafikonokon valós időben láthatjuk a forgácsolási erők változását N-ban kifejezve, melyeket a mérés végeztével egy .csv típusú fájlba ki is menthetünk további feldolgozás érdekében.

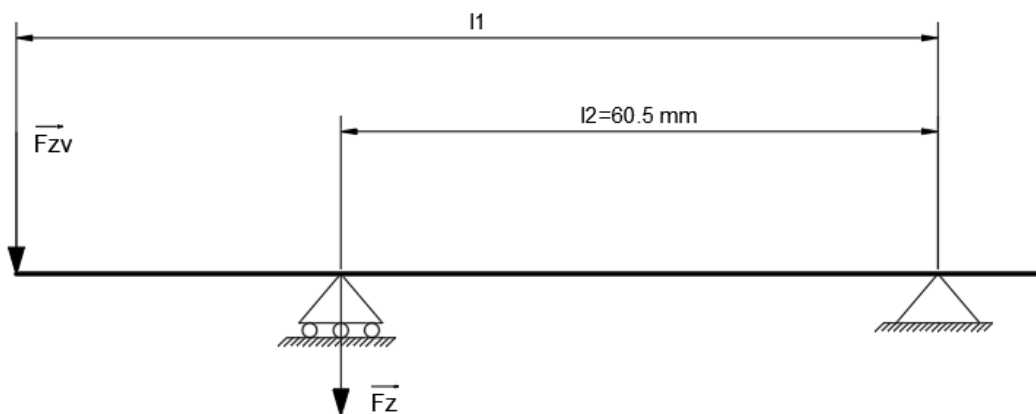


18.ábra: LabVIEW interfész

Mivel a szoftver a szenzorok nyers értékeit kapja meg ezek még további feldolgozást igényelnek a kiíratás előtt. Ezek olyan aritmetikai számítások, melyek elengedhetetlenek a pontos mérések véghezvitelében.

Első sorban a szoftver a szenzorok nyers adatait megfelelteti a megfelelő nagyságú erőnek a hitelesítési görbék segítségével. Ez a passzív erőt mérő szenzor esetében elegendő is, nem igényel további feldolgozást. Ezzel ellentétben a főforgácsoló és az előtolás irányú erőt mérő szenzorok hitelesítés utáni értékeit még a (12) számú nyomatécenylet szerint szükséges módosítani, mivel a szenzorok tengelyvonala nem esik egybe az azt terhelő erők irányával. Annak

érdekében, hogy a szoftver el tudja végezni ezt a számítást, a kezelőfelületen szükséges megadni a kés kinyúlását a rögzítő csap tengelyétől milliméterben.



19.ábra: A valós erő kiszámítása

$$F_{zv} = \frac{F_z \cdot 60.5}{l_1} \quad (12)$$

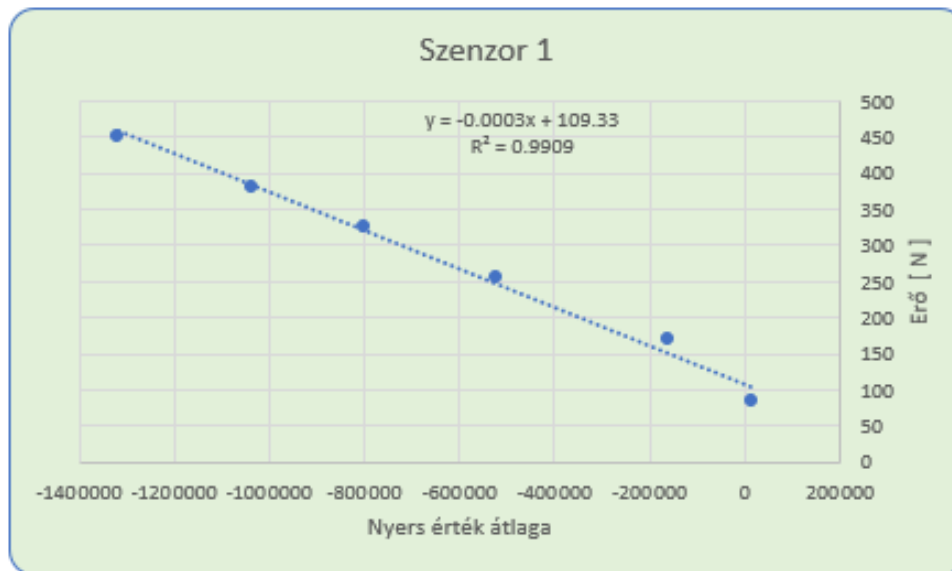
2.5. A szenzorok kalibrálása

Amint azt már tudjuk a használt szenzorok a piezorezisztív effektus elvén működnek, tehát terhelés hatására lineárisan változik az adott anyag ellenállása. Ahhoz, hogy erőt mérjünk nem elég csupán leolvasni a szenzorok nyers értékeit, mert azok csupán egyszerű digitális jelek melyek a szenzor jelenlegi állapotát tükrözik. Ezek az értékek számunkra még nem mondanak semmit arról, hogy mekkora erő is hat arra az adott szenzorra, ezért szükséges azoknak a kalibrálása.

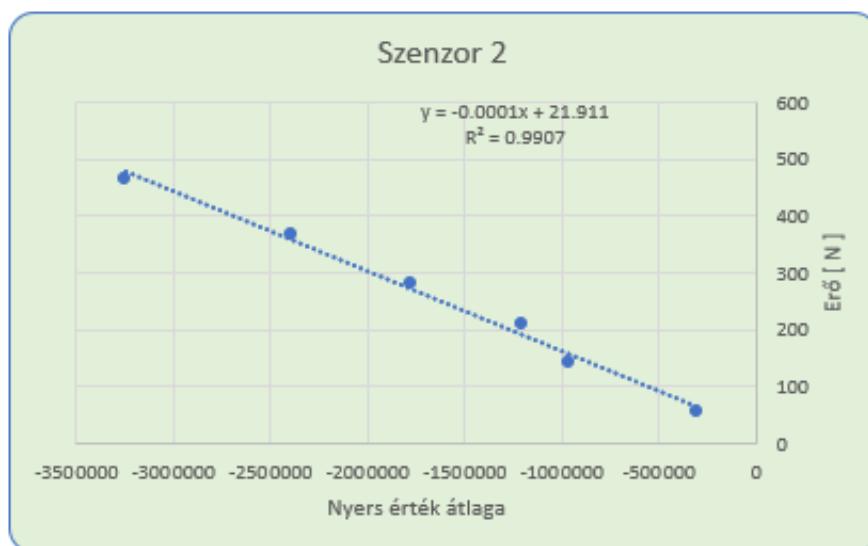
3.táblázat: A szenzorok terhelésmentes nyers értékei

Nyers értékek			
Szenzor	1	2	3
Érték	449536	63518	638057

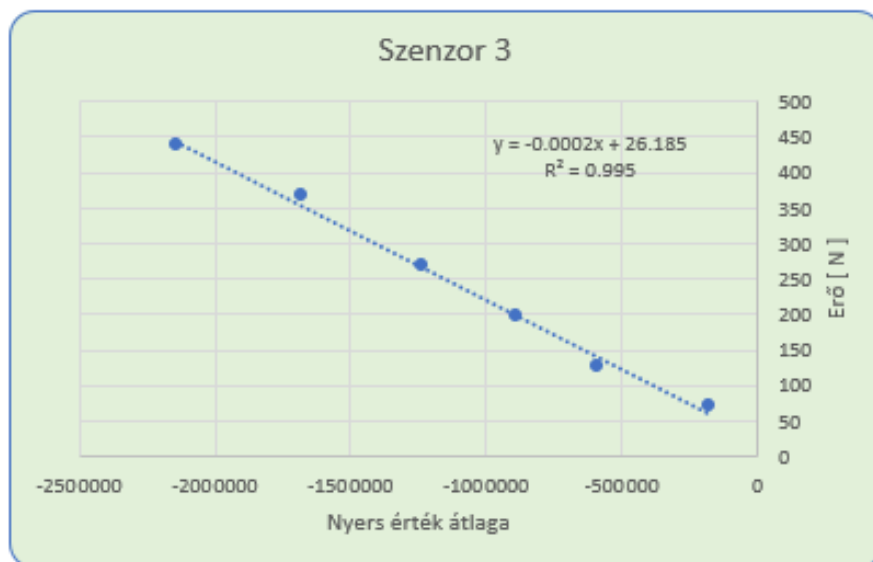
A kalibrálásához egy megegyező, immáron kalibrált és hitelesített RC15-5 típusú erőmérő cella szükséges. A kontrol és a kalibrálandó szenzort ugyanabba a satuba szorítottuk és dokumentáltuk a nyers értékek változását adott szorítóerőre. Szenzoronként hat mérést végeztünk melyek segítségével meghatároztuk azok a hitelesítési görbéit, ami tulajdonképpen egy egyenes.



20.ábra: Az 1-es szenzor hitelesítési görbéje



21.ábra: A 2-es szenzor hitelesítési görbéje



22.ábra: A 3-as szenzor hitelesítési görbéje

Az egyenesek egyenleteinek segítségével immáron értelmet adhatunk a nyers értékeknek, mégpedig úgy, hogy az x változóba helyettesítve őket és elvégezve a műveleteket megkapjuk a cellát terhelő erő nagyságát N-ban kifejezve.

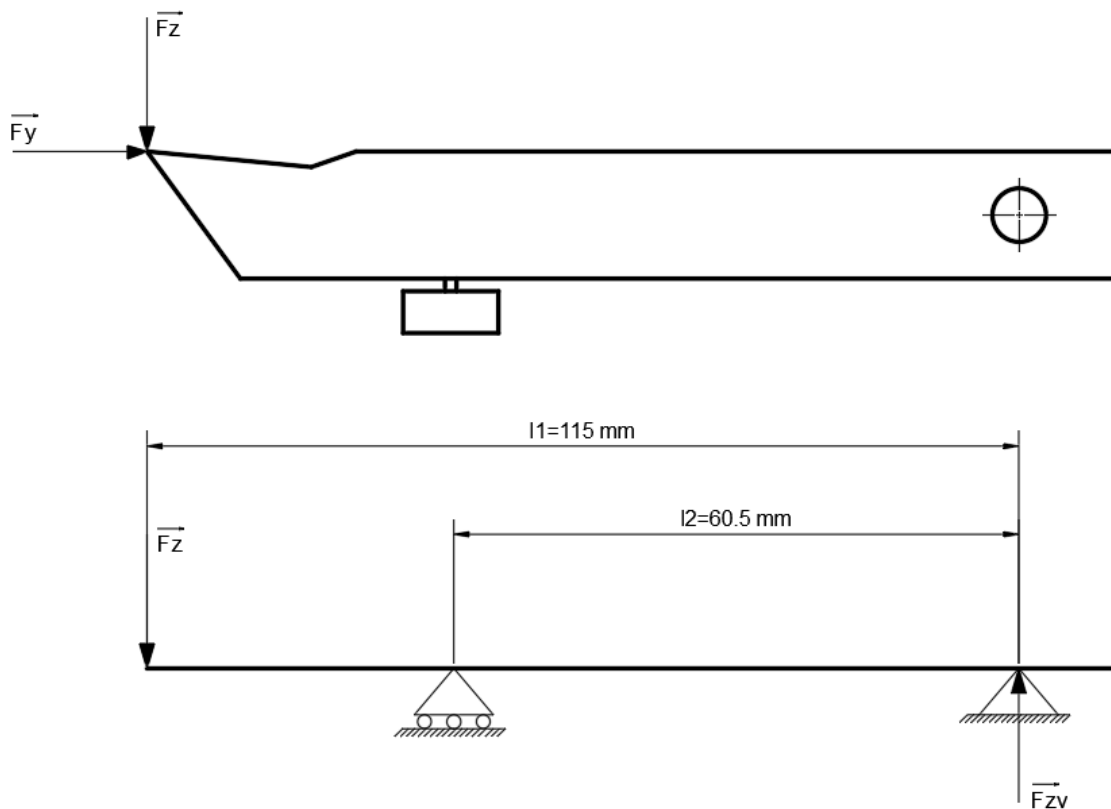
2.6. Kritikusan igénybevett elemek ellenőrzése

A berendezés megfelelő és hosszútávú működése érdekében elengedhetetlen, hogy a berendezés kritikusan igénybe vett elemei megfelelően ellenálljanak a forgácsolási eljárás során fellépő erőviszonyoknak. Az említett kritikusan igénybe vett elemek a következők:

- Késtartó csap
- Külső egység
- A rögzítő csavarok

2.6.1. A késtartó csap ellenőrzése

A 12.ábrán 11-es számmal jelölt késtartó csap felel a kés szabad elfordulásáért és tartja azt a megfelelő pozícióban. A csapot két erő terheli, a főforgácsoló erő, valamint a passzív erő. E két erő összegének függvényében ellenőrizzük a csapot hajlításra és nyírásra egyaránt. Mindkét terhelés értékét 5kN-nak választjuk, mert ez a szenzorok maximális terhelhetősége.

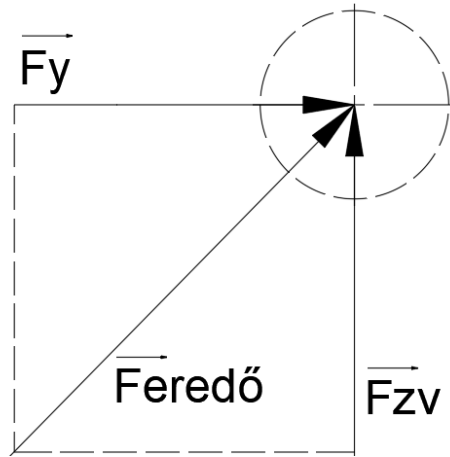


23.ábra: A késre ható nyomaték

A fent látható ábra értelmében, ha a kés csúcsára F_z erő hat, akkor a csapon az F_{zv} erő fog megjelenni, mely a következőképpen alakul:

$$F_z \cdot (l_1 - l_2) = F_{zv} \cdot l_2 \quad (13)$$

$$F_{zv} = \frac{F_z \cdot (l_1 - l_2)}{l_2} = \frac{5000 \cdot (115 - 60.5)}{60.5} = \frac{5000 \cdot 54.5}{60.5} = 4504 \text{ N} \quad (14)$$



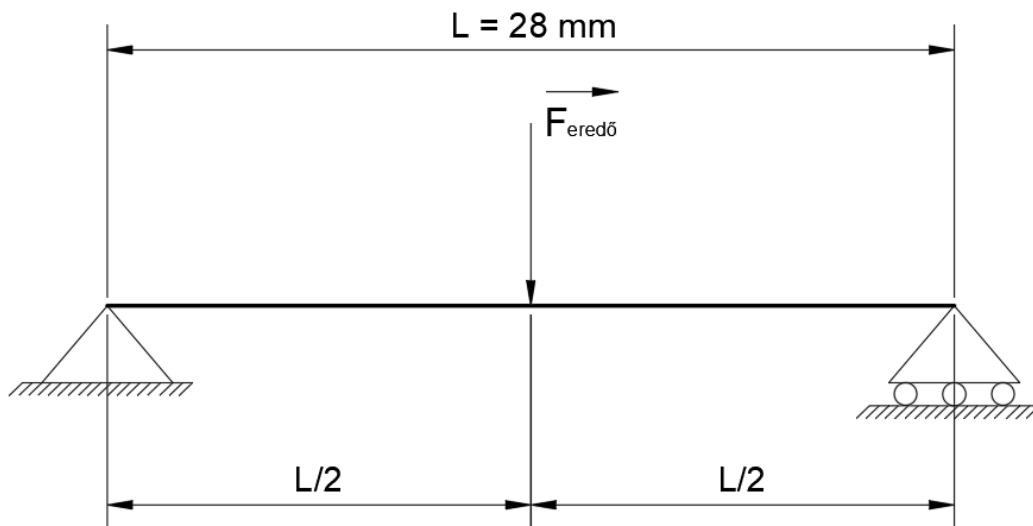
24.ábra: A csapra ható eredő erő

$$F_{eredo} = \sqrt{F_{zv}^2 + F_y^2} = \sqrt{4504^2 + 5000^2} = 6729 \text{ N} \quad (15)$$

A rögzítésre szolgáló csap összesen 6729 N nagyságú erőnek kell ellenálljon. Legyen ez 7000 N az elhajlásra és nyírásra való ellenőrzéskor. A csap átmérője $\varnothing d_{csap} = 6 \text{ mm}$, anyaga 100Cr6 acél, melynek mechanikai tulajdonságai a következők:

- Szakítószilárdság: $R_m = 700 \text{ MPa}$
- Folyáshatár: $R_e = 300 \text{ MPa}$
- Young-modulus: $E = 210 \text{ GPa} = 210 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

2.6.1.1. Ellenőrzés hajlításra



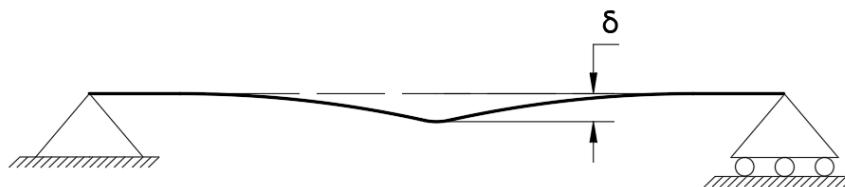
25.ábra: A csap ellenőrzése hajlításra

A csap maximális elhajlása a következő képlet segítségével számítható ki:

$$\delta = \frac{F_{eredő} \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} \quad (16)$$

,ahol

- δ : az elhajlás mértéke
- L : a csap hossza
- I : a csap másodrendű nyomatéka



26.ábra: A csap elhajlása

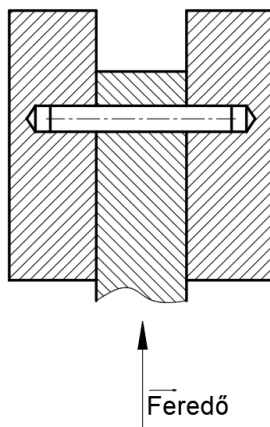
$$I = \frac{\pi \cdot d_{csap}^4}{64} = \frac{\pi \cdot 6^4}{64} = 63.62 \text{ mm}^4 \quad (17)$$

$$\delta = \frac{7000 \cdot 28^3}{192 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 63.62} = 0.0599 \text{ mm} \quad (18)$$

A maximális elhajlás $\delta = 0.0599 \text{ mm}$, ebből arra következtethetünk, hogy a választott csap teljes mértékben megfelel az előírásoknak és elhanyagolható mértékben befolyásolja a mérési eredményeket.

2.6.1.2. Ellenőrzés nyírásra

A megengedett nyírófeszültség egyenlő a nyíróerő ($F_{eredő}$) és a csap keresztmetszet területének hányadosával.



27.ábra: A csap ellenőrzése nyírásra

$$\tau_{meg} = \frac{F_{eredő}}{2 \cdot A_{csap}} = \frac{F_{eredő}}{2} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_{csap}^2} = \frac{2 \cdot F_{eredő}}{\pi \cdot d_{csap}^2} \quad (19)$$

Amint az a 27.ábrán is látható, hogy a csap két egymással szemben levő zsákfuratban van elhelyezve, ezért a nyíró igénybevétel két részre oszlik, azaz a keresztmetszet területét megszorozzuk kettővel.

$$d_{csap} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{eredő}}{\pi \cdot \tau_{meg}}} \quad (20)$$

Ahhoz, hogy meghatározhassuk a minimális csapátmérőt már a csak a megengedett nyírófeszültséget kell kiszámolni, mely a következőképpen alakul.

$$\tau_{meg} = 0.65 \cdot \sigma_{meg} = 0.65 \cdot \frac{R_e}{n} \quad (21)$$

$$n = 1.5 \div 2 \quad (22)$$

$$\tau_{meg} = 0.65 \cdot \frac{300}{1.5} = 0.65 \cdot 200 = 130 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$d_{csap} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7000}{\pi \cdot 130}} = 5.75 \text{ mm} \quad (24)$$

A számítások alapján a minimális átmérő 5.75 mm kell legyen, ahhoz, hogy a csap megfelelően ellenálljon a nyírási igénybevételeknek. Tehát az általunk választott 6 mm átmérőjű csap tökéletesen megfelel.

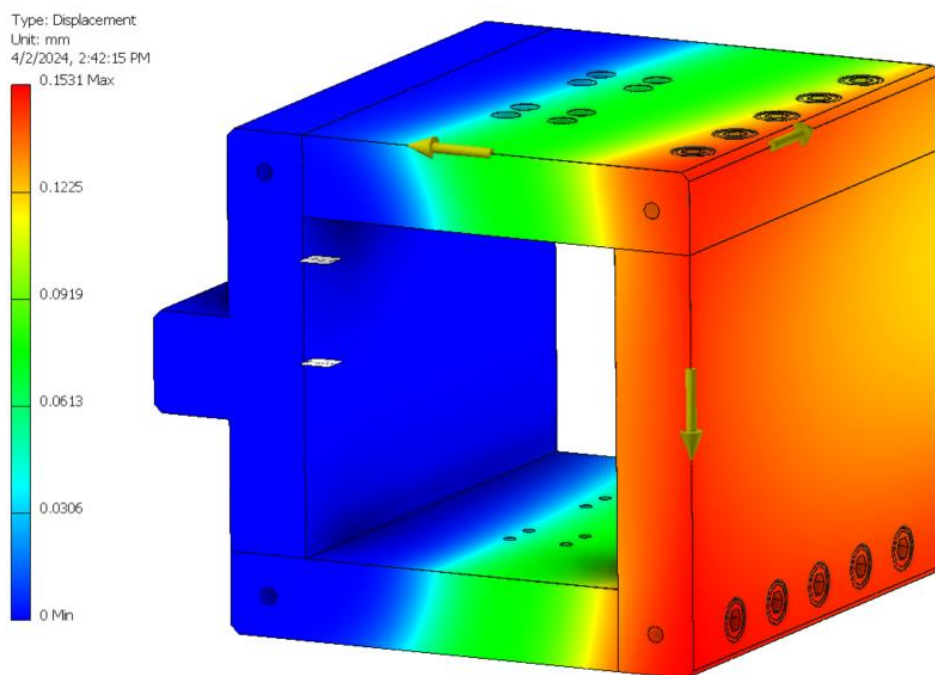
2.6.2. A külső egység ellenőrzése

Elengedhetetlen számunkra, hogy a külső egység megfelelően ellenálljon a mechanikai igénybevételeknek, különösen az a rész, amellyel rögzítjük a berendezést az eszterga késtartójába.

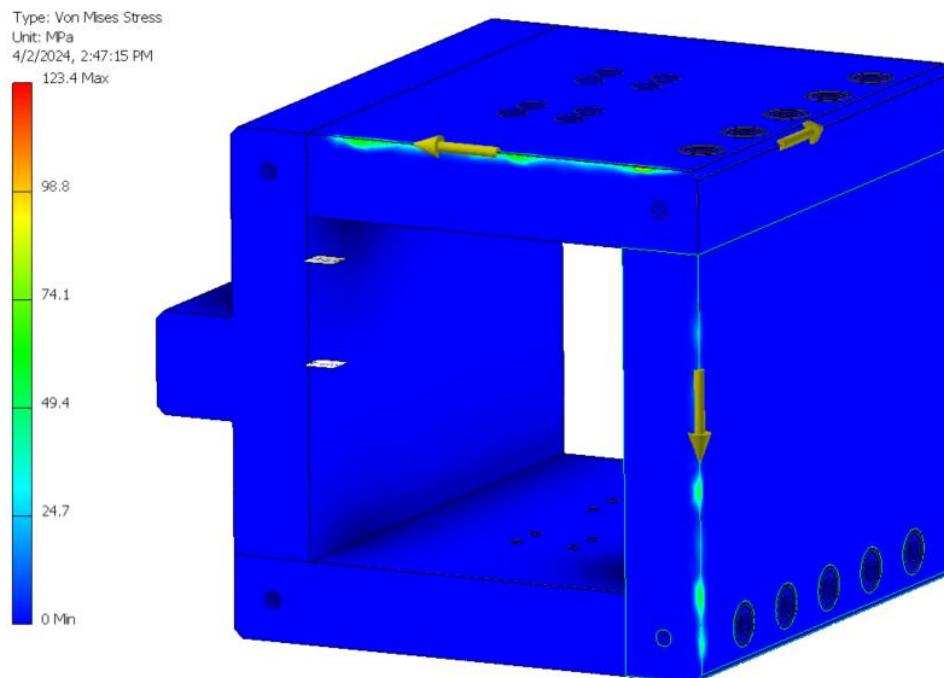
4.táblázat: A külső rész és az azt összefogó csavarok anyagtulajdonságai

Anyagtulajdonságok							
Megnevezés		EN AW 7075 Aluminium		Megnevezés		Steel 8.8	
Általános	Sűrűség	2.8 g/cm^3		Általános	Sűrűség	7.85 g/cm^3	
	Folyáshatár	447 MPa			Folyáshatár	967 MPa	
	Szakítószilárdság	524 MPa			Szakítószilárdság	1018 MPa	
Feszültség	Young-modulus	71.3 GPa		Feszültség	Young-modulus	220 GPa	
	Poission-tényező	0.33			Poission-tényező	0.275	
	Nyírási Modulus	26.8 GPa			Nyírási Modulus	86.27 GPa	

A terhelések mindegyike x, y és z irányban is 5kN nagyságú, ezzel szemben a valós terhelés sohasem fog ekkora értékeket elérni.



28.ábra: Ellenőrzés elmozdulásra



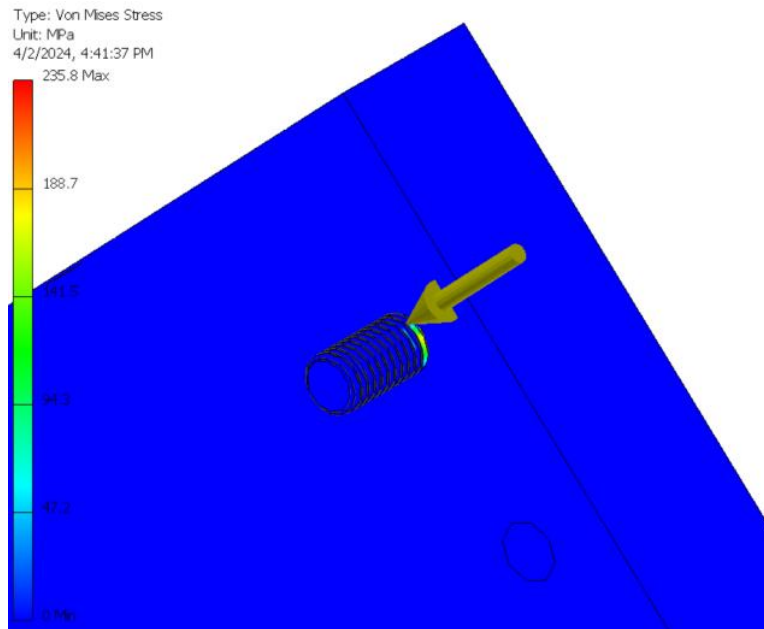
29.ábra: Feszültségek alakulása

A végelem analíziseket az Autodesk Inventor nevű szoftver segítségével végeztem el melynek eredményei a fenti ábrákon láthatóak. Amint azt a 28.ábra bal oldalán levő skálán megfigyelhetjük a maximális elmozdulás a terhelések hatására 0.15 mm . A 29.ábrán a feszültségek alakulása látható, melynek legmagasabb értéke 123.4 MPa , ez az érték szintén elenyésző az alumínium folyáshatárához képest, ami a 4.táblázatban van megadva.

Az eredmények arra engednek következtetni, hogy a külső egység kellőképpen ellenálló a megmunkálások során fellépő igénybevételeknek.

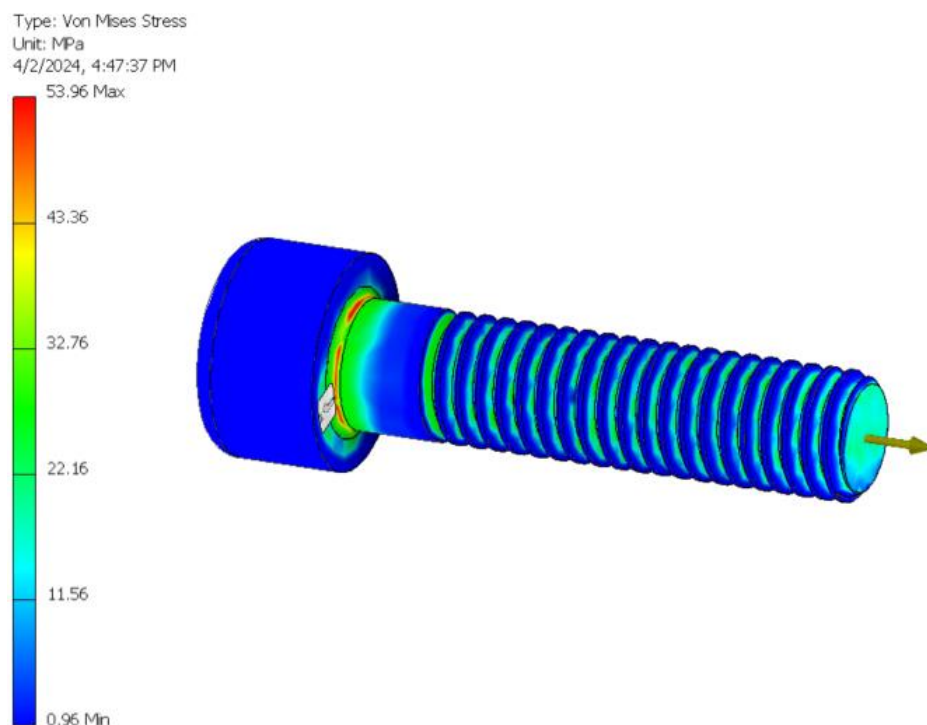
2.6.3. A csavarok ellenőrzése

A külső és belső egység egyaránt ISO 4762 szabványú, M6x25 mm-es csavarokkal van összefogva, melyeket szükséges ellenőrizni húzásra és nyírásra is egyaránt. A külső egységet oldalanként 10 darab csavar fogja össze, tehát a teljes terhelés eloszlik közöttük, ami azt jelenti, hogy egy csavar 500 N nagyságú húzó és nyíróerőnek kell ellenálljon.



30.ábra: Ellenőrzés nyírásra

A végelem analízis azt mutatja, hogy 500 N nagyságú nyíróerő esetében a nyírófeszültség maximális értéke 235.8 MPa. Ez az érték csupán egy töredéke a csavar folyáshatárának, melynek értéke az 4.táblázatban van feltüntetve.



31.ábra: Ellenőrzés húzásra

Húzó igénybevétel esetén a csavarban létrejövő feszültség még csak meg sem közelíti azt az értéket melyre az anyag elérné a rugalmas alakváltozás határát és megfolyna. Összességében arra a következtetésre jutunk, hogy a rögzítésére szolgáló csavarok kellően nagy ellenállást tanúsítanak, mint a nyíró, mint a húzó igénybevételekkel szemben.

2.7. Mérési eredmények, következtetések

A berendezés összeszerelése után méréseket végeztünk különböző forgácsolási paraméterek mellett. Az eredményeket összehasonlítottuk a számolt értékekkel, valamint vizsgáltuk a mérések megismételhetőségét. Összesen négy beállítással dolgoztunk, valamint beállításonként három mérést végeztünk. A használt forgácsolási paramétereket az alábbi táblázatban láthatjuk.

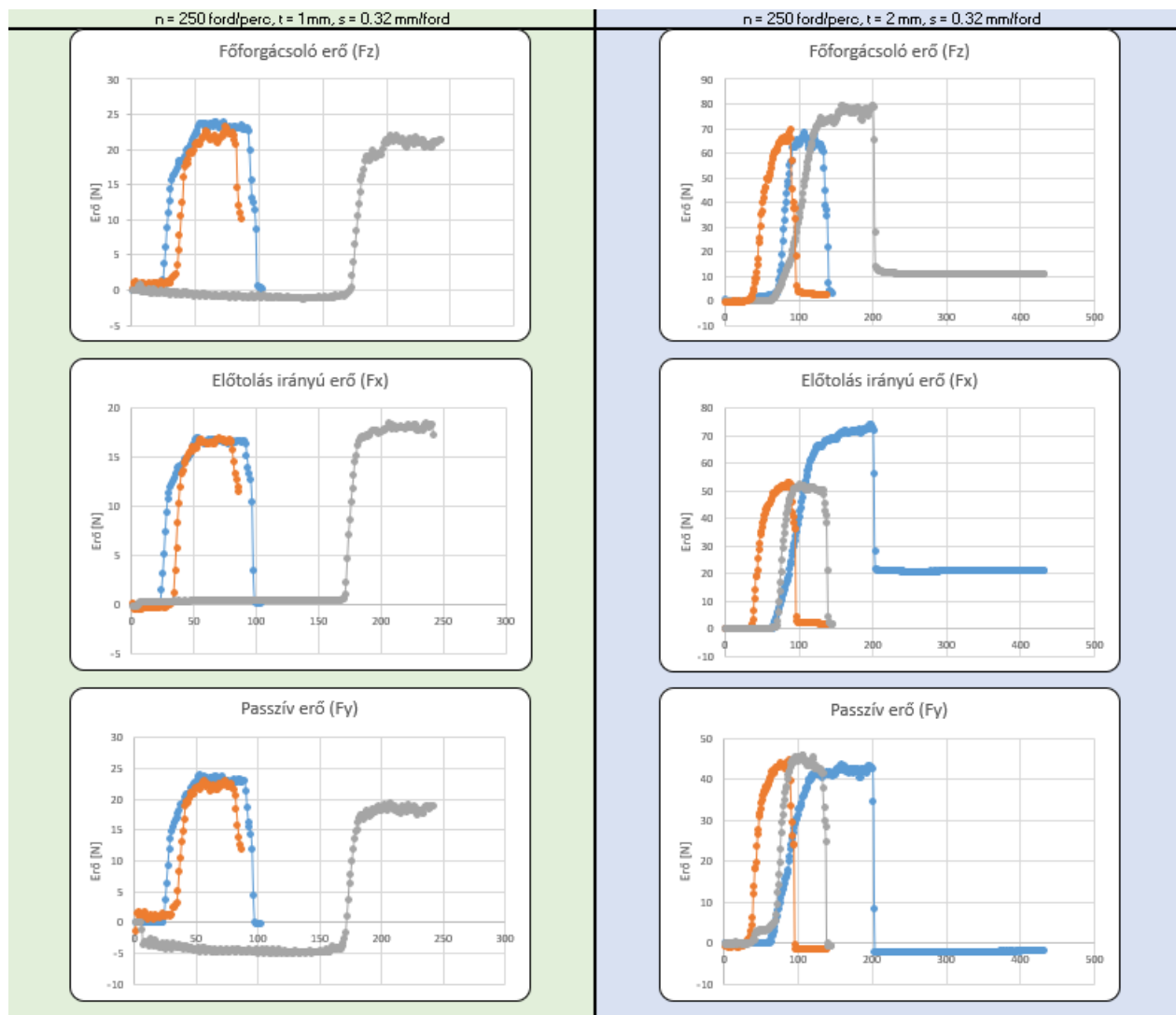
5.táblázat: Forgácsolási paraméterek

	Fordulatszám [1/min]	Előtolás [mm/ford]	Fogásmélység [mm]
1	250	0.32	1
2	250	0.32	2
3	250	0.56	1
4	250	0.56	2

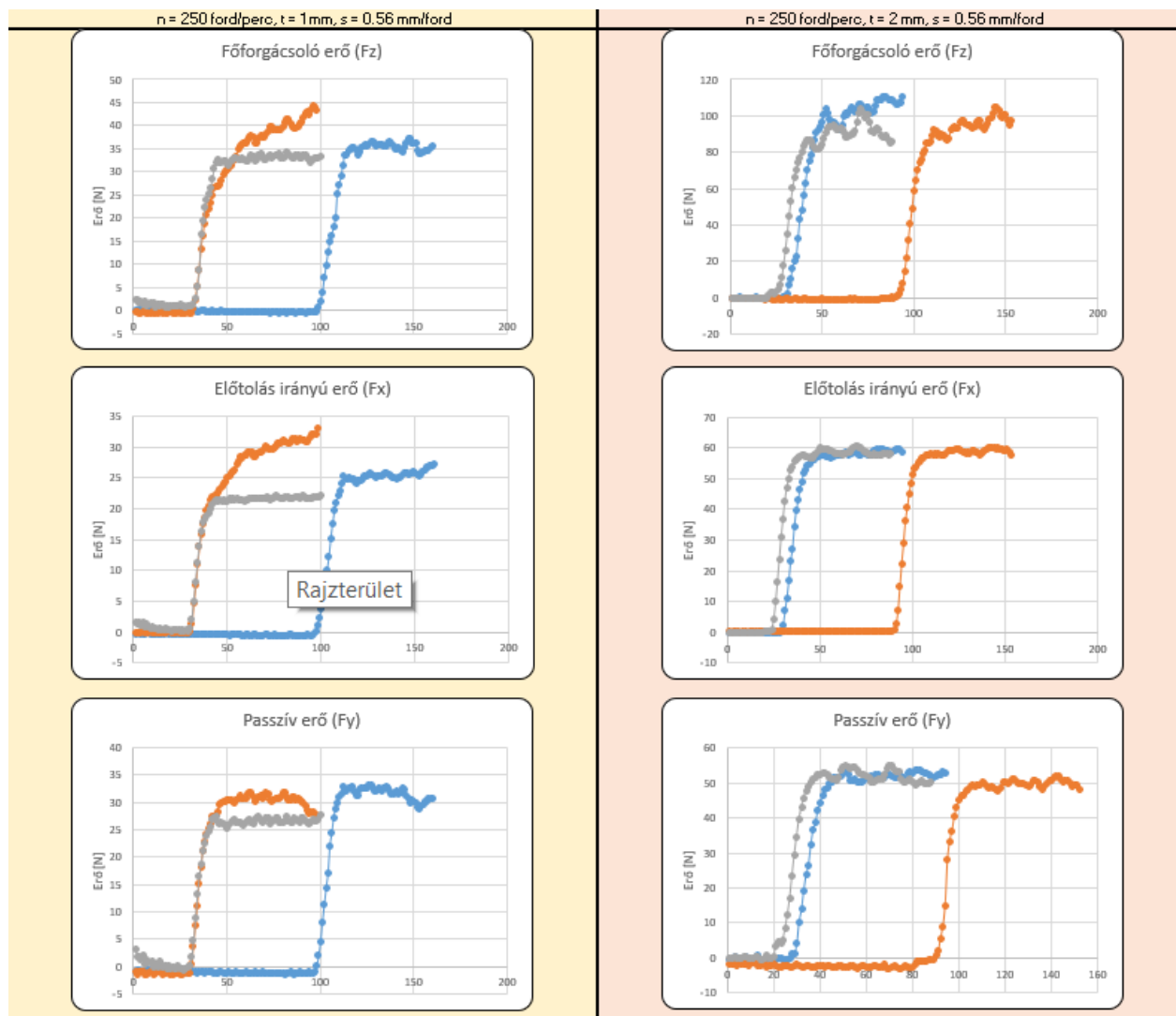
A mérések során EN AW 7075 típusú alumínium rudat alkalmaztunk munkadarabként, amelyet egy 80°-os élelhelyezési szögű gyorsacél esztergakéssel munkáltunk meg. A rögzített értékek feldolgozása után az alábbi eredményeket kaptuk.

6.táblázat: Forgácsolási erő komponenseinek számolt értékei különböző forgácsolási paraméterek esetén

	Számolt értékek			
Paraméter száma	1	2	3	4
Fz [N]	436	872	663	1327
Fx [N]	28	56	30	60
Fy [N]	15	30	17.5	35



32.ábra: Mérési eredmények 0.32 mm/fordulat-os előtolás mellett



33.ábra: Mérési eredmények 0.56 mm/fordulat-os előtolás mellett

Ahogy korábban már említettem, minden beállításhoz három mérést végeztünk, amiket komponensenként összesítettünk a fenti ábrákon. A grafikonokból jól látható, hogy bár a mért értékek jelentősen különböznek a számolt értékektől, az ismételhetőség mégis nyilvánvaló. Kivéve néhány minimális eltérést, amelyeket a beállítások pontatlanságának tulajdonítunk, az eredmények összességében stabilak és ismételhetőek.

A mért értékek jelentős eltéréseinek okai egyelőre még nem ismertek, valószínűleg a szenzorok kalibrálásában keresendő a hiba. Annak érdekében, hogy ezt megerősítsük, szükséges lesz ellenőrizni a szenzorokat egy kontrollszenzor segítségével, amelyről tudjuk, hogy valós eredményeket szolgáltat.

3. Irodalomjegyzék

- [1] Hollanda, D. A forgácsolás alapjai. Kolozsvár, Scientia Kiadó, 2008.
- [2] Szőrös, G. Az egyetemes esztergagép működése, szerkezete, szerszámai, készülékei és gyakori típusai. Budapest, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [3] MGN 9C lineáris csapágyak
<https://www.lontentech.com/products/mgn9h-9c-linear-guide-9mm-100-150-200-250-300-350-400-450-500-550-600-mm-linear-rail-mgn9h-or-mgn9c-block-cnc-3d-printer>
(utolsó letöltés: 2024.04.14)
- [4] Cavity Eye RC15-5 erőmérő cellák
<https://cavityeye.com/moulding-technology>
(utolsó letöltés: 2024.04.14)
- [5] EN AW 7075 alumínium tulajdonságai
<https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6>
(utolsó letöltés: 2024.04.14)
- [6] 8.8-as csavar acél tulajdonságai
https://www.nbk1560.com/images/en/product/technical_data/teiketubuhin_seishitsu_NBK/teiketubuhin_seishitsu_NBK_1.pdf
(utolsó letöltés 2024.04.14)
- [7] Kakucs, A. Szilárdságtan (jegyzet)
https://moodle.ms.sapientia.ro/pluginfile.php/15018/mod_resource/content/1/Szilardsagta n.pdf
(utolsó letöltés 2024.04.14)