

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

FARKAS JÁNOS

Soproni Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar

Sopron

2018

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Csóka Levente egyetemi tanár

Doktori program: Rosttechnikai és nanotechnológiai tudományok

Programvezető: Prof. Dr. Winkler András és Prof. Dr. Csóka Levente

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

Forgácsolt polimer alkatrészek gyártási és termékértékelési idejének optimalizálása

Készítette: Farkas János

Témavezető: Prof. Dr. Csanády Etele, Prof. Dr. Csóka Levente

Sopron

2018

Forgácsolt polimer alkatrészek gyártási és termékváltási idejének optimalizálása

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskolája

Rosttechnikai és nanotechnológiai tudományok programja

Írta:
Farkas János

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola

Rosttechnikai és nanotechnológiai tudományok programja
keretében

Témavezető: Prof. Dr. Csanády Etele
Elfogadásra javaslom (igen / nem)
..... (aláírás)

Prof. Dr. Csóka Levente
Elfogadásra javaslom (igen / nem)
..... (aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton 100 % -ot ért el,

Sopron, 2017.06.13.
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr.) igen /nem
(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen /nem
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron,

.....
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDHT elnöke

Nyilatkozat

Alulírott Farkas János kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan rész, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával jelöltem.

Sopron, 2018.....

.....

aláírás

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	8
KIVONAT.....	9
ABSTRACT	10
I. BEVEZETÉS	11
I.1. A téma jelentősége	11
I.2. A választott témát indokló peremfeltételek	12
I.3. Célkitűzéseim.....	16
II. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	18
II.1. A forgácsoló megmunkálások	18
II.1.1. A forgácsolási paraméterek esztergáláskor	19
II.1.2. A forgácsolóerő	20
II.1.3. Az esztergált felületi érdesség	23
II.2. A forgácsolási paraméterek hatása a felületi érdességre és a forgácsolóerőre	25
II.3. A forgácsoló szerszámok jellemzői	31
II.4. A forgácsoló szerszámok kopása.....	35
II.4.1. A kopás megjelenési formái	35
II.4.2. A szerszámkopás hatása a felületi érdességre és forgácsoló erőre	37
II.5. Műanyagok forgácsolása	40
II.6. Műanyagok hőkezelése.....	42
II.6.1. A maradó feszültség	42
II.6.2. A hőkezelés alkalmazása	45
III. A KÍSÉRLETEKNÉL FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	48
III.1. Szerszámgép, hűtőfolyadék és programozás.....	48
III.2. A felhasznált szerszámok	49
III.3. A vizsgálat anyagok	50
III.3.1. Poliamid 6 (PA6).....	51
III.3.2. Polikarbonát (PC).....	51
III.3.3. Polietilén (PE)	51
III.3.4. Poli-éter-éter-keton(PEEK)	51
III.3.5. Poli-éterimid (PEI)és Polifenilén-szulfon (PPSU).....	52
III.3.6. Poli-etiléntereftalát (PET)	52
III.3.7. Polioximetilén, vagy poliacetál (POM).....	52
III.3.8. Polipropilén (PP).....	52
III.3.9. Poli-vinilklorid (PVC).....	53

III.4. A forgácsoló erő mérése és kiértékelése	54
III.5. A felületi érdesség mérése és kiértékelése	56
III.6. A hőkezelés vizsgálata	61
IV. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK	62
IV.1. Az előtolás változtatása.....	62
IV.2. A forgácsolási sebesség változtatása.....	67
IV.3. A fogásvétel változtatása	70
IV.4. A forgácsoló szerszám csúcsrádiuszának változtatás	74
IV.5. Hasonló élgeometriájú szerszámokkal végzett forgácsolás	79
IV.6. Az élelhelyezési szög hatása	81
IV.7. A hűtő-kenőfolyadék.....	85
IV.8. A szerszámkopás vizsgálata.....	87
IV.9. A beremegés jelensége.....	91
IV.10. A felületi érdességet és a forgácsolóerőt befolyásoló tényezők.....	92
IV.11. A felületi érdesség képletének illesztése hőre lágyuló műanyagokhoz	96
IV.11.1.A lapka csúcsrádiuszának vizsgálata	98
IV.11.2.A megállapítások kiterjesztése többféle műanyagra	99
IV.11.3.A csúcsrádiusz összefüggés kiterjesztése többféle műanyagra.....	99
IV.11.4.A hőre lágyuló műanyagokra optimált Bauer-összefüggés általánosítása.....	102
IV.12. A fajlagos forgácsolóerő meghatározása hőre lágyuló műanyagoknál.....	103
IV.13. Az Ra és Rz paraméterek közötti összefüggések	111
IV.14. A hőkezelési paraméterek vizsgálata	113
V. ÖSSZEFOGLALÁS.....	117
VI. IRODALOMJEGYZÉK.....	120
VII. MELLÉKLETEK	127
A. melléklet. A lefuttatott CNC program	127
B. melléklet. A felhasznált, rendszerezett forgácsolási adatok	128

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

a, b, c	Másodfokú egyenlet illesztési segédváltozók
A, B, C, D	Optimált Bauer-formula együtthatók
α	Fajlagos forgácsolóerő paraméter
β	Fajlagos forgácsolóerő konstans eltolás
CF	Carbon fiber / szénszál erősítés
CF30	30 tömegszázalék szénszál erősítés
CG 32-3	32 tömeg% szén 3 tömeg% grafit erősítő szerkezet
CVD	Chemical vapor deposition / kémiai bevonatképzés
GF	Glass fiber / üvegszál erősítés
GF30	30 tömeg% üvegszál erősítés
GR	Regenerált grafit erősítőanyag
GR 15	15 tömegszázalék regenerált grafit erősítőanyag
κ_c	Hőre lágyuló műanyagoknál megállapított fajlagos forgácsoló erő
LED	Light emitting diode - fénykibocsátó dióda
λ_c	Cut-off - felületi érdesség mérési paraméter
MCD	Monokristályos gyémánt
PA	Poliamid
PAI	Poliamid-imid
PE	Polietilén
PEEK	Poli-éter-éter-keton
PEI	Poli-éterimid
PES	Poli-elilénszulfon
PET	Poli-etiléntereftalát
PI	Poliimid
POM	Polioxi-metilén
POM ELS	Polioximetilén vezetőképes korom adalékkal
PP	Polipropilén
PPSU	Poli-fenilénszulfon
PTFE	Poli-tetraflour-etilén
PVC	Poli-vinilklorid
PVD	Physical vapor deposition / fizikai bevonatképzés
R	Felületi érdesség [μm]
Ra	Átlagos érdesség [μm]
r_ϵ	Szerszám csúcsrádiusz [mm]
Rp	Profil maximum csúcsmagasság [μm]
Rt	Érdesség profil magasság [μm]
Rz	Érdesség magasság [μm]
SiC	Szilícium-karbid bevonat
SSE	Sum of squared errors / hibatagok négyzetének összege
SSR	Regression sum of squares / regresszióval magyarázott változékonyág
TiCN	Titán carbi-nitrid szerszámbevonat
TiN	Titán nitrid szerszámbevonat
WC	Wolfram-karbid

KIVONAT

A dolgozat célja - valós ipari adatokat, valamint tapasztalatot felhasználva-, hogy a műanyagok forgácsolása során felmerülő gondokra megoldást találjon a folyamat ismeretének kibővítésével. Egy előzetes kutatás során a leggyakrabban előforduló problémák derültek ki, amik a forgácsoló erőhöz, a felületi érdességhez, a szerszámkopáshoz, és a nem megfelelő hőkezeléshez köthetők. A forgácsolás, azon belül az esztergálás elméleti hátterének bemutatásán kívül a témához kapcsolódó szakirodalmak elemzése alkotja a második fejezetet. Ezt követi a felhasznált eszközök, módszerek és anyagok bemutatása. A forgácsolóerő méréséhez alkalmazott háromirányú piezoelektromos erőmérő szenzort az irodalomkutatás alapján gyakran alkalmazzák a kutatások során. A tapintásos felületi érdesség mérés az iparban elterjedt, gyakran alkalmazott módszer. Cél az iparihoz nagyon hasonló körülmények megteremtése, ez indokolta a termelésben is használt eszterga megmunkáló központ, és gyártásban is használt szerszámok alkalmazását. A felhasznált anyagok alapvetően jellemzőek a műanyagforgácsoló iparra, ezen kívül még több különleges műszaki műanyag kerül felhasználásra. A mérési eredményeinek kiértékelése a forgácsolási paraméterek (előtolás, forgácsoló sebesség, fogásvétel), a szerszámozási paraméterek (csúcsrádiusz, élelhelyezési szög, lapkagyártmány), a hűtőközeg és a kopás hatását mutatja be a felületi érdességre, és a forgácsolóerőre, grafikonok segítségével. A felületi érdesség a Bauer-formula műanyagokra optimált alakjával nagyobb pontossággal határozható meg, a forgácsolóerő kiszámításához pedig fajlagos forgácsolóerő határozható meg. A dolgozat ezen kívül foglalkozik a kopás hatásaival, és megjelenési módjaival. A hőkezeléshez kapcsolódó mérések eredményei a termék falvastagságának, valamint a fűtési és hűtési sebességnek a hatását mutatják be a termék felületének és legbelső pontjának hőmérséklet-különbségére.

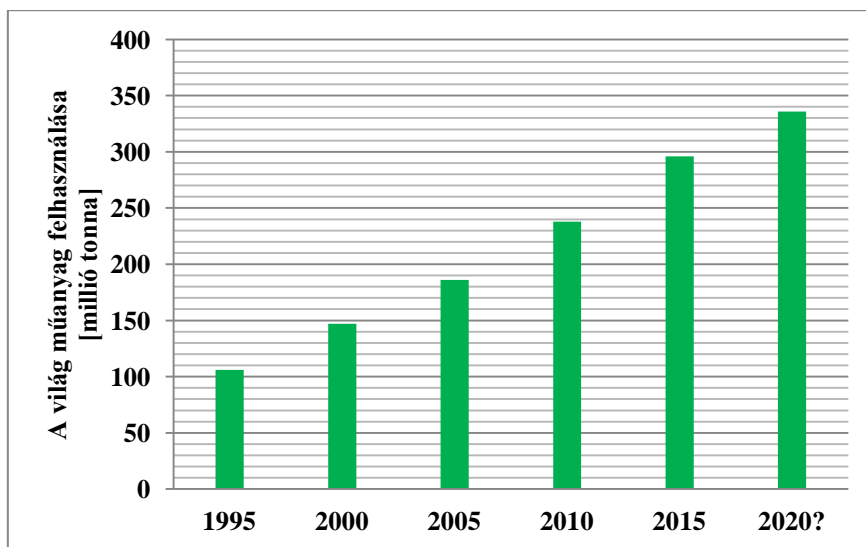
ABSTRACT

This dissertation presents a study of surface roughness, cutting force during machining of thermoplastics. The variables were many process parameters, including cutting parameters, tool geometry and environmental factors such as the coolant used. The cutting force was measured using a piezoelectric force meter which was attached to the cutting machine's revolving head. The surface roughness was measured after the cutting process was complete using a mechanical touch method. A wide range of thermoplastic materials and cutting layouts were used to give a broader understanding of the topic. After the measurements were taken, the data were evaluated statistically and the effects of each parameter are illustrated graphically. The large number of parameters required would make such an equation unusable, and difficult to apply quickly. The goal is thus to create a simple formulation with three or four inputs to predict the final surface roughness of the machined part and the cutting force during the turning process within adequate tolerances. An optimised Bauer equation was proposed to predict surface roughness and material dependent coefficients were determined. A graph was illustrated to show the linear correlation between the multiplication of depth of cut and feed rate, and the cutting force value; coefficient of cutting force was also determined to many thermoplastics.

I. BEVEZETÉS

I.1. A téma jelentősége

Napjainkban jól megfigyelhető tendencia, hogy a műanyagok, ezáltal a műanyagból készült termékek iránti kereslet évről évre növekszik. Ez a változás figyelhető meg az I.1. ábrán is, ahol az éves szinten felhasznált műanyagok mennyiségét mutatom be. A felhasznált műanyagokat alapanyag szempontjából döntően a poliolefinok és a PVC alkotják. Ha a csoportosítás szempontját az elkészült termék jelenti, döntő többsége csomagolástechnikai termék (pl. fólia, üreges test, stb.) vagy fröccstermék, ami széles termékpalettát jelent.



I.1. ábra. A világ műanyag felhasználásának változása

A korábban említett felhasználási volumennövekedés természetesen megfigyelhető a műszaki műanyagok (pl. PA, PET, PC, POM) esetében is. Ez egyrészt az egyre növekvő gyártási igényeknek, másrészt pedig a korábban más anyagból (pl. fémből) készült termékek műanyagra kiváltása miatt következett be. A kiválthatóságot főleg a műanyagok folyamatos fejlesztésének, mechanikai és termikus tulajdonságaik javulásának köszönhetik. Nagy előnyük emellett a kis tömegük, általában olcsóbb árú és gyors gyárthatóságuk. [1][2]

Hőre lágyuló műanyag termékek gyártásakor a technológiák nagy része az ömledék (vagy képlékeny) állapot > alakadás > hűtés folyamattal írható le. A tömeggyártásban szinte kizárólag ilyen gyártással találkozunk, de kisebb darabszámok, illetve prototípusgyártás esetén bővül a gyártástechnológiák köre. Prototípusgyártás, illetve nagyon kis szériaszámok esetén már számos RPT (Rapid prototyping) eljárás is rendelkezésre áll. Nagy előnyük, hogy veszteségmentesek, illetve bármilyen bonyolult, alámetszett termékgeometria is kialakítható. Hátrányuk lehet pl. a magas alapanyag ár, illetve a felhasználható műanyagok viszonylag szűk köre.

A forgácsoló eljárások is alkalmazhatók prototípusgyártáshoz, de gazdaságos lehet nagyobb szériák esetén is, főleg ha a kívánt geometriát (pl. kisméretű belső menetek vagy többszörösen alámetszett alkatrészek), vagy anyagot (pl. PTFE) más eljárással csak nagyon költségesen, vagy egyáltalán nem lehet gyártani. Egyik fő hátránya a viszonylag magas ciklusidő, valamint az, hogy nagymennyiségű hulladék (forgács) keletkezik, ami adott esetben a hűtő-kenőfolyadék miatt szennyezett is lehet.

A forgácsoló szakirodalmak nagy része fémek, főleg acélok forgácsolásáról szól, nagyon kevés kutatást találni, ami a dolgozat témájával foglalkozik. A műanyagok forgácsolásával kapcsolatos igények is folyamatosan növekednek, így kiemelt szereppel bír a termelési határfok növelése. Ez csak úgy lehetséges, ha jól ismert az anyagok, a szerszám, a forgácsolási paraméterek hatását műanyagok forgácsolásakor. Számos különbség adódik a műanyagok és a fémek forgácsolása között. Ilyen például –a teljesség igénye nélkül– hogy a műanyagok az acélokhoz képest könnyebben deformálhatók, ami a forgácsleválasztáskor előny, de a befogáskor, rögzítéskor hátrányt jelent. Hőtani szempontból vizsgálva az olvadáspontjuk jóval alacsonyabb a fémekénél, így a forgácstöben tapasztalható hőfejlődés miatt könnyebben megolvadnak, ezért sokkal érzékenyebbek a megfelelő hőelvezetésre.

I.2. A választott témát indokló peremfeltételek

Az előzetes kutatások fő célja, hogy a műanyagok forgácsolása közben szerzett saját tapasztalatokat, valamint az EuropTec Kft. által biztosított 2012 és 2015 közötti, több mint 8000 eszterga megmunkáló központhoz köthető termékváltás adatait tartalmazó adatbázist elemezve megállapítsam, hogy mik azok a leggyakoribb problémák, amelyek előfordulnak. Az adathalmaz rendkívül tág, főleg üzemvezetési adatokat tartalmaz, azonban számos esetben, amikor a megállapított termékváltási időt a gépbeállító túllépte, vagy váratlan hiba adódott, szöveges megjegyzést írt a folyamat lezárásához. Ezek a szöveges megjegyzéseket alapvetően az alábbi csoportokba sorolhatók:

Oktatás: Az ilyen jellegű beírások főleg az új dolgozók betanításához köthetők. Nem nevezhető hibának, de természetesen többlet idő ráfordítást igényelnek. A továbbiakban nem foglalkozom vele.

Anyaghiba: Az alapanyagból adódó hibákat foglalja össze. Az alapanyag minősége nem minden esetben állandó, ez főleg a beálláskor derül ki. Úgy lehetne kivédeni, hogy a beérkező anyagot bevizsgálva kiderüljön, hogy mennyire tér el egy korábbi, etalonnak választott szállítmánytól. Egy ilyen vizsgálat kiépítése nagy anyagi, és szellemi befektetés igényelne, ám az alap problémát, hogy az anyag szállítmányonként eltér, nem szüntetné meg, csak kimutatná a jelenlétét. Másik ide tartozó beírás a nem megfelelő darabolás. Elég ritka hiba, és gyártásközi minőségellenőrzéssel megszüntethető. A harmadik, és a kutatások szempontjából legérdekesebb, viszonylag gyakran előforduló gond, hogy az anyag hőkezelése nem történt meg, vagy az nem a megfelelő módon történt meg. A nem megfelelő hőkezelés legegyszerűbben akkor vehető észre, amikor a rúdanyag nagymértékben meggörbül.

Ezt a nem megfelelő tárazás, a túl gyors hőmérsékletváltozás (hűtési-fűtési sebesség) okozta hősokk, esetleg a túl rövid hőtartási idő (ami alatt a belső feszültség le tud épülni) miatt következik be. A hőkezelés másik káros következménye, hogy az adott munkadarab "elmászik", azaz a forgácsolás után időben elnyújtott, nem kívánt deformációt szenved. Ezek közül néhány példa, amikor az elméletileg hengeres geometria oválissá válik, mérete változik, vagy a darab a hossz tengelye mentén elhajlik.

Szerszámhiba: A szerszámhiba alatt elsősorban nem a kopott szerszámot értem. Az adott szerszámmal nem végezhető el a forgácsolási művelet, mert a szerszám profilja nem megfelelő (pl. menetekék, menetfűrő), vagy a szerszám által forgácsolt felület nem megfelelő (pl. egyes bevonatos szerszámok, nem megfelelő élgeometria). Lehetséges még az is, hogy a szerszám nem fér el. Ilyen lehet pl. egy furatkés, amivel a furat alját nem lehet feloldalazni.

Programhibák: Ezt a hibatípust kétfelé lehet bontani. Az első csoportot a programozási hibák alkotják. A vizsgált időintervallumban a CNC programok írása CAM szoftver nélkül, manuálisan történt, így nagyobb volt a hibalehetőség. Ide tartoznak a geometriai, valamint G-kód hibák. A jelenség CAM szoftver alkalmazásával és megfelelő postprocesszorral nagyban csökkenthető. Másik típus a helytelenül megválasztott forgácsolási paraméter. Itt alapvetően a fogásvételre, előtolásra, valamint forgácsolási sebességre kell gondolni, ami nem megfelelő felületi minőséget eredményezett.

Új termék: Egy korábban nem gyártott, új termék gyártása során számos probléma adódhat. A rajzi előírásoknak megfelelő termék gyártásához szükséges lehet a szerszámok, forgácsolási paraméterek, megfogás, kifogási hossz, stb. módosítása is. Ha nem ismert a műanyagok viselkedése forgácsolás közben, ezeket kísérletezéssel kell kitapasztalni, ami a passzív gépi időt nagyban megnöveli.

Áthelyezés másik gépre: A vizsgálatok többféle eszterga-megmunkáló központot tartalmazó műhelyhez köthetők. Mivel a gépek méret, elrendezés, valamint vezérlés szempontjából is különböznek, egy adott munka átcsoportosítása többlet időt igényel.

Gépi meghibásodás: Meghibásodott géppel, ha egy hiba folyamatosan fennáll, nem lehet alkatrészt gyártani. Ez a hiba nagy időkieséssel jár, kivédeni a teljes megelőző karbantartással lehetséges.

Előkészítési hibák: Előkészítés alatt a forgácsolást megelőzően, az adott folyamathoz tartozó minden szükséges anyagnak, eszköznek és szerszámnak a géphez készítését értem. Gyakran előforduló hiba, érdekessége, hogy gyakorlatilag teljesen megszüntethető megfelelő előkészítéssel és az előkészítés felülvizsgálatával. A hibát az okozza, hogy a gyártáshoz szükséges eszközök (szerszámok, és készülékek) nem lettek előkészítve, vagy gyakoribb, hogy kopott szerszám kerül a megmunkáló központ szerszámbe fogójába. A szerszám élességének ellenőrzése nem mindig végezhető el szemrevételezéssel, vagy mikroszkóppal támogatott analízissel. Egy esetleges szerszám nyomon követéssel (forgácsolási hossz vagy idő), esetleg forgácsolási folyamat monitoringgal (optikai vizsgálat, erőmérés, stb.) oldható meg.

MEO-jellegű, mérési problémák: Az ide tartozó időkiesések fő okozója a bonyolult mérések időszükségletéből, illetve a minőség-ellenőrzés kapacitásából adódnak. Termelés-management problémák, így a továbbiakban nem foglalkozom vele.

Technológia okozta hibák: A nem megfelelő technológia, azaz a termékre megtervezett gyártási stratégiában előforduló hibák nagy jelentőséggel bírnak. A darabidő, és a beállási idő megállapítása is ez alapján zajlik. A nem megfelelő technológia nem teljesíthető gyártási időt (többlet költséget) szab meg a termékre. A technológiai hibákat főleg a műanyagok forgácsolásakor jelentkező mechanikai korlátok okozzák, plusz műveletek, más megfogások tervezése szükséges.

Készülékgyártás miatti időtúllépés: A termékhez szükséges lágyopfák, támasztócsapok, mérőcsapok, stb. gyártási ideje. Nem szüntethető meg, de a termelési folyamatot nagyban segíti, ha ezeknek az eszközöknek egy része külön gépeken, a termelés folyamatosságának zavarása nélkül készül.

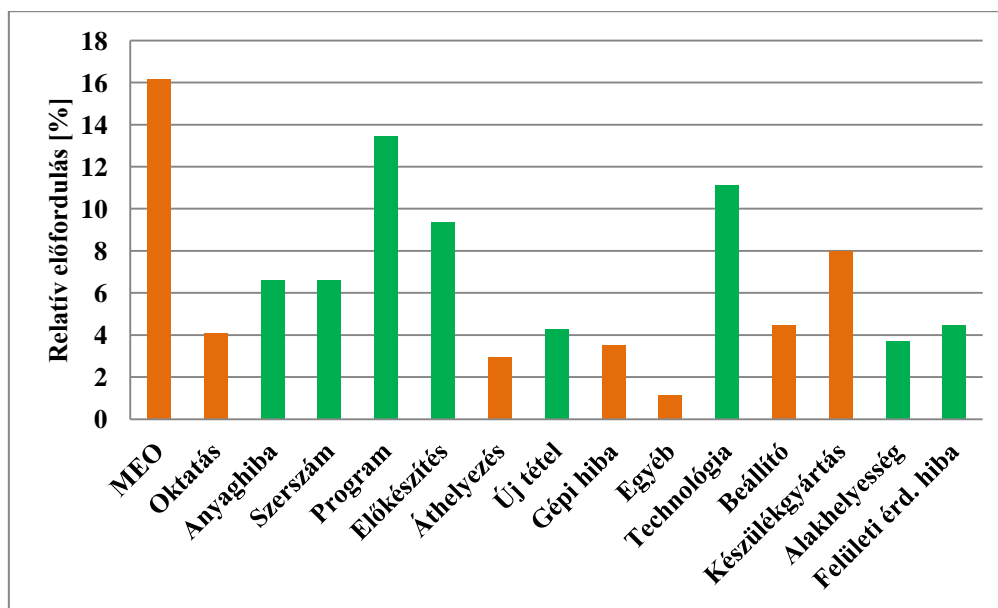
Gépbeállító saját maga okozta túllépés: Előfordulhat, hogy a gépbeállító személy figyelmetlensége okozza a hibát, ezt nehéz lenne számszerűsíteni, és egy univerzális megoldást találni rá. Egy bizonyos: ha az oktatás, és betanítás megfelelő minőségű, csökkenthető ez a fajta hiba.

Beremegés, nem megfelelő felület: Az ilyen jellegű hibák viszonylag gyakran előfordulnak, a termék minőségét érintik. Nem megfelelő felület esetén nem lehet egyértelműen megjelölni a forrását. Ha a nem alkalmas szerszámot kizártuk, még mindig lehet például helytelenül megválasztott forgácsolási paraméter. Ha a gépbeállítás megfelelő és a termék a rajzi méreteknél és tűrésmezőknek megfelel, gyakran előfordul, hogy csak a felület nem az előírt érdességű, esetleg csíkos, vagy beremegett. Ez a forgácsolási paraméterek megváltoztatásával nem mindig szüntethető meg, a jó megoldás gyakran sok időbe telik, és csak a korábban megállapított darabidő növelésével kiküszöbölhető. Néhány esetben szükséges egy külön, simító művelet beiktatása is, vagy a megfogás módosítása. Szélsőséges, de nem ritka eset az sem, amikor a terméket csak úgy lehet elkészíteni, hogy egyes elemeket külön megfogásban, marógépen készítünk készre, vagy a termék felületét utólagosan csiszolni és/vagy polírozni kell. A külön művelet nagyban növeli az átfutási időt és a termékre vetített költséget is.

Alakhelyességgel kapcsolatos gondok: Szintén gyakori ok, a hiba forrása felismerhető, és megnevezhető, de annak teljes megszüntetése nem lehetséges, csak a tűrésmezőn belüli csökkentése. Kétfelé oszthatjuk ezt a jelenséget; kihajlás jellegű, valamint ovalitási hibákra. Kihajlásról akkor beszélhetünk, ha a munkadarab hossz/átmérő aránya túl nagy, emiatt a forgácsolási erő hatására kihajlik, a forgácsolt felület alakhibás, kúpos lesz. A forgácsolóerő jóval kisebb, mint fémek esetén, viszont a műanyagok hajlító modulusa is jóval alacsonyabb. A hiba egyes esetekben támasztócsúccsal javítható, de ennek mind a megmunkálás (a darabon nem maradhat központfurat, vagy annak eltüntetése külön művelet lenne.), mind a gép szempontjából (a vizsgált műhelyben javarészt ellenorsós támasztócsúcs nélküli gépek voltak) vannak korlátai. A másik ilyen jellegű hiba az ovalítás. Akkor beszélünk erről a hibáról, ha a köralak, vagy hengeresség tűrésbe a gyártott alkatrész nem fér bele. Az okozza, hogy a tokmány túl nagy erővel szorítja az alkatrészt, és összenyomja. Megszüntetésére logikus megoldás a szorítóerő csökkentése, ez azonban nem mindig kivitelezhető. Mivel a darabot a lecsökkentett szorítóerő a forgácsolóerővel szemben nem tartaná biztosan, elforogna. Esetleges hiba lehet az is, hogy a gép tokmányára szerelt szenzor nem jelez vissza, így a gép nyitottnak érzékelt tokmánnyal nem indul el. Egyes esetekben a hiba megszüntethető a darabba helyezett dugó, vagy speciális készülék segítségével, ami szintén többletidővel és költséggel jár. A készülék behelyezése forgácsolás közbeni megállással jár, ami a folyamatos gyártást lehetetlenné teszi, a darabidőt, és az emberi erőforrás igényt nagyban megnöveli.

Egyéb gondok: A felsorolt hibákon, többletidőt okozó eseményeken kívül előfordulhatnak még egyéb, a beállási időt növelő események. Ezek ritkábban fordulnak elő, így ezekkel nem foglalkozom.

Az I.2. ábrán látható a hibák relatív előfordulása oszlopdiaagramon megjelenítve, a szöveges értékelések alapján. A százalékos megoszlás azt jelenti, hogy a kielemezett szöveges megjegyzésekben talált összes hibát tekintem 100%-nak. Zölddel jelölve azok, ahol a hibák nagyban kiküszöbölhetőek lennének, narancssárgával azok, ahol ugyan lehetne javítani, de nagymértékű javulást nehezen lehetne elérni.



I.2. ábra. A szöveges kiértékelés megjelenítése grafikonon

I.3. Célkitűzéseim

A saját tapasztalatok alapján, illetve az adathalmaz elemzése után a következő tanulságokat lehet levonni:

Egyes hibák szervezésből, illetve folyamat nyomon követésből/ellenőrzésből adódnak, ezekkel a jelen kutatás során nem foglalkozom.

Egyes hibákat, illetve termékváltási időt növelő tényezőket nem lehet, vagy nagyon nehéz jelentősen csökkenteni, ilyen például az új dolgozó oktatására szánt idő.

Bizonyos hibák viszont a műanyagok forgácsolása közben zajló folyamatok megismerésével kiküszöbölhetőek, vagy redukálhatók. A fő cél az I.2. ábrán zölddel jelölt hiba előfordulások nagymértékű csökkentése.

A megfigyelések alapján kutatásom három fő témakör köré csoportosul:

A felületi érdesség vizsgálata: Cél a forgácsolt felületi minőséget befolyásoló tényezők megállapítása, az egyes tényezők, mint például a forgácsolási paraméterek hatásainak vizsgálata. A felületi, illetve a programozási gondok azon része, ami a felülethez köthető, csökkenhető ezzel.

A forgácsolóerő vizsgálata: Cél a forgácsolóerőt befolyásoló tényezők (forgácsolási paraméterek, szerszámgeometria) vizsgálata, a forgácsolóerő értékének megállapítása, a darab kihajlásának vizsgálatához, illetve a szorítóerő megállapításához. Főleg az alakhelyességhez kapcsolódó problémák, amelyek érintik a technológiai tervezést is.

A szerszámkopás hatásainak vizsgálata: Cél a szerszámkopás vizsgálata, illetve módszer kidolgozása annak megállapításához, hogy mikor tekinthető egy szerszám kopottnak. Azon kopási módok feltárása, amelyek műanyagok esztergálásakor megjelennek.

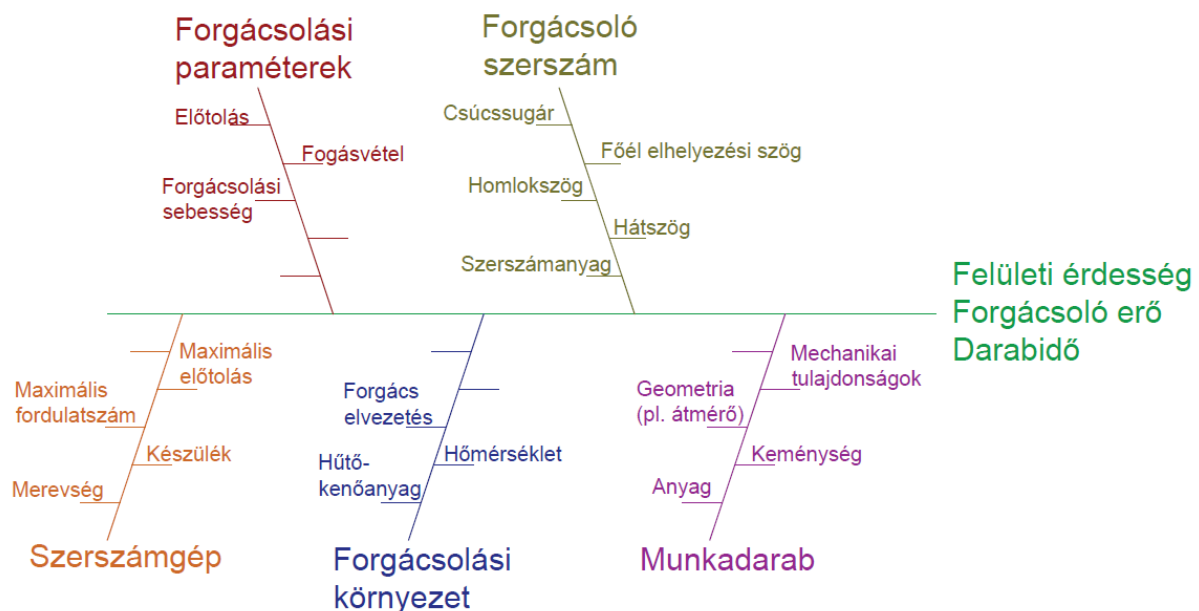
Hőkezelések vizsgálata: A anyaghibák nagy része a nem megfelelő hőkezelésből adódik. A hőkezelési paraméterek; a hűtési/fűtési sebesség és a hőntartás elemzése a darabon belül mérhető hőmérséklet-különbség szempontjából. Főleg annak vizsgálata, hogy a hőmérséklet hogyan oszlik el a darabon belül hőkezelés közben, illetve a darab falvastagsága hogyan befolyásolja ezt a hőmérsékleti gradienst.

A kutatómunka első része az elméleti háttér, valamint a rendelkezésre álló szakirodalom áttanulmányozására épül. Ezt követően az egyes témakörökön belül megfigyelések, majd erre alapozott vizsgálatok, mérések elvégzése a cél. A mérési eredmények kiértékelése után a fenti pontokba szedett témakörökhöz kapcsolódó összefüggések megállapítása.

II. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

II.1. A forgácsoló megmunkálások

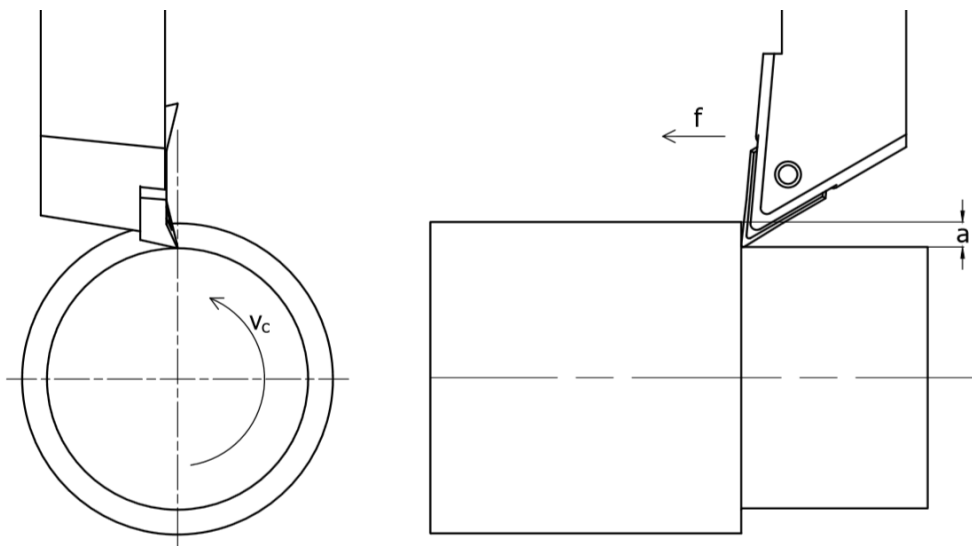
Forgácsolás során a kívánt geometria úgy alakítható ki, hogy a munkadarabról mechanikailag, egy előre definiált szerszám anyagot választ le, mely forgács formájában hagyja el a folyamatot. A szerszám homlokszögű felülete a munkadarab anyagába hatol, majd azt képlékeny deformációra bírja. A szerszámmal közvetlenül érintkező síkban a nagymértékű nyírófeszültség miatt a részecskék egymáson elcsúsznak, egy kritikus határ elérése után az anyag felszakad. Ezt a felületet forgácsolt felületnek nevezzük, és a későbbiekben bemutatott felületi érdességgel jellemezhető. A deformáció a forgácsolási zónától távolodva folyamatosan csökken. A forgácsolás nagy előnye, hogy akár egy forgácsoló géppel is viszonylag széles termékpaletta fedhető le, alacsony szerszámozási költségekkel. A megmunkálható pontosság, illetve egy forgácsolási folyamat végrehajtásához szükséges idő a technológiák és a szerszámok fejlődésével egyre kedvezőbbé, persze ezzel párhuzamosan a gyártandó alkatrészek is egyre bonyolultabbá válnak. A forgácsolási folyamatot rengeteg paraméter, anyagtulajdonság, valamint külső hatás befolyásolja, melyek miatt a forgácsolás kimeneti értékei (pl. forgácsolt felület, vagy forgácsolási idő) változhatnak. [6][7] Ezeket foglalja össze a II.1. ábrán látható Ishikawa diagram.



II.1. ábra. A forgácsolási folyamatot bemutató Ishikawa diagram

II.1.1. A forgácsolási paraméterek esztergáláskor

Ahhoz, hogy a szerszám a kívánt geometria eléréséhez az anyag többletet eltávolítsa, mozgásra van szükség. A forgácsolási paraméterek határozzák meg a gyártás gazdaságosságát, termelékenységet és nagy befolyással vannak a munkadarab minőségére is. A legtöbb forgácsolási eljárás esetén az eredő forgácsoló mozgás egy adott pont összetett helyváltoztatását jelenti, ami legalább kétféle irány (forgácsoló és előtoló mozgás vagy főmozgás és mellékmozgás) kombinációját jelenti. Mivel a továbbiakban esztergálással foglalkozom, az egyes mozgásokat, illetve paramétereket erre a forgácsolási típusra vetítem. Esztergálás során a forgó főmozgást tokmányba vagy patronba fogott munkadarab, a mellékmozgást a szerszám végzi, így kialakítva a kívánt geometriát, amely valamilyen fogástest vagy csavarvonal. A mellékmozgás irányát figyelembe véve megkülönböztethető hosszesztergálás (a mellékmozgás iránya a forgástengellyel párhuzamos), beszúró vagy leszúró esztergálás (a mellékmozgás iránya a forgástengelyre merőleges) vagy kontúresztergálás, ami a kettő kombinációjával létrehozott mellékmozgást jelent. Esztergálás során a szerszám szabályos, az esetek nagy részében egyélű (kivétel lehet pl. a recézés). A mozgások irányát, és ez által magát a folyamatot a II.2. ábrán is jelölt paraméterek jellemzik:



II.2. ábra. A forgácsolási paraméterek értelmezése

Ahol;

a – a sugárirányú fogásmélység [mm]. Jellemzi az egy, összefüggő forgácsolási lépésben leválasztott anyagvastagságot. Több fogás esetén két, közvetlenül egymás után elhelyezkedő szerszámél közötti távolságot jelent.

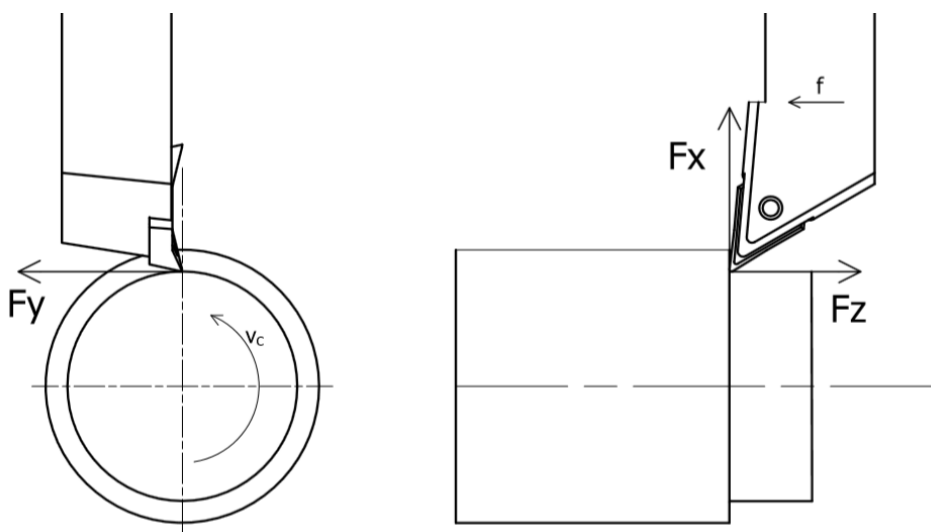
f – a fordulatonkénti előtolás [mm/fordulat]. Megmutatja, hogy a szerszám adott fordulatszám esetén a munkadarab egy körülfordulására mekkora utat tesz meg a mellékmozgás irányába.

v_c – a forgácsolási sebesség [mm/perc]. Megmutatja a szerszám élének, illetve a munkadarabnak az elmozdulási sebességét egymáshoz képest, érintő irányban. Ez a sebesség jellemzi a forgácsoló főmozgást.

n – a munkadarab (főorsó) fordulatszáma [ford./perc]. A főorsó és az azzal szorosan összekapcsolt munkadarab egy perc alatti körülfordulásainak száma. A gyakorlatban inkább a fordulatszám használatos, azonban a továbbiakban a forgácsoló vagy vágósebességet alkalmazom, hogy az eltérő átmérők (pl. fogásvétel vizsgálatok) okozta eltéréseket kiküszöböljem.[6][7][9][10][11]

II.1.2. A forgácsolóerő

A szerszám munkadarabra kifejtett erőhatása a forgácsolóerő. A termék alak, helyzet, illetve méretpontosságát elsősorban a forgácsolás közben fellépő erő határozza meg. Technológiai tervezésnél vagy egy már meglévő folyamat optimalizálásánál ezt minden irányba ismerni kell. A forgácsolóerő folyamatra gyakorolt hatásainak tudatában a forgácsolás megbízhatósága nagyban javul, de ehhez az ébredő erő nagyságát és irányát, illetve annak módosíthatóságát ismerni kell. A forgácsolóerőt esztergálás esetén általában a II.3. ábrán látható módon, három összetevőre szokás felbontani.



II.3. ábra. A fellépő forgácsoló erők és irányaik

F_y – főforgácsoló erő : A forgácsoló mozgás (főmozgás) irányába mutató erő. Az esetek döntő többségében ez az erőkomponens a legnagyobb, sokszor nagyságrendekkel nagyobb a másik kéttől.

F_z – előtolás irányú erő

F_x – fogásvétel irányú erő (passzív erő)

A forgácsolóerő számítással vagy méréssel is meghatározható. Számítás esetén az ún. fajlagos forgácsolóerőt szokás alkalmazni, amely megmutatja az egységnyi (1x1mm-es) forgács leválasztásához szükséges erőt.

A képlettel viszonylag gyors eredmény nyerhető, de számos egyéb tényezőtől (kopás, szerszámgeometria, stb.) is függhet, amit a képlet nem vesz számításba, így ez csak közelítő értéknek tekinthető.

A forgácsolóerőt általánosságban a (II.1.) képlet szerint lehet felírni, ahol;

$$F_c = k_c \cdot a \cdot f \quad (\text{II.1.})$$

F_c : az eredő forgácsoló erő [N]

k_c : a fajlagos forgácsoló erő [N/mm²]

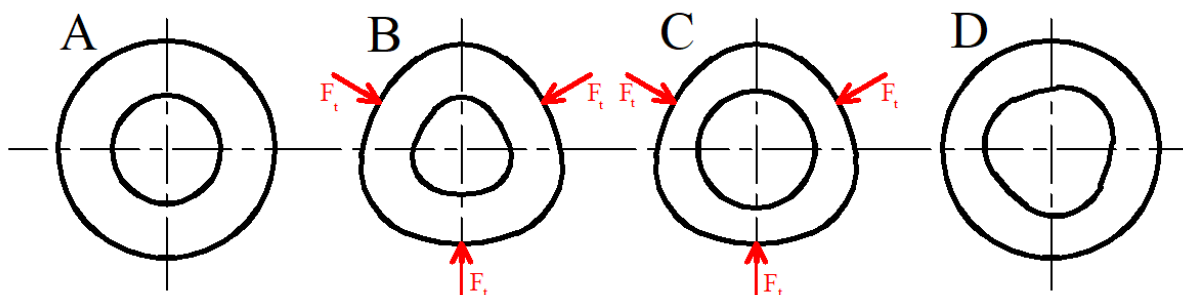
a : a fogásvétel [mm]

f : a fordulatonkénti előtolás [mm/fordulat]

A forgácsolóerő előzetes ismeretének fontosságát az alábbi két gyakorlati példa mutatja be.

A szorítóerő okozta alakhiba

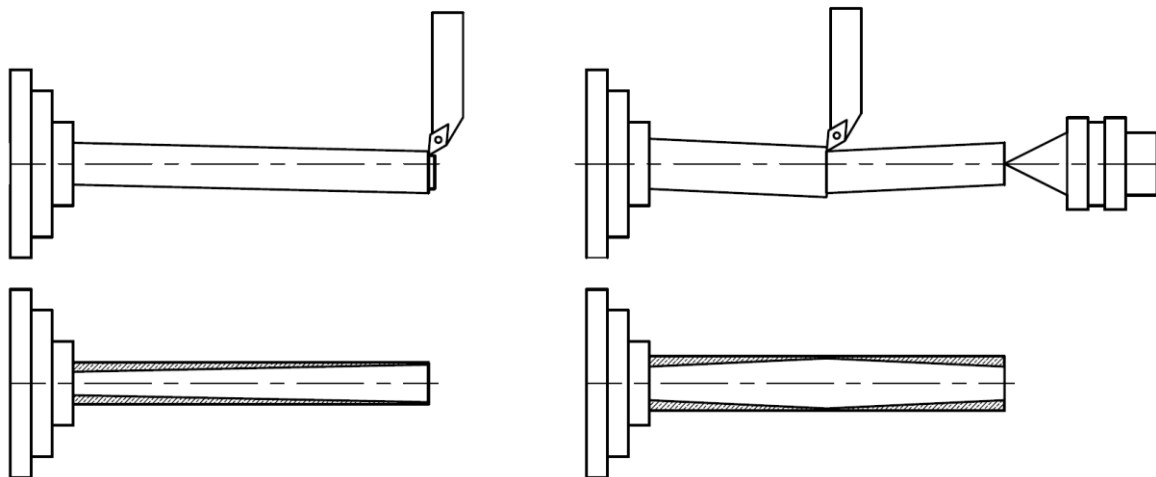
Esztergáláskor a munkadarab rögzítéséért gyakran hárompofás tokmány felel. A tokmány feladata annak biztosítása, hogy a munkadarab forgácsolás közben ne mozduljon meg. Ehhez a tokmánypofákat adott, F_t erővel kell a munkadarab felületére nyomni. Az F_t erő hatására a munkadarab deformálódik (II.4./B ábra). Az alakhelyes furat esztergálása eben a deformált munkadarabban történik (II.4./C ábra). A forgácsolási művelet után, a szorítóerő megszűnésével a darab rugalmasan visszaalakul (II.4./D ábra.), de ezzel együtt a külső erő megszűnik, és a furat deformálódik, alakhelyességége romlik. Ha a munkadarab egy vékonyfalú, perselyszerű alkatrész, ez okozhat jelentős alakhibákat. Ezt az előzetes kutatások is alátámasztották, mivel elég sok alakhelyességből adódó probléma fordult elő. Persze az alakhiba méretéke csökkenthető nagyobb felületű pofák, esetlegesen szorítópatronok alkalmazásával, de figyelembe kell venni, hogy az erőt egy kritikus érték alá csökkentve a munkadarab könnyen elforog.



II.4. ábra. A megfogás okozta deformáció

A kihajlás okozta alakhiba

A munkadarab adott kilógási hosszal rögzített a tokmányban. Az alkalmazható maximális kilógás felső határát a munkadarab kihajlása jelenti. A kihajlásban a munkadarab alapanyaga, geometriája és természetesen a forgácsolóerő játszik szerepet. A munkadarab azon részei, melyek a megfogástól vagy a támasztástól messzebb helyezkednek el, jobban ki tudnak hajolni, így a szerszám egy nagyobb átmérőt esztergál. A II.5. ábrán egy kritikus eset látható, ahol a kihajlás kúposági alakhibát okoz. A forgócsúcs alkalmazása egyes esetekben megoldás lehet, de ilyenkor is felléphet hordóssági alakhiba is. Támasztóbáb vagy forgócsúcs alkalmazásával a kihajlás csökkenthető, de alkalmazása számos esetben bonyolult, és a folyamat termelékenységét nagyban csökkenti. Szériagyártás esetén természetesen megoldás lehet az alakhiba programozással való kiküszöbölése, amikor a hordóssággal vagy kúposággal ellentétes geometriát az NC program korrigálja.



II.5. ábra. Példák kihajlás okozta alakhibára

A fenti két példa jól megmutatja, hogy a forgácsolóerő előzetes ismerete például azért is fontos, hogy az alakhibák előrejelzésével a gépállási idők a legkisebbre csökkenjenek. Ehhez elengedhetetlen, hogy már eleve megfelelő készülék(ek)et, kilógási hosszt és forgácsolási paramétereket alkalmazva elérhető legyen a nagyobb termelékenység és a magasabb minőség.[6][7][9][10][11]

II.1.3. Az esztergált felületi érdesség

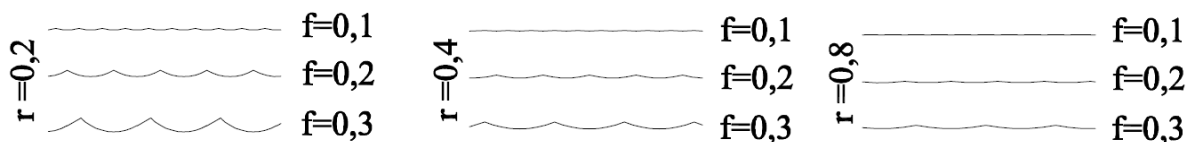
A termék gyártásakor a kívánt tűrésekkel meghatározott geometrián és az anyagon kívül definiálni kell az egyes felületek érdességét is. Tekinthető ez is egyfajta geometriának, ami a darab felületének mikroszkópikus tulajdonságait határozza meg, ezért gyakran nevezik felületi mikrogeometriának is. A felületet leggyakrabban az ún. felületi érdességi paraméterekkel, a mikro egyenetlenségek magasságával és alakjával adható meg. Modellezéséhez az alábbi egyszerűsítéseket kell tenni:

Munkadarab anyaga nem deformálható

Forgácsoló rendszer abszolút merev

A forgácsolószerszám éle meghatározott szabályos geometriai vonal

A felületi érdesség gyakorlatilag a szerszámnak az előtolás által meghatározott lenyomata a munkadarab felületén. Az esztergálás tekinthető úgy, mint egy f előtolással megegyező mentemelkedésű, a szerszám csúcsprofiljával azonos kialakítású menetesztergálás. A II. 6. ábra különböző csúcsrádiusú szerszámmal, különböző előtolásokkal esztergált felületek elméleti mikrogeometriáját mutatja be. Jól kivehető, hogy az előtolás csökkentésével, valamint a csúcsrádiusz növelésével érhető el finomabb felületi érdesség. Az előtolás, illetve a csúcsrádiusz geometriai értelmezését mutatja be a II.7.ábra.



II.6. ábra. Különböző esztergált felületek elméleti képe

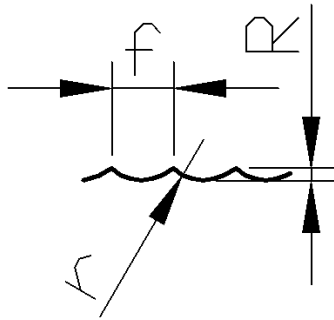
Ha a profil magasságát számszerűsítve a (II.2.) összefüggést, a Bauer-formula írható fel, ahol;

r_ε : a csúcssugár [mm]

R_m : a maximális felületi érdesség [μm]

f : a fordulatonkénti előtolás [mm/fordulat]

$$R_m \cong \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad (\text{II.2.})$$

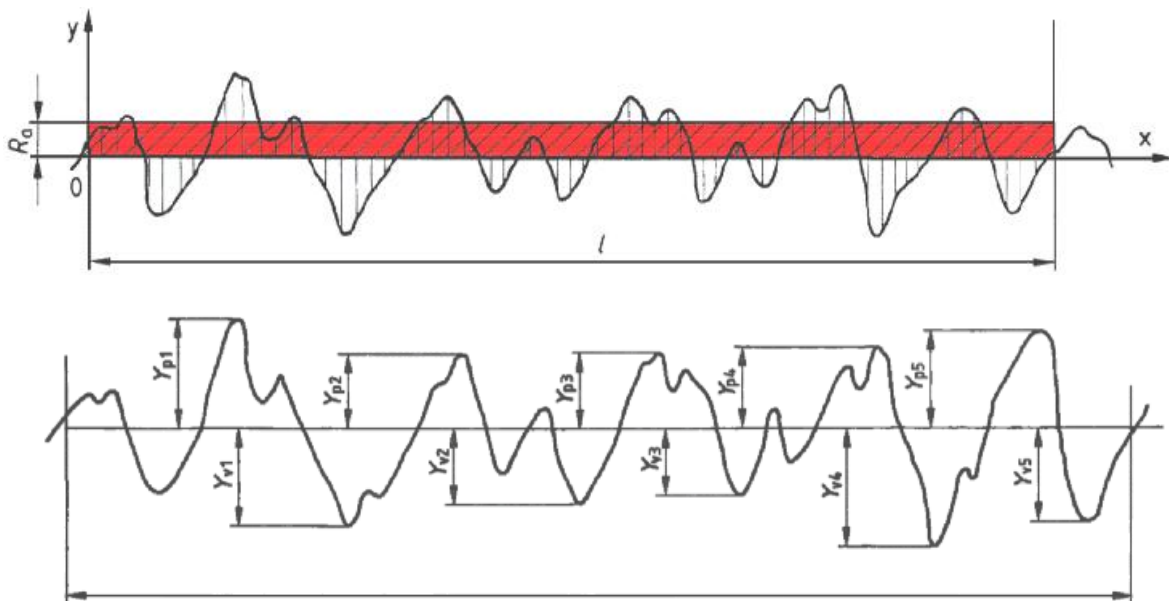


II.7. ábra. A felületi érdesség geometriai értelmezése

Érdeemes azonban megjegyezni, hogy a valóságos forgácsolási környezetben elkészült munkadarabon mért felületi érdesség az elméletitől nagyban eltér, ennek ellenére az elméleti képlet jó kiindulópont lehet a technológiai tervezéshez. Az eltérést főleg az okozza, hogy az elméleti képlethez képest a gyakorlatban több, a következő fejezetben említett tényező is közrejátsszik. A tényleges érdesség esetén a csúcsok nem éles kiemelkedések, mivel azok képlékenyen megfolynak. A szerszám felülete az elméletben ideális, de ettől a valóságban eltér. (A csúcssugár is gyakran szerepel $r_\epsilon = 0,4 \pm 0,025$ mm alakban.) A szerszám felülete is tartalmazhat egyenetlenségeket, amit a kopás csak tovább fokoz. Emellett mindenképp meg kell említeni a rezgés hatását, amely valóságos rendszereknél mindig jelen van, és nagy hatással van a felületi mikrogeometriára. [9] Mivel az elméleti és a gyakorlati érdesség között jelentős különbség lehet, ezért gyakrabban méréssel határozzák meg. Az iparban, a felületi érdesség számszerű megadásához általában az alábbi két paramétert használják:

R_a : Átlagos felületi érdesség. Az átlagos érdesség a tényleges profil és a középvonal közti y_i távolságok abszolút értékeinek számtani átlaga.

R_z : Egyenetlenség magasság. Ami a profil öt legmagasabb profilcsúcs és öt legmélyebb profilvölgy különbségének az átlagát jelenti.



II.8. ábra. Az R_a (felül) és R_z (alul) érdességi mérőszámok származtatása [17]

A két érdességi mérőszám értelmezését látható a II.8. ábrán. Palásti-Kovács és társai [37] kutatásuk során vizsgálták az összefüggést az Ra és Rz felületi érdességi paraméterek között. Az ipari gyakorlat során leggyakrabban ezzel a két megadási mód a jellemző. Ezen kívül például Rt (érdesség profil magasság) vagy Rp (profil maximum csúcsmagasság) értéket adják meg. Ugyan az érdesség paraméterek értelmezése más, megszokott egyikből a másikba átszámolni a megadott érdesség értéket. A legismertebb összefüggés az $Rz = 4 \times Ra$, vagy az $Rz = 4,5 \times Ra$ egyszerű szorzással való átszámolás. A fenn említett kutatásból azonban kiderült, hogy fémek forgácsolásakor a forgácsolási technológiától (zsebmarás, lapmarás, szuperfiniselés, szikraforgácsolás stb.) is nagymértékben függ az Ra és Rz közötti arányszám, ez esetben 5,36 és 9,2 közötti értékeket állapítottak meg.

II.2. A forgácsolási paraméterek hatása a felületi érdességre és a forgácsolóerőre

Ahogy a (II.1) képletben látható, a forgácsolóerőt alapvetően egy k_c anyagjellemző, valamint az előtolás és fogásvétel szorzata határozza meg. Ezen kívül természetesen számos más jellemzőt is figyelembe kell venni. A **munkadarab anyaga** a k_c fajlagos forgácsolóerővel számítható, ezt a fajlagos értéket a legpontosabban mérésrel határozható meg. Kapcsolatban van ugyan az anyag szakítószilárdságával illetve keménységével, de ezek között egyértelmű összefüggés nem írható fel. A **fogásvétel** (forgácscsúcsélesség) és **előtolás** (forgácsvastagság) hatása az esetek nagy részében egyértelmű, ezek növelésével általában lineárisan nő a forgácsolóerő is. A szerszámgeometria szempontjából a **homlokszög** pozitív irányba módosítva a forgácsolóerő csökkenthető, ez a gyakorlatban előforduló értékekre ($-20^\circ < \gamma < 30^\circ$) jól alkalmazható megállapítás. A **szerszám élelhelyezési szögének** a forgácsolóerőre gyakorolt hatása nem jelentős, egyes tartományokban az F_x passzív erő értékét módosítja. A **szerszám anyagoknál** bizonyos esetekben kijelenthető, hogy a keményebb anyagra való áttéréssel a forgácsolóerő csökken, ezt azonban nehéz azonos környezetben vizsgálni a különböző anyagok eltérő forgácsolási sebesség igénye miatt. Viszonyításként a gyorsacélról vidiára áttérés 10-15% csökkenést, a vidiáról kerámiára áttérés hasonló eredményt hozhat. A **forgácsolási sebesség** hatását nagyon nehéz általánosságban leírni. A forgácsolóerőre közvetetten, inkább a forgácsképződésre és az forgácsolás közben képződő hőre van nagyobb hatással. A választott forgácsolási sebességet meghatározza a szerszám, valamint a munkadarab anyaga is. Túl kicsi sebesség esetén a nehézkes forgácsolás miatt nagy értéket vesz fel, túl nagy sebesség esetén pedig a képződő vibráció okozza az erő növekedését, ingadozását. A **hűtő-kenőfolyadékot** leginkább a gyorsacél szerszámoknál alkalmazzuk, és elmondható, hogy a forgácsolóerő akár 10-15 %-ot is csökkenhet. A szerszámkopásnak a forgácsolóerőre rendkívül nagy hatása van. A **kopás** fokozódásával határozottan növekszik.

Az elméleti felületi érdesség megállapításához a (II.2.) képletben érintett jellemzők használhatók fel, azonban a valós felületi érdesség hatásához még sok tényezőt kell számításba venni. A képződő forgács típusát, és elvezetésének hatását, a szerszám geometriáját, a munkadarab és szerszám anyagát, valamint ezek kölcsönhatását a forgácsolási zónában, hűtő-kenőfolyadék hatása, stb.

A rezgés hatását sem szabad elhanyagolni, szélsőséges esetekben, az egész forgácsolási rendszer lengeni kezdhet, rendkívül durva felületet eredményezve. A számszerűsíthető adatok közül a képletben foglaltakon kívül a **forgácsolási sebességet** szokás megemlíteni, egyes esetekben ennek határozott növelésével finomabb felületi érdesség érhető el. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az **anyag keménységével** együtt a felület finomsága is növekszik. A **hűtő-kenőfolyadék** hatása egyértelműen pozitív, használatával az esetek döntő többségében finomabb felület érhető el. [6][7][9]

Huang et al. [18] nikkel ötvözetekkel végzett kísérletei során Inconel 718 anyagot esztergáltak bevonat nélküli és PVD bevonatos vídia szerszámokkal, különböző paraméterekkel. Forgácsolási paraméterek szempontjából elmondható, hogy a forgácsolóerő kisebb forgácsolási sebességek esetén nagyobb. A forgácsolási zóna hőmérséklete a kisebb súrlódás miatt alacsonyabb, ezért az anyag deformálásában a mechanikai munkának nagyobb a szerepe. A forgácsolóerőt leginkább befolyásoló másik paraméter a fogásvétel, melynek növelésével természetesen nő a forgácsolóerő. Rao és társai [26] alumínium-pernye kompozitokat forgácsolt különböző paraméterekkel, valamint különböző pernye tartalommal. A választott forgácsolási paraméterek esetén változó forgácsolási sebesség ($300 \text{ m/perc} < v_c < 600 \text{ m/perc}$), változó előtolás ($0,06 \text{ mm/ford.} < f < 0,24 \text{ mm/ford.}$) és állandó fogásvétel ($a = 1,2 \text{ mm}$) voltak a vizsgálati határok. A pernyetartalom 0% és 15% között változott. A mérések során a felületi érdességet Ra skálán mérték. A forgácsoló szerszámok anyaga K10 vídia, forrasztott lapkás kivitelű, valamint PCD váltólapka volt. A forgácsolási paraméterek okozta változásokat megfigyelve elmondható, hogy az előtolás növelése nagyban növelte a forgácsolt felület érdességét, a forgácsoló sebesség növelése pedig kismértékben ugyan, de finomabb felületet eredményezett. Mahamani [27] alumínium $\text{TiB}_2/\text{ZrB}_2$ fém kompozit esztergálásakor mindhárom forgácsolási paramétert változtatva optimalizálta a forgácsolóerőt és a felületi érdességet. Mindkét kimeneti paraméter esetén a minimális érték volt a cél. A forgácsolási sebesség (100 és 150 m/perc között változott) növelésével a felületi érdesség kismértékben, a forgácsolóerő határozottan csökkent. A két hatás annak köszönhető, hogy magasabb forgácsolási sebességen az élrátét képződés kevésbé jelentkezik, valamint a képződő forgács alakja is kedvezőbb. A fogásvételt növelve (0,5mm-ről 1,0 mm-re, majd 1,5 mm-re) a forgácsolóerő kismértékű csökkenése volt megfigyelhető, a hosszabb dolgozó szerszámél miatt. A felületi érdességre nincs különösebb hatása. A három paraméter közül az előtolás növelése okozta a legnagyobb változást mindkét kimeneti értékre. Az előtolás növelésére a felületi érdesség érzékenyen reagált, nagyban növekedett, de növekedés tapasztalható a forgácsolóerő esetében is. Az erő növekedése annak köszönhető, hogy a nagyobb előtolás növeli a forgácskeresztmetszetet, az érdesség a durvább felületi mikrogeometria mellett a szál-mátrix elválás miatt is romlott. A legkisebb energiaszükséglethez, (legkisebb forgácsolóerő) és a legfinomabb felületi érdességhez tartozó optimum pontot keresték Rao és társai [32].

AISI 1050 acélt esztergáltak kerámia ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) szerszámmal, különböző forgácsolási paraméterekkel, hűtő-kenőfolyadék nélkül. A mérési eredmények kiértékelése után világossá vált, hogy az előtolásnak (0,05 - 0,15 mm/ford.) a forgácsolóerőre, és a felületi érdességre egyaránt nagy hatása van. A vágósebesség növelése (50 m/perctől 95 m/percre) nem okozott nagy változást egyik kimeneti értékben sem. A fogásvétel növelése (0,25 mm-ről 0,75 mm-re) a felületi érdességet nem befolyásolta a forgácsolóerőt viszont nagyban növelte. A további adatelemzésben a három paraméter kölcsönhatásait vizsgálták. A felületi érdességnél nincs különösebb korreláció, de a forgácsolóerőt az előtolás és fogásvétel, valamint a három paraméter együttes interakciója is nagyban meghatározza. Agrawal et al [33] nagy keménységű (69 HRC) AISI 4340 acél próbatetek esztergálásakor vizsgálta a felületi érdesség alakulását.

Harminckilenc féle előtolás (0,08 - 0,15 mm/ford.) a fogásvétel (0,1-0,935mm), valamint a fordulatszám (858 – 2681 ford./perc) kombináció felhasználásával, a kapott eredményekből leszűrhető összefüggéseket többféle matematikai modellel vizsgálták. A különböző modellekkel alkotott értékekben ugyan volt eltérés, de a három paraméter közül az előtolás egyértelműen a legnagyobb hatású tényező. A forgácsolóerőt és felületi érdességet befolyásoló számos paraméter hatását elemezték Auoici és társai [34]. AISI H11 szerszámacélból gyártottak különböző keménységű (40-45-50 HRC) próbateteket, majd változó forgácsolási sebesség (120- tól 240 m/perc), fogásvétel (0,15 - 0,45 mm) és előtolás (0,08- tól 0,16 mm/fordulat) értékek mellett a felületi érdesség, valamint a forgácsolóerő három komponensének alakulását vizsgálták. A felületi érdességet egyértelműen az előtolás befolyásolta legjobban. Kisebb és nem is egyértelmű hatása volt a munkadarab keménységének is. Egyes esetekben a keményebb darabnál volt finomabb a felületi érdesség, más esetekben a lágyabbnál. Az eredményekből világosan látszik, hogy adott keménységhez meg kell találni a megfelelő forgácsolási paramétereket. A forgácsolóerő mindhárom komponensét nagyban meghatározta a fogásvétel. A passzív, valamint főforgácsoló erőre emellett a munkadarab keménységének és az előtolásnak is nagy hatása volt. Horváth és Drégelyi-Kiss cikkükben [35] kétféle alumíniumot (AS12 eutektikus és AS17 hiper-eutektikus ötvözet) esztergáltak többféle bevonatú és geometriai kialakítású lapkával. Mindezek mellett a forgácsolási paramétereket is változtatták, és mérték a felületi érdesség értékét Ra és Rz skálán is. A forgácsolási paraméterek tekintetében cél a minimális felületi érdesség és maximális anyagleválasztási kihatáshoz tartozó optimum pont megtalálása volt. A vágósebesség, valamint az előtolás volt legnagyobb hatással a felületi érdességre. Mindkét lapka esetében viszonylag alacsony, (200 m/perc) vágósebesség bizonyult a legjobbnak. A fogásvétel hatása elhanyagolható, ez inkább a másik vizsgált paramétert, az anyagleválasztást befolyásolta. Alumínium, réz és nikkal esztergált alkatrészek felületi mikrogeometriájának alakulását vizsgálta Chen és Zhao [28]. A forgácsolási paramétereknek a szerszámcsőcs rezgésre, és ez által a végleges felületi érdességre gyakorolt hatása alapján alkottak modellt a folyamat leírására. Forgácsolási paraméterek közül a forgácsolási sebességnek van a legnagyobb hatása a vibrációra, a sebesség emelésével ez a vibráció csökken, ami simább felületet eredményezett. Gupta és Kumar [36] sokféle tényező változtatásával forgácsolt unidirekcionális üvegszállal erősített epoxy próbateteket, majd ezeken mérte a felületi érdesség értékét. Forgácsolási paraméterek, szerszámanyag és geometria, valamint hűtőfolyadék használatát is elemezte a felületi érdesség függvényében.

Forgácsolási paraméterek szempontjából az előtolás emelésével (0,05 mm/fordulatról 0,2 mm/fordulatra növelve 48%-al) a felületi érdesség értéke is nő, ami több hatás együttes eredménye. Egyrészt az gyorsabb előtolást alkalmazva a keletkező hő mennyisége is nő, kedvezőtlenebb körülményeket előállítva a forgácsolási zónában. Ez kedvezőtlen az alapanyagának, másrészt a szerszámnak is, mivel ebben az esetben a kopás mértéke is fokozottabb. Magasabb előtolás értékeknél a vágási folyamat nem megy végbe, az erősítőanyagot a szerszám a túl gyors mozgás miatt inkább eltépi, ami nagyon durva felületet eredményez. A fogásvétel emelésénél szintén számolnunk kell a hőhatás okozta felületi durvulással (0,2 mm-ről 1,4 mm-re emelve 13,5%-al durvább felület), de ez kisebb mértékű, mint az előtolás növelésénél. A vágósebesség esetén összetettebb a kapcsolat. Alacsony vágósebességnél az élrátét képződés és a nem tökéletesen elvágott erősítőszálak okoznak durvább felületet. Magasabb vágósebességeknél pedig a fenn már említett hőhatás okozta durvulás jön elő. (55 m/perc-ről 160 m/perc-re növelve 18%-al durvább felület). A manapság egyre jobban elterjedt PEEK mátrixú kompozit esztergálásánál fellépő forgácsolóerőre alkottak Fuzzy-alapú modellt Hanafi és társai [38]. A felhasznált kompozit PEEK CF30 (szénszál-erősítésű) kompozit volt. Különböző előtolás (0,05-0,15 és 0,2 mm/ford.), forgácsoló sebesség (100-200-300 m/perc) és fogásvétel (0,25 0,75 és 1,5 mm) esetén kapott mérési eredményeket érdemes a modellalkotáson kívül is elemezni. Az adatok alapján elmondható, hogy a forgácsolóerő növekedésére legnagyobb hatással a fogásvétel növelése (átlagosan 92%) volt. Ezt követi az előtolás; nagyobb előtolást alkalmazva átlagosan 62%-al nagyobb erőt tapasztalhatunk. A forgácsoló sebességnél fordított hatás figyelhető meg. Magasabb sebesség esetén az erő értéke csökken, átlagosan 25%-al. Fetacau és Stan [40] PTFE kompozitok esztergálásakor vizsgálták a forgácsolási paraméterek és a szerszámgeometria hatását a forgácsolóerőre és a felületi érdességre. Az előtolás növelésével (0,053 mm/ford., 0,167mm/ford. és 0,25 mm/ford.) mind a forgácsolóerő, mind a felületi érdesség értéke határozottan emelkedik. A fogásvétel növelésével (0,5 mm, 1,5 mm, 2 mm) a forgácsolóerő is nagyobb lesz, a felületi érdességre nincs számottevő hatása. A vágósebesség értékének változása (51,02 m/perc, 128,58 m/perc 163,28 m/perc) egyik vizsgált jellemzőt sem befolyásolja számottevően, magasabb vágósebességeknél finomabb felületet kapunk, de a hatás nem jelentős. A kétféle vizsgált kompozitnál (PTFE GR15 és PTFE CG32-3) kapott értékek között jelentős eltérés nem tapasztalható. Suresh és Basavarajappa [47] AISI H13 acél esztergálásakor vizsgálták a forgácsolási paraméterek hatását a szerszámkopásra, illetve a felületi érdességre. Az előtolás hatása érvényesül a legjobban (48%), 0,04 mm/fordulatról 0,24 mm/fordulatra emelve az érdesség több mint a duplájára emelkedik. Ezt követi a forgácsoló sebesség. Itt ketté kell választani a folyamatot. Alacsony sebességeknél (42-80 m/perc) az élrátét képződés miatt rendkívül durva felület adódik, ezt túllépve viszont a sebesség folyamatos növelésével (80-238 m/perc) a felületi érdesség kisebb értékeket vesz fel, de ez a változás már kisebb meredekségű. Nagyobb fogásvétellel kissé nő az érdesség értéke. Selvaraj és társai [50] állandó fogásvétel (0,5 mm) mellett változó forgácsolási sebességgel (80, 100, 120 m/perc) és változó előtolással (0,04 mm/ford., 0,08 mm/ford., 0,12 mm/ford.) vizsgálták a forgácsolóerő, a felületi érdesség és a szerszámkopás hatását nitrogén ötvözésű duplex rozsdamentes acél esztergálásakor. Az előtolás növelésével mind a forgácsolóerő, mind a felületi érdesség nagyban növekedett, a szerszám és munkadarab között egyre fokozódó súrlódásnak köszönhetően.

A súrlódás hatására a duplex acél könnyen a szerszámra tapad, ami rossz felületet eredményez. A vágósebesség emelésének az érdességre alig, az erőre enyhe csökkentő hatása volt. Magasabb forgácsoló sebességnél a forgácsolási zónában termelődő hő lágyítja az anyagot, ami könnyebb forgácsleválasztást eredményez.

A forgácsolási paraméterekkel kapcsolatos irodalomkutatást foglalja össze a II.1. táblázat, amelyben a forrás sorszámát „H”-val jelöltem (kiküszöbölve a forgácsolóerővel való összetévesztés lehetőségét). A gyorsabb előtolásnak szinte minden vizsgált esetben nagy hatása volt a felületi érdességre, valamint a forgácsolóerőre is. Növelésével nagyban nőtt mindkét jellemző. A fogásvétel emelésével a felületi érdesség nem változott számottevően a forgácsolóerő viszont általában nagyobb értékű lett. A forgácsolási sebesség hatása a legkisebb mindkét paraméterre, egyes esetekben a forgácsolóerő vagy a felületi érdesség értéke kismértékben csökkent.

H	Anyag	Szerszám	Vizsgált paraméter	Előtolás növelése	Fogásvétel növelése	Forgácsolási sebesség növelése
18	Nikkel ötvözet Inconel 718	PVD bevonatos és bevonat nélküli vídiá	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Csökken	Csökken
			Felületi érdesség	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
26	Al 6061 + pernye fémkompozit	Polikristályos gyémánt	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Nem vizsgálták	Kismértékben csökken
27	Al TiB2/ZrB2 fémkompozit	Bevonat nélküli vídiá	Forgácsolóerő	Növekszik	Kismértékben nő	Csökken
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Mérsékelt hatás	Nincs jelentős hatása
32	AISI 1050	Al ₂ O ₃ +TiC kerámia	Forgácsolóerő	Nagymértékben nő	Nagymértékben nő	Nincs jelentős hatása
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Nem változik	Nincs jelentős hatása
33	AISI 4340	Köbös bórnitrit	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Nincs jelentős hatása	Nincs jelentős hatása
34	AISI H11	57% CBN + 35% TiCN	Forgácsolóerő	Növekszik	Növekszik	Nincs jelentős hatása
			Felületi érdesség	Növekszik	Nem változik	Nincs jelentős hatása
35	AS12, AS17	PCD, CVD, MDC anyag, ISO és Wiper kialakítású	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Növekszik	Nincs jelentős hatása	Nem egyértelmű, optimum van
28	Al, Cu, Ni	Gyémántbetétes	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Növekszik	Nincs jelentős hatása	Csökken
36	Üvegszálal epoxy	Polikristályos gyémánt	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Kismértékben nő	Kismértékben nő
38	Szénszál-PEEK kompozit	Tin bevonatos vídiá	Forgácsolóerő	Nagymértékben nő	Nagymértékben nő	Csökken
			Felületi érdesség	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
40	Szén-grafit és PTFE kopmpozit	Polikristályos gyémánt	Forgácsolóerő	Növekszik	Nagymértékben nő	Nincs jelentős hatása
			Felületi érdesség	Növekszik	Nincs jelentős hatása	Kismértékben csökken
47	AISI H13 acél	TiCN bevonatos kerámia	Forgácsolóerő	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták	Nem vizsgálták
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Csökken	Nincs jelentős hatása
50	Nitrogén ötvözésű duplex acél	TiC, és TiCN bevonatos Vidia	Forgácsolóerő	Nagymértékben nő	Nem vizsgálták	Csökken
			Felületi érdesség	Nagymértékben nő	Nem vizsgálták	Nincs jelentős hatása

II.1. táblázat. Az irodalomkutatás összefoglalása

II.3. A forgácsoló szerszámok jellemzői

Az esztergálás során használt szerszámok általában a II.9. ábrán jelölt geometriai paraméterekkel jellemezhetők, ahol:

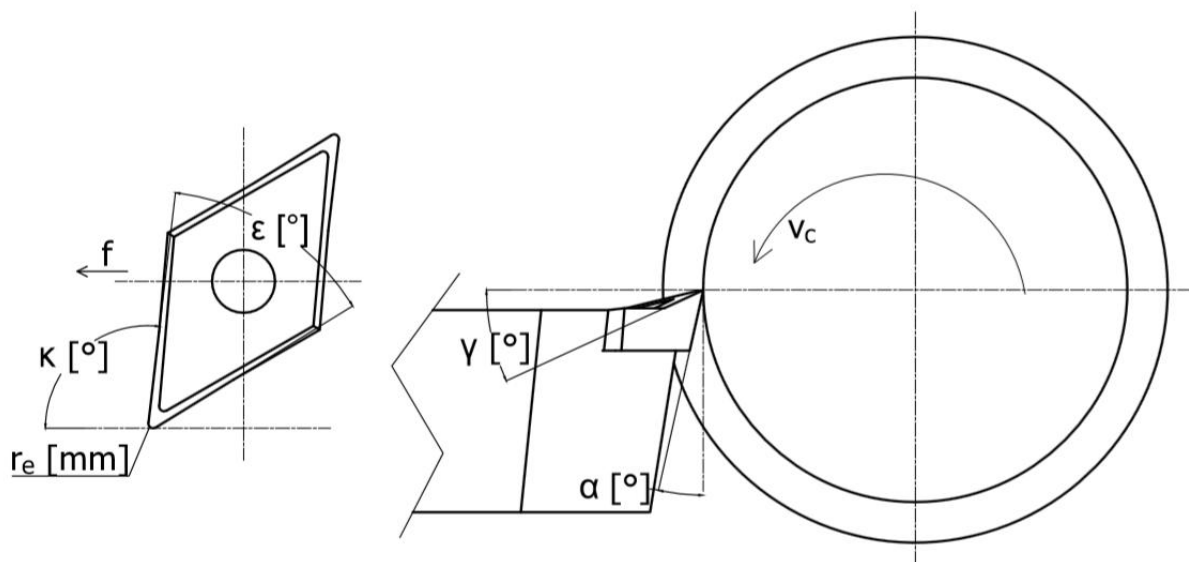
ε [°]: Csúcsszög. Lapkás szerszámok esetében meghatározott értékű lehet, pl. D-jelű lapkáknál 55° . A nagyobb csúcsszögű lapkák nagyobb élstabilitást biztosítanak, ami nagyoláznál, vagy kemény anyagok forgácsolásánál lehet hasznos. A kisebb élszögű lapkákat általában profilesztergáláskor alkalmazzák.

γ [°]: Homlokszög. Az ábrán is látható irányban nevezzük pozitívnak. Feladata például a forgács elterelése, illetve a forgácsolás.

α [°]: Hátszög. A homlokszöggel együtt képezi a forgácsoló éket. Külső esztergálásánál a szerepe nem jelentős, de a furatesztergálásnál, vagy fúrásnál nagyban meghatározza forgácsolóerő nagyságát és a forgácselvezetés hatásfokát.

κ [°]: Főél-elhelyezési szög, nevezik még belépési szögnek, vagy egyszerűen élelhelyezési szögnek is.

r_e [mm]: Csúcsrádiusz. Esztergálás során, ahogy azt feljebb már leírtam a munkadarab felülete az előtolás és a szerszám csúcsának lenyomata. A szerszám csúcsát annak lekerekítési rádiusza határozza meg legjobban, így a forgácsolt felületi érdességre nagy hatással van.



II.9. ábra. Jellemző szerszámgeometriai paraméterek

Keményebb szerszámanyaggal, illetve a homlokszög növelésével a forgácsolóerő csökkenthető. A szerszám csúcsrádiuszának növelésével pedig jelentősen finomítható a forgácsolt felület. Ez jelenti a kiindulási állapot, azonban az irodalomkutatásban több gyakorlati példa is fellelhető. Huang et al. [18] a szerszám csúcsrádiusz és a forgácsolási paraméterek Nikkel ötvözetre (Inconel 718) gyakorolt hatását vizsgálták. A próbatesteket CNC esztergában munkálták meg, különböző szerszámokkal, és különböző forgácsolási paraméterekkel. A folyamat közben a forgácsolóerőt Kistler piezoelektromos erőmérővel folyamatosan követték, emellett a maradó feszültséget vizsgálták röntgensugárzásos berendezés segítségével. A kísérletek végeredményeit saját szemszögből figyelve jól látszik, hogy nagyobb csúcsrádiusz alkalmazása esetén azonos körülmények között jelentősen nőtt a forgácsolóerő. Megfigyelhető még, hogy PVD bevonatos lapkák esetén a forgácsolóerő nagyobb, mint bevonat nélküli lapkákon. Chou és Song [19] cikkében a csúcsrádiusz forgácsolóerőt és felületi érdességet befolyásoló jellegét elemezték. AISI 52100 acélötvözetet esztergáltak különböző csúcsrádiuszú (0,8mm, 1,6mm és 2,4mm) eszterga szerszámokkal. A nagyobb csúcsrádiusz azonos forgácsolási körülmények között sokkal finomabb felületet eredményezett, de az előnyei ebben ki is merültek. A forgácsolóerő és a forgácsoláshoz szükséges energia is emelkedik nagyobb csúcsrádiuszú szerszám alkalmazásával. Ez a hatás nagyobb előtolás és forgácsolási sebesség esetén még jelentősebb mértékű. Hasonló eredményre jutott Huang és Lee is [20]. Beszűrő esztergálásnál vizsgálták, hogy mi történik, ha a szerszám csúcsrádiuszát növelik. 15 mm-es Al6061 alumínium ötvözetből készült rudakat esztergáltak állandó forgácsolási paraméterekkel. Nagyobb csúcsrádiusszal a forgácsolóerő értéke is magasabb lett. A forgácsolóerő mellett a vibráció fokozódott, illetve a szerszám távozása utáni plasztikus visszaalakulás (forgácsolóerő megszűnése miatt) is mérhetően nagyobb volt. Özel és társai [21] különböző forgácsolási paraméterekkel, különböző élgeometriájú szerszámmal, valamint különböző keménységű AISI H12 acél munkadarabokkal folytatott forgácsolás esetén mérték a forgácsolóerőt, valamint a felületi érdesség értékét. Az erőt háromirányú piezoelektromos erőmérő cella segítségével mindhárom irányba mérték. Élgeometria alatt a forgácsoló él kialakítására kell gondolni. Négyféle szerszámot próbáltak ki, az éles, a rádiuszos, a letörésses, valamint a letörésses és rádiuszos kialakításút. A legérzékenyebb faktor a munkadarab keménysége, de az élgeometriának is nagy hatása volt mindhárom komponensre. A rádiuszos szerszámcsúccsal mérhető a legkisebb forgácsolóerő. Hozzá kell tenni, hogy azonos körülmények között a legfinomabb felületi érdesség is a rádiuszos kialakítás esetén mérhető. Az előtolás mind a forgácsolóerőt, mind a felületi érdességet nagyban befolyásolta, míg a vágósebesség inkább az erőre volt hatással. Az előtolás növelésével a forgácsolt felület durvult (0,1 mm/perc felett nagyobb meredekséggel) és a forgácsolóerő is nőtt. A vágósebesség növelésével a forgácsolóerő csökkent, míg a felületi érdességben nem mutatkozott nagy változás. A felsorolt vizsgálatok mindegyikénél elmondható, hogy a főforgácsoló erő változott leginkább. Cui és társai [22] állandó forgácsolási paraméterek (forgácsolási sebesség, előtolás, fordulat) mellett vizsgálták különböző geometriájú kerámia szerszámokra ható igénybevételeket edzett (44-48 HRC) AISI 1045 acél esztergálásakor. A vizsgálatok során a piezoelektromos erőmérőre mereven rögzített a szerszám, majd az erőmérő az esztergagép szerszámtartójára rögzített.

A szerszám előtt forgó hengeres készülékbe négy munkadarabot fogtak be, így modellezve a megszakított forgácsolást. A szerszámgeometriának több paraméterét is változtatták. A csúcsrádiusnál 0,2 mm, 0,4 mm és 0,6 mm, a homlokszög esetén -6° , -8° és -10° a főélelhelyezési szögnél 30° , 45° és 60° voltak a választott szintek. A különböző geometriájú lapkák összehasonlítása alapján a forgácsolóerőre legnagyobb hatással a csúcsrádiusz volt (kb. 60%). Ezt követi a főél-elhelyezési szög (kb. 30%), majd a homlokszög (kb. 10%). Tárcsamaróval végeztek forgácsolási energiával kapcsolatos méréseket Wang és társai [23]. Az erőmérése mereven rögzített darabot a hosszirány mentén marták, különböző forgácsolási paraméterekkel és különböző homlokszögű szerszámokkal. Mivel nem esztergálás a forgácsolási mód, ezért a paraméterekkel a továbbiakban nem foglalkozunk. Azt azonban meg kell említeni, hogy a homlokszög és a forgácsolóerő között egyértelmű összefüggés van, a homlokszög csökkentésével a forgácsolóerő folyamatosan növekszik. Áttérve a negatív homlokszög tartományba ugrásszerűen nő. Hasonló eredményre jutottak Baizeau és társai [24] edzett csapágyacél fogácsolásakor. A főforgácsoló erőt és a passzív erőt vizsgálták többféle kialakítású lapkával. A rádiuszos végű lapkánál a homlokszögek 0° és -7° voltak, a letöréses végű lapkánál pedig -20° és -27° homlokszöveget alkalmaztak. Az eredmények alapján egyértelmű, hogy a rádiuszos lapkával sokkal kisebb erővel lehet forgácsolni, mint a letöréses kialakítással. A homlokszögeket illetően pedig hasonlóan az előző kutatásban tapasztaltakhoz a homlokszög csökkentésével a forgácsolóerő egyértelműen növekszik. Horváth és Drégelyi-Kiss kutatása a forgácsolási paraméterek esetén már szóba került. [35] Kétféle alumíniumot esztergáltak többféle bevonatú és geometriai kialakítású lapkával, különböző forgácsolási paraméterekkel. A lapkageometriák közül az ISO szabályos rádiuszos kialakításút, valamint az ún. Wiper speciális kialakítású lapkát alkalmazták, ami leegyszerűsítve három egyenesből és az őket összekötő rádiuszokból álló szerszámélt jelent. Jól kimutatható a lapkák közötti különbség azonos forgácsolás paraméterek és körülmények között. A Wiper kialakítású lapkával finomabb felület érhető el, mivel a szerszám által forgácsolt geometria eltér a szabályos rádiusztól. A szerszám anyagát tekintve nagymértékű eltérések nem figyelhetők meg, az ISO élgeometria alkalmazása esetén a polikristályos gyémánt, Wiper lapka esetén a CVD lapka bizonyult a legjobbnak. A forgácsolási paraméterek vizsgálatánál már találkozhattunk Gupta és Kumar [36] kísérlet sorozatával, a sokféle tényező változtatásával forgácsolt unidirekcionális üvegszállal erősített epoxy próbatestek felületi érdességének elemzésével. A hűtő-kenőfolyadék alkalmazásával a forgácsolási környezetet hűtjük, akkor a felületi érdesség nő, emiatt a legjobb megoldásnak a száraz forgácsolást találták. A szerszám geometriai paraméterei közül legnagyobb hatása a csúcsrádiusznak volt. A csúcsrádiusz növelésével egyértelműen csökkent a felületi érdesség azonos forgácsolási körülmények között. Ennek főleg geometriai háttere van, ugyanis ha a csúcsrádiusz felénél nagyobb előtolást alkalmazunk a felületünk nagy sodrásosságú csavarvonallá alakul. Pozitív homlokszöggel élesebb szerszámot alakíthatunk ki, amivel könnyebb az anyagrészek leválasztása így a forgácsolóerőt csökkenthetjük. A kísérletek során -6° , 0° , és $+6^\circ$ -os lapkákat próbáltak ki. A legfinomabb felületet a 0° -os lapkával érték el, de a felület nem sokkal durvább a pozitív homlokszög esetében sem, így mindenképp ebben a tartományban érdemes gondolkodni. Negatív homlokszög esetén a felületi érdesség csak 3%-al nőtt, de az élrátét képződés, valamint a szerszámterhelés kedvezőtlenebb.

Fetacau és Stan [40] PTFE kompozitokkal (PTFE+szén, valamint PTFE+szén+grafit) végzett kísérleteiben a forgácsolási paraméterek mellett a szerszámgeometria hatását is vizsgálta. A szerszám anyaga, homlokszöge, élelhelyezési szöge ugyan állandó, de a csúcsrádiusz értékét változtatták (0,4mm, 0,8mm, 1,2mm). Az eredmények kiértékelése alapján elmondható, hogy a csúcsrádiusznak a forgácsolóerőre gyakorolt hatása minimális, a felületi érdességet azonban nagyban befolyásolja. A csúcsrádiusz növelésével azonos körülmények között kedvezőbb (simább) felületi érdesség érhető el. Ratnam és Shahabi [41] a szerszámcsúcs kopását és ez által a szerszámcsúcs megváltozott geometriája okozta változásokat vizsgálta AISI 304 acél esztergálásakor. A lapka eredeti rádiusza 0,4 mm (+/- 0,025 mm), G tűrésű Sandvik lapka. A kutatás alapján a forgácsolt profil optikai mérésével következtetni lehet a szerszám kopására, tehát a szerszám profilja és a felületi érdesség között erős korreláció figyelhető meg.

Röviden összefoglalva tehát a szerszámkialakítással kapcsolatos eredményeket egyértelmű, hogy a csúcsrádiusz változásával érhető el a legnagyobb változás. A csúcsrádiusz növelésével a forgácsolt felület jelentősen finomabb lesz, a forgácsolóerő azonban ezzel együtt növekszik. A másik jelentősebb paraméter a homlokszög, pozitív homlokszög alkalmazásával jelentősen csökkenthető a forgácsolóerő.

II.4. A forgácsoló szerszámok kopása

II.4.1. A kopás megjelenési formái

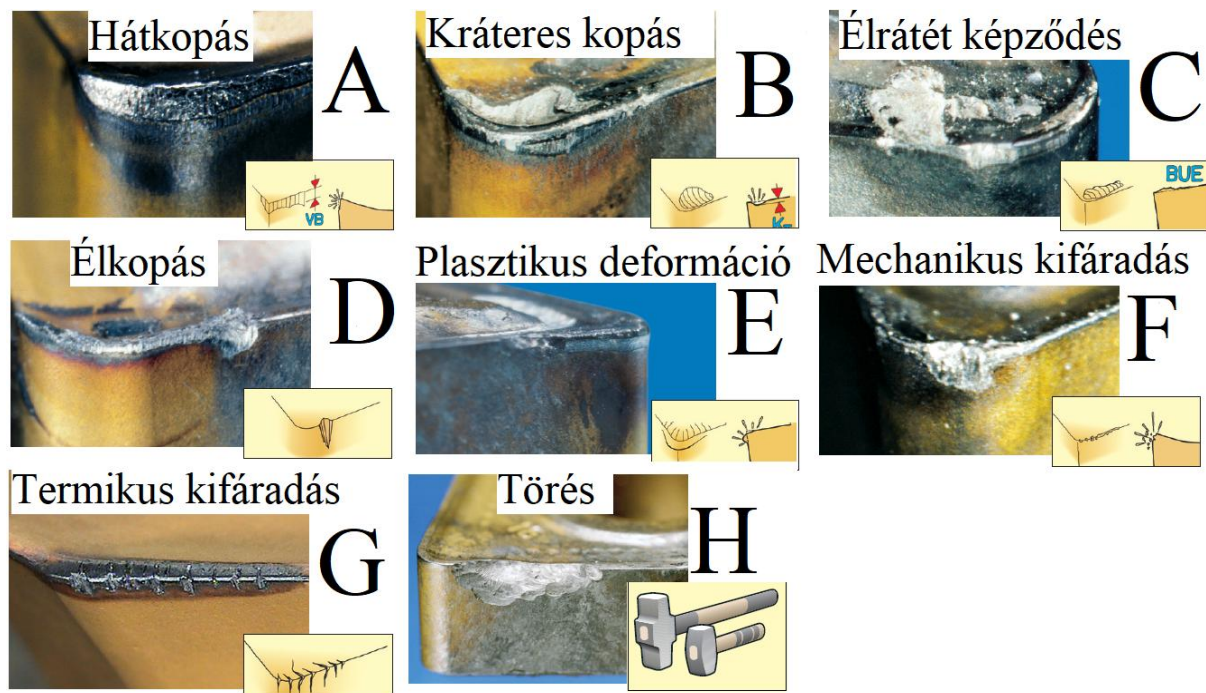
Forgácsolás során a leválasztási zónában bonyolult jelenségek zajlanak, amelyek közül az egyik legösszetettebb a kopás folyamata. A szerszám és a munkadarab felületét nagy erővel nyomjuk egymáshoz, amit ezen kívül nagy relatív sebesség is jellemez. A súrlódás hatására keletkező hő szintén befolyásolja a kopás jelenségét. Vas-alapú fémötvözetek esetén a C atomok diffúzióját jelentő kémiai reakció még tovább bonyolítja a folyamatot. A kopást, azaz a kopottnak nevezett szerszámot nem lehet egyértelműen definiálni, azt a forgácsolt anyag, a forgácsolási művelet célja (nagyolás-simítás), a forgácsolt felület, stb. is meghatározza, ezért kopáskritériumokat szokás meghatározni. Ez lehet magának a kopásnak a geometriai mérete (kiterjedése vagy mélysége, akár szabad szemmel is látható módon), lehet egy kimeneti paraméter, pl. a felületi érdesség vagy egy geometriai méret túrésen kívülre esése, lehet a forgács alakjának vizsgálata, vagy egyszerűen egy tapasztalati úton előírt forgácsolási idő (vagy hossz) elérése.

A szerszám tönkremenetele alapvetően kétféle lehet. Az első a hirtelen végbemenő kicsorbulás, vagy törés jellegű. Ezzel a továbbiakban nem foglalkozom. A másik, időben elnyújtva, a már korábban említett határértékekkel meghatározható kopás jelensége, melyet több fizikai vagy kémiai hatás is kiválthat. A munkadarab és a szerszám felülete nagy sebességgel, nagy nyomás alatt mozdul el egymáson. **Abrazív kopási** folyamat az, amikor a két felület közé kemény koptató részek kerülnek. Ezek a kemény részek származhatnak a munkadarabból (extrudált műanyag rudakban a csigából, vagy az extrúder szerszámából származó fémrészek), vagy akár magából a szerszámából is. A kopást alapvetően a fémrészek mennyisége, illetve a szerszám anyagához viszonyított keménysége határozza meg.

Adhéziós kopás nem csak fémek esetén jellemző. A nagy hő és nyomás miatt a szerszám és a munkadarab egyes helyen összeheged, adhéziós kötést létrehozva. Az elmozdulás miatt ez a kapcsolat felszakad, egyes esetekben az szerszámából is kiszakadhat egy darab. Ez a ciklikus roncsolás okozza a szerszám kopását. Műanyag-fém kapcsolat esetén az adhézió leírására számos elmélet adott (mechanikai kapcsolódás, polarizációs, elektrosztatikus, diffúziós, termodinamikai, kémiai kötés, gyenge határréteg elmélete). Ezekből párat részletesebben ismertettek. A mechanikai kapcsolódás elmélete esetén, arra kell gondolni, hogy a forgácsolt műanyag, és a fém szerszám felületének topográfiája miatt mikroalakkal záró kötések jönnek létre, amelyek a forgácsolás során folyamatosan felszakadnak. A polarizációs elméletben az adhéziót az okozza, ha a poláros molekulacsoportok közel kerülnek egymáshoz, és összekapcsolódnak, dipólus kötést, vagy hidrogén-hidat kialakítva. Az elektrosztatikus elmélet hasonlóan pólusok kialakulását veszi alapul, de a potenciálkülönbséget a két anyag eltérő elektron szerkezete adja. A töltés-kiegyenlítődés miatt a két anyag felülete kölcsönhatásba lép, és az elektroncsere adja az adhéziós kötést. Az így kialakuló kötés erőssége rendkívül csekély [81][82]. Fémeknél, vas-alapú ötvözeteknél figyelhető meg a **diffúziós kopás**. Ez egy olyan kémiai reakció, amely során a szerszám egyes alkotói a munkadarabba, a munkadarabé pedig a szerszámába diffundál.

A szerszám felületének összetétele megváltozik, ez a réteg könnyen leválhat a szerszámról, ami általában kedvezőtlenebb irányba módosítja a forgácsolási folyamatot. Fémek és műanyagok esetén az eltérő anyagszerkezet miatt ez nem lehetséges. Szintén kémiai folyamattal írható le az **oxidációs kopás**. A magas hőmérséklet hatására a szerszám felülete oxidálódik, ami általában kobalt és wolfram oxidokat eredményez. Ezek az oxidok elhagyják a forgácsolási zónát, ezzel idézve elő a szerszámkopást. A magas hőmérséklet ezen kívül még **kilágyulás okozta** kopást is eredményezhet; a szerszám anyaga kilágyul, és a korábban említett szerszám-munkadarab keménységi arány megváltozik, ami kedvezőtlenebb forgácsolást, nagyobb kopást eredményez. A felsoroltakon kívül egyes irodalmakban megnevezik még a **mechanikai kopást** is. Ez főleg megszakított forgácsolás esetén jelentős (pl. forgácsolás több élű maróval), és a dinamikus rezgő igénybevétel miatti kifáradás, a szerszámon tapasztalható kipattogzások jellemzik.

A kopást csoportosítani szokták a megjelenési helyei és formái szerint is. a II.10. ábrán a leggyakrabban előforduló kopástípusok találhatóak. A II.10.A. ábrán a hátkopás jelensége látható. Az esetek nagy részében a forgácsolási sebesség csökkentésével a mértéke csökkenthető. A II.10.B. ábrán a kráteres kopás, a homloklapfelület jellemző kopása található. Összetett folyamat, de keményebb lapkával, illetve a forgácsolási hőmérséklet csökkentésével redukálni lehet. A II.10.C. ábrán nem tipikus kopás, inkább elégtelen forgácsolás okozta élratét képződés látható. Túl alacsony vágósebességnél egy lerakódás képződik a szerszám élén, ami egy idő után egyben leválik, általában szerszámtörés kíséretében. Az élkopás figyelhető meg a II.10. ábra D. jelű fotóján. Az élkopás során az éles forgácsoló él rádiuszos lesz, lágyabb anyagok forgácsolására alkalmatlanná válhat. Inkább fémek esetén tapasztalható a II.10.E ábrán is jól észlelhető plasztikus deformáció. Ilyenkor a szerszám kilágyul, a forgácsoló él deformálódik, így már nem képes megfelelő módon forgácsolni. A II.10. F és H ábrán hasonló jelenség látható. Az F ábrán kismértékű lepattogzás, amit általában dinamikus kifáradás okoz, míg a H ábrán egy mechanikus túlterhelés okozta törés látszik. A II.10.G ábrán termikus hatás okozta repedések észlelhetők. Ciklikus felhevülés-hűlés hatására a szerszám kifárad, azon repedések jelennek meg. Ez a jelenség figyelhető meg, ha vídia szerszámot alkalmazunk vízhűtéssel. A forró forgácsolási zónából kilépő szerszámél a hideg hűtővízzel találkozik, hirtelen lehűl. Ez a ciklikus hőváltozás okozza a termikus repedések megjelenését. [10][13][16]



II.10. ábra. A kopás megjelenési formái [16]

II.4.2. A szerszámkopás hatása a felületi érdességre és forgácsoló erőre

A forgácsolással kapcsolatos kutatások, irodalmak két jól elkülöníthető kategóriába sorolhatók. Az első csoportba tartoznak azok, ahol magát a kopást vizsgálják, mint jelenséget. Az egyes paraméterek hogyan befolyásolják a kopás mértékét, valamint a megjelenő kopástípusokat. Suresh és Basavarajappa [47] kutatásait a forgácsolási paramétereknél már elemeztem. AISI H13 acél esztergálásakor vizsgálták a forgácsolási paraméterek felületi érdességre, valamint kopásra gyakorolt hatását. A kopást a hátkopás felületi kiterjedésének mérésével határozták meg. Mindhárom paraméter hatással van a kopás mértékére, leginkább a vágósebesség növelésével nő a kiterjedése. Ezt követi az előtolás, növelésével szintén jelentősen fokozódik a hátkopás mértéke. A fogásvétel szerepe sem elhanyagolható, de a három paraméter közül ez a legkisebb. A mikroszkópos képek alapján a kopás fő okozója az abrazív hatás volt. A korábban már szintén említett, Selvaraj és társai –féle [50] duplex acél esztergálása közben végzett vizsgálatoknak a kopásra kiterjesztett része egyértelműen leírja, hogy a szerszámkopás fokozódik a vágósebesség növelésével. A magasabb hőmérséklet miatt a szerszám kilágyul, így veszít forgácsoló képességéből, valamint könnyebben kopik. Az előtolás növelésével a munkadarabot és a szerszámot egymáshoz szorító erő is növekszik, megnő a súrlódási erő, ezáltal nő a szerszám kopása is. Kisebb jelentőségű, mint a forgácsolósebesség, de nem hanyagolható el technológiai tervezésnél. Khan et al. [43] Inconel 718 nikkelt ötvözet forgácsolásakor vizsgálták a kopást befolyásoló tényezőket, valamint a kopástípusok legjellemzőbb típusát. A kopást leginkább a forgácsolási sebesség, előtolás, valamint a szerszám geometriája befolyásolja. A megjelenő kopások közül a hátkopás volt jellemző.

Camargo és társai [45] AISI D6 acél esztergásakor tanulmányozták a forgácsolási paraméterek kopásra gyakorolt hatását. A polikristályos köbös bórnitrit szerszámot optikai úton, mikroszkóppal mérték, minden egyes kifutás (400 mm) után. A használat után a szerszámokat pásztázó elektronmikroszkóppal is elemezték a kopási zóna közelében. Leginkább a forgácsolási sebesség határozta meg a kopás mértékét (az összefüggés jó közelítéssel lineáris), azonban a legjobb korrelációjú függvényben a forgácsolási sebesség, az előtolás négyzete, valamint a kettő szorzata is szerepelt.

A másik csoportba tartoznak azok a kutatások, amelyek a kopást tekintik bemeneti paraméternek, és ennek hatását vizsgálják a felületi érdességre, valamint a forgácsolóerőre. A kopásnak egy különleges, kompozitoknál tapasztalható hatását írta le Gaugel et al. [49]. Szénszál erősítésű epoxy próbatesteket vizsgáltak vídia fúróval történő megmunkálásakor. A forgácsolási paraméterek állandóak, 6 mm-es átmérőjű, 90 fokos csúcsszögű fúróval fúrnak át 6 mm vastag próbatesteket. A folyamatos kopás hatására a furat alakhelyessége és mérete változik, de nem jelentősen. A szerszámról készült pásztázó elektronmikroszkópos képek alapján a kezdetben éles vágóél folyamatos lekerekedése figyelhető meg. A próbatestekről készült optikai mikroszkópos képeken pedig a furatok környéki delamináció és száلكihúzóadás fokozódása jelentkezik.

A felületi érdesség szempontjából is fontos a kopás ismerete. A munkadarab felületi mikrogeometriáját, ezáltal az érdességét a szerszám kopása nagyban meghatározza. A forgácsolt felület gyakorlatilag a szerszámcsúcs negatívja a darabon, így egy kopott, és ez által szabálytalan szerszámgeometria teljesen más felületet forgácsol, mint a szabályos szerszámé. Fontos a szerszám kopásának detektálása, és a kopott szerszámok kiszűrése a forgácsolási folyamatból. A szerszámcsúcsról fogácsolás közben készített 2D-s képek elemzésével mutatta ki a kopást Shahabi és Ratnam [41]. Bevonatos vídia szerszámmal esztergáltak AISI 403 acél rudakat, majd bizonyították, hogy a szerszámcsúcs kopásának jóval nagyobb hatása van a forgácsolt felületi minőségre, mint a hátfelületi kopásoknak. A kopott szerszám keltette többlet vibráció hatása minimális. Zhang és To [44] abból az alapvető feltevésekből indult ki, hogy a szerszámkopás hatására nő a szerszám csúcsrádiusza, ami kedvezőbb felületi érdességet jelenthet. Gyémánt ütőkéssel végeztek forgácsolási próbákat bronz próbatesteken. A domináns kopási mód a hátkopás volt. A kopott szerszám hátránya az újjal szemben, hogy míg az új szerszámmal tiszta vágás érhető el a ki és belépési oldalon is, addig a kopott szerszám roncsolt, tépett kilépési élt, ezáltal kedvezőtlenebb forgácsleválást eredményezett. A felületi érdességre gyakorolt hatása egyezik az elméleti feltevéssel, a kopás során kialakult új élgeometria változatlan paraméterekkel finomabb felületet forgácsol. Ez azonban gyakran selejt darabot eredményezhet, ezért semmiképp nem tekinthető a kopás pozitív hatásnak.

A forgácsolóerő szempontjából elemezte Mkaddem et al. [48] a kopás okozta változásokat. Többféle bevonatú (több és egyrétegű CVD bevonat) és bevonat nélküli vídia szerszámot vizsgált üvegszálal epoxy esztergálásakor. Az új lapkákat folyamatos forgácsolással koptatták, közben mérve a forgácsolóerőt, majd a forgácsolási folyamat után mikroszkópos felvételeket készítettek a használt lapkákról. A szerszám folyamatos használatával a hátfelület kopása, és ezzel együtt a forgácsolóerő is folyamatosan növekedett.

A kopási mechanizmusok közül egyértelműen az abrazív kopás dominált a homlokfelületen. Khan és társai [43] PVD és CVD bevonatos lapkával végeztek gyalulás jellegű forgácsoló kísérleteket szénerősítésű epoxy és üvegszál erősítésű epoxy próbatesteken. A szerszámkopást később szelektív elektronmikroszkóppal elemezték. A kopás mértékét a szerszám által megtett úttal jellemezték. Mindkét anyagnál és mindkét lapkatípusnál megfigyelhető, hogy a szerszám folyamatos kopásával a forgácsolóerő növekszik, de szénszálás epoxy esetén ez a hatás sokkal fokozottabb, a kopás jóval nagyobb területre terjed ki. Az abrazív hatás volt a legjelentősebb koptató hatás mindkét bevonat típusnál. A lapkaválasztás szempontjából a PVD lapkák kedvezőbbek, a forgácsolóerő jóval kisebb, a szerszám kopása is mérsékeltebb mint CVD lapka esetén. Rizal et al. [51] különböző forgácsolási paraméterekkel végzett kísérletek alapján alkottak fuzzy- alapú modellt a kopás előrejelzésére JIS S45C szénacél esztergálásakor. A forgácsolóerőt 3-irányú piezoelektromos erőmérővel mérték. A modellalkotás folyamatát nem részletezem, a mérési eredmények alapján azonban egyértelmű, hogy a kopás hatására a forgácsolóerő folyamatos növekedése, főleg az előtolás irányú erő határozott fokozódása jellemző. A szerszámkopás okozta változásokat használják ki a kopás méréséhez is. Bhuiyan és társai [46] a szerszám állapotát kopás szempontjából akusztikus emisszióval vizsgálták.

Az akusztikus jelek leszűkíthető frekvenciasávban köthetők közvetlenül a forgácsolási folyamathoz, így az azokban történt változások utalnak a szerszám állapotára. A mérés nagy előnye, hogy nem szükséges a szerszámot, vagy a szerszámgépet változtatni, esetleg speciális szerszámbe fogást alkalmazni. Hátránya azonban, hogy a forgácsolási folyamat tervezett változtatása (szerszámváltás, nagyolás-simítás, stb.) is nagy hatással van a kibocsátott emisszió frekvencia értékeire, illetve több gépből álló gyártócsarnok esetén nagyon nehéz kiszűrni a zavarjeleket.

II.5. Műanyagok forgácsolása

Ha a gyártástervezés során a forgácsolás bizonyul a leggazdaságosabb eljárásnak, főleg fémekhez képest számos eltérést figyelembe kell vennünk. Az egyik nagy eltérés a **mechanikai tulajdonságokban** rejlik. A műanyagok rugalmassági modulusa jóval kisebb, mint a fémeké, azaz egy adott erőhatásra sokkal nagyobb deformációval válaszolnak. Számszerűsítve acélok esetén 210 GPa, PP esetén 1,5 PA6 esetén 3,5 GPa modulus értékről beszélhetünk, ami két nagyságrend eltérést jelent. Ugyan a forgácsoló erő kisebb, mint fémek esetén [5], ennek ellenére a korábban tárgyalt kihajlási és deformációs hibákra (II.4. és II.5. ábra) fokozottan ügyelni kell. A másik jelentős eltérés a **termikus tulajdonságokban** állapítható meg. A lágyulási hőmérséklet műanyagoknál jóval alacsonyabb (pl. POM esetén az olvadáspont 168°C, míg az acéloknál ez nem jelent különösebb megterhelés), ami rendkívül rossz hővezetési képességgel (acélok esetén kb. 50 W/mK, műanyagoknál ez az érték 0,03 és 0,05 W/mK között van) párosul. A helyi túlmelegedéseket, olvadásokat el kell kerülni, a forgácsolásra jellemző hőmérsékletet ezért a lehető legalacsonyabb értéken kell tartani, hogy az alkatrészek hősokkját elkerüljük.

A szerszámoknak mindig tökéletesen élesnek kell lenniük, különben a munkadarabbal való érintkezésénél fokozott hőfejlődés jön életre, vagy a szerszám inkább tépi, és nem elvágja az anyagot. Szerszámanyagok szempontjából használhatók a gyorsacél és vídiá szerszámok is, váltólapkás szerszámok esetén általában alumíniumhoz használt (ha az adott gyártónál külön műnyagra ajánlott nem érhető el, ami a gyártók nagy részénél megfigyelhető) bevonat nélküli lapkák használatosak. Esztergálás során az esetek nagy részében folyóforgács keletkezik, ennek elvezetéséről, adott esetben a forgács megtöréséről gondoskodni kell. A forgácstörést műanyagoknál nem a szerszámba köszörült forgácstörő éllel kell elképzelni, sokkal inkább forgácsolás közbeni rövid megállásokkal, vagy előzetesen a munkadarabba mart forgácstörő horonnyal. A darabidőt nagyban megnöveli, de egyes esetekben, főleg lágy műanyagok furatesztergálásánál elkerülhetetlen a szerszám nagyolási ciklusok utáni, vagy közben kiemelése a darabból, a forgács eltávolításának érdekében. Korábban már említettük a szerszámok élességére vonatkozó kritériumot, ehhez azonban azt is hozzá kell tenni, hogy esztergakések esetén mindig szükséges egy kis értékű (0,2 mm) csúcsrádiusz alkalmazása, különben nagyon durva, barázdált felületet forgácsol. Szinte mindig pozitív homlokszögű szerszám ajánlott, negatív homlokszögek esetén a forgácsolóerő eltolja, kihajlítja a darabot.

A homloklapot a lehető legfinomabb édességűre kell köszörülni vagy polírozni, hogy azon a forgács ne akadjon meg, gond nélkül tudjon továbbcsúszni. Vágósebességnél a fémekhez képest magasabb értékeket alkalmaznak. Általános megfontolás, hogy a lehető legnagyobb előtolást érdemes használni (inkább több fogásvétellel) hogy a helyi megnövekedett hő termelődés minimális értéken maradjon. A hűtés – kenés szempontjából a műanyagoknál szintén eltérő megfontolásokat kell tenni. Általában hűtő-emulziót alkalmaznak, amiből már számos gyártó ajánl műanyagokhoz, sőt azon belül akár az adott műanyagtípushoz való olajat, amit általában 5-15% arányban kevernek a hűtővízhez. Alkalmazható módszer a levegőhűtés is, ez főleg akkor előnyös, ha nagy vízfelvételű (pl. poliamidok) műanyagok forgácsolása során a duzzadás elkerülése is fontos szempont.

Műanyagok forgácsolásakor a hűtő-kenő emulzióknak egy másik, rendkívül fontos feladata is van. Az esetek döntő többségében folyóforgács keletkezik, amit megfelelő módon el kell vezetni a forgácsolási zónából, különben a szerszámra vagy az alapanyagra tekeredhet, szerszámtörést vagy selejt darabot eredményezve. A levegőhűtés gyakran nem megfelelő, mivel a nagynyomású víz mozgási energiája szükséges ahhoz, hogy a forgácsot eltávolítva a vágási zónából a forgácskihordó felé vezetve, meggátolva a visszatekeredését. Az újabb szerszámgépeken gyakran elérhető a magasnyomású (80 bar) hűtővíz is, ami pl. ágyúfűrésznél megoldja a vékony forgács elvezetésének kérdését. A műanyagok forgácsolásához kapcsolódó szakirodalmakat tanulmányozva egyrészt a már korábban is említett hiányosság, azaz a témával foglalkozó kutatások kis száma jellemzi. Az egyes vonatkozó irodalmakat a korábbi pontokban, tartalmuknak megfelelően a fémek forgácsolásával foglalkozó cikkek között elemeztem. Ezen kívül fontos megemlíteni, hogy a kis mennyiségű irodalom nagyobb része is inkább a töltő- vagy erősítőanyagot tartalmazó műanyag kompozitokkal foglalkozik, ahol a kettős fázisú anyag forgácsolása az erősítőanyagot nem tartalmazó műanyagokéhoz képest nagyban eltér, így ezeket sem lehetséges egy az egyben felhasználni a kutatásaimhoz.

II.6. Műanyagok hőkezelése

II.6.1. A maradó feszültség

Ha egy műanyag termék forgácsolással készül, az minden esetben a második, vagy harmadik lépés akkor is, ha alap polimer előállítását, majd későbbi adalékolását, granulálását nem veszem a technológiai folyamatba. A kiinduló állapot az esetek nagy részében valamilyen, táblából vagy lemezből nagyolt méretre vágott téglatest (maráskor), vagy rúd, esetleg cső (esztergáláskor). Létezik olyan termék is (például a pár tized mm-es furatokkal ellátott festékipari szórófej), ahol a fröccsöntött alaptesten az egyes geometriai elemek forgácsolással készülnek. A forgácsolás alapanyagai, a műanyag féltermékek magukban hordozzák a korábbi technológiák lenyomatát, azaz a maradó belső feszültséget is. Maradó feszültségnek az a feszültségi állapot tekinthető, ami a vizsgált test egyensúlyi állapotában, nyugalomban is fennáll. A maradó vagy belső feszültség önmagában nem minden esetben jelent azonnali tönkremenetelt, de előfordulhat, pl. üveglapok túl gyors hűtésekor tapasztalható törés esetén. A veszély inkább abban rejlik, hogy ez a feszültségi állapot az alkatrészre használat közben jellemző feszültségtenzorhoz hozzáadódik. Ez eredményezheti a méretezési feszültségekhez képest jóval nagyobb terhelést, ami tönkremenetelhez vezet. Előfordulhat persze, hogy ezt a jelenséget használják ki, azaz szándékosan olyan belső feszültségi állapot alakul ki, ami majd a későbbi terhelésekhez hozzáadódva késlelteti vagy eltolja az alakváltozás mértékét, nagyságát. Ez a feltevés általában a folyáshatár eléréséig igaznak is tekinthető. A maradó feszültség, mint egy anyag alakításának velejárója mindig jelen van, ennek nagysága lehet jelentős befolyással az alkatrész élettartamára, vagy teljesítményére. A belső feszültségeket mindig a térfogati részek vagy alkatrészek közötti különbség okozza. Ezek három csoportba sorolhatók kiterjedésük szerint. Az első csoportba a makroméretű, nagy távolságon belül fennálló feszültségek tartoznak. Jó példa erre a hárompontos hajlítás, ahol a próbatest középvonalától a hajlító erő irányába haladva húzás, visszafelé haladva nyomás tapasztalható. Ha a terhelő erő megszűnik, és maradó alakváltozást szenved a próbatest, a belső feszültség ennek megfelelően rajzolódik ki. Második csoportba az ún. szemcsenagyságú feszültségek tartoznak, erre nagyon jó példa a részben kristályos polimerek szerkezete okozta feszültségi állapot. Az amorf és kristályos részek közötti elasztikus és termikus tulajdonságok különbsége okozza a belső feszültséget. A harmadik csoportba tartoznak az atomi méretű, általában a határfelületi koherenciából illetve a molekulán belül található diszlokációkból adódó feszültségek. Az utóbbi két típus hosszabb távolságon mérve egyensúlyban van, az első típus viszont okozhat szabad szemmel is jól látható deformációkat a terméken. A maradó feszültség kialakulásához alapvetően két vizsgált elemi rész (ez lehet egy anyagon belül, vagy egy összeszerelt gépben két alkatrész) közötti termikus, kémiai, vagy mechanikai eltérés szükséges. Termikus különbségre jó példa a különböző hőtágulású anyagok összeépítése. A hőmérséklet növekedésével az anyagok eltérő mértékben nyúlnak meg, ami a visszaalakulás során belső feszültséget eredményez. Mechanikai példának tekinthető a korábban már említett hárompontos hajlítás, vagy aszimmetrikus alkatrészek esetén a terhelés irányától függő viselkedés. Kémiai eltérésnek tekinthető a nitridált acélok felülete és a belső mag közötti N koncentráció különbség okozta feszültségek.

Jó példa a belső feszültségek kialakulására egy kocka alakú test rendkívül gyors hűtése. A külső felületen gyorsabban csökken a hőmérséklet, mint a kocka belsejében, azért az gyorsabban zsugorodna, mint a belső. A két vizsgált vastagság közötti különbség hűlés közben maradó feszültséget okoz. Mechanikai példának tekinthető egy PET palack. Ha a palack belsejében a méretezési nyomásnál nagyobb nyomás adódik, a palack külső felülete tágulni kezd. Mivel kívülről csak a légköri nyomású levegő veszi körbe, ezt szabadon megteheti. A belső felületen eső nagy nyomás miatt szintén tágulni akar, de ezt szabadon nem teheti meg. A két felület feszültségi állapota között lehet akkora különbség is, hogy a belső felületi rétegekben már maradó alakváltozást szenved, míg a külső rugalmasan visszaalakulna. Ha a belső nyomást megszüntetjük, a külső felület visszazsugorodna eredeti méretére, a maradandóan alakváltozott belső rész viszont nem engedi, emiatt maradó feszültség alakul ki a palack két része között. Ha ehhez hozzáadódik a palack gyártása közben (a technológiai nyújtás fröccsfúvás közben, hőterhelés, egyenlőtlen hűlés) okozta belső feszültséget, egy következő nyomásterhelés könnyen vezethet tönkremenetelhez a várható, vagy korábban mért nyomásérték előtt is. [53][54]

Technológiai szempontból összefoglalva minden olyan folyamattal, amivel az alapanyag alakja, fizikai állapota megváltozik, feszültség kerül az anyagba [66] [67] [72]. Singh és Agrawal [60] alumínium ötvözetek forgácsolásakor és képlékeny alakításakor keletkező, felületi maradó feszültségeket vizsgálták. A belső feszültség a kifáradási határ csökkenését, illetve a korróziós törésre való hajlam fokozódását okozta. A forgácsolással nyomó irányú maradó feszültséget, míg a képlékeny alakítással húzó irányú feszültséget vittek az anyagba. A két technológia kombinálásával a feszültségi állapot változtatható, de ezekben az esetekben is inkább nyomó irányú maradt a feszültségi állapot, mivel forgácsolással több feszültség kerül az anyagba. A vizsgálat során jól látható, hogy a technológiai paraméteres változtatásával a keletkező belső feszültség értéke nagyban befolyásolható. Belső feszültségek kialakulásának szempontjából kritikus technológia a hegesztés, melynek során az alkatrésznek csak azon részét éri hő, ahol maga a hegesztés zajlik. Egyrészt a hegesztési hőnek kitett rész tágulni szeretne, de a többi, hidegebb rész miatt nem tud. A másik pedig a hegesztési varrat; hűlés során a külső felületek előbb hűlnek le, az egyenetlen hőprofil miatti elhúzóerők okoznak maradó feszültségeket. [70][71]

Ahogy a korábbiakban már szó esett róla, a műanyag forgácsolás alapanyagait általában extrudált, fröccsöntött vagy kalanderezett alaptestek, melyekben minden esetben van belső feszültség. Különbséget csak ennek mértéke, vagy iránya okozhat. Mivel rendkívül sok paramétertől függ (gyártási hőmérsékletek, nyomások, termék alakja, műanyag típusa, stb.) nagyon nehéz előre megjósolni [65]. A maradó feszültség kialakulását okozhatja *termikus*, vagy *áramlási* hatás. A belső feszültség a feldolgozás utáni vetemedés fő okozója, a zsugorodás velejárója. Az áramlás okozta feszültség kialakulása egy összetett folyamat. Amikor az anyag olvadék állapotban van, az olvadási hőmérséklet felett, például fröccsöntéskor, a hosszú polimer molekulaláncok egy tetszőleges térbeli alakot vesznek fel. Feldolgozás közben ezek a hosszúkás láncok nyírás hatására az áramlás irányába orientálódnak. Ha a megszilárdulás még azelőtt következik be, hogy ezek a molekulák az egyensúlyi, feszültségmentes helyzetüket felvehetnék, ez az orientáció a polimerbe „fagy”.

Ezt más néven orientációs feszültségnek is nevezik. A nyíró igénybevétel és a gyors hűtés együttes eredményeként a termék, vagy féltermék külső fala egy fokozottan orientált rész. Ez az orientáció később is megmarad, így szerkezeti anizotrópiát okoz. A belső részeknél az áramlás okozta feszültségek kisebb mértékűek, mivel a korábban megszilárduló külső héj elszigeteli a belső magot, így itt a lehűlés lassabb, a molekuláknak van ideje arra, hogy feszültségmentes állapotot vegyenek fel. Az áramlási viszonyok okozta maradó feszültség csökkentésére (ezt teljesen megszüntetni nem lehet) a legjobb módszer, ha a terméktervezés, vagy szerszámtervezés fázisában már optimalizált a gyártás közbeni áramlás iránya. Az áramlás miatt kialakuló belső feszültség nagyobb jelentőségű, mint a termikus. Ezek mértéke csökkenthető lenne, a nagyobb ömledékhőmérséklettel, vagy a hűtési idő növelésével. De a növelt ciklusidő emeli a költségeket is, így gazdasági szempontok miatt ezt nem lehet a kellő mértékig meghosszabbítani. [73]

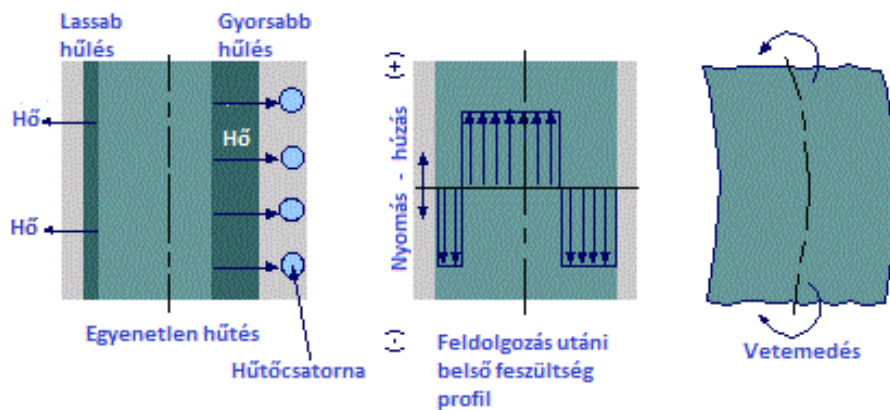
Az ömledék áramlás okozta belső feszültségek csökkentésére több módszere ismert:

- *magasabb ömledék hőmérséklet,*
- *magasabb szerszámfal hőmérséklet,*
- *lassabb befröccsentési idő, vagy extrúder fordulatszám,*
- *kisebb mértékű utónyomás,*
- *kisebb áramlási útvonal.*

A termikus hatás okozta feszültségeknek fő okozója, hogy a termék nem megfelelően hűl. Itt arra kell gondolni, hogy az egyenetlen falvastagság miatt a termék nem minden keresztmetszetében azonos sebességű a lehűlés. Ez az ún. dilatációs feszültség. Mivel az egyes részek nem egyenletesen hűlnek le, zsugorodásuk sem egyforma, így a termékben belső feszültség keletkezik. Az így keletkezett feszültség egyik jele a termék falán tapasztalható beszívódás. Érdekes tény, hogy a szálerősített anyagokban a maradó feszültség sokkal kisebb mértékű. A termikus hatás okozta feszültség csökkenhető a következő módszerekkel [73]:

- *megfelelő nagyságú és idejű utónyomás*
- *egyenletes hűlés*
- *egyenletes falvastagság.*

A fent említett módszerek technológiai oldalról közelítik meg a feszültség csökkentését. Forgácsolás során már a kész féltermék –rúd, vagy tábla- a kiindulási állapot. Ezekbe már a legyártásuk során került feszültség, és ezt valahogy csökkenteni kell.



II.11. ábra. A belső feszültség okozta vetemedés kialakulása

Poduska et al. [61] a maradó feszültség eloszlását vizsgálták PP csövekben. A maradó feszültség a cső extrudálásakor keletkezett. Az extrudálás végén a polimer ömledék szilárd halmazállapotot vesz fel, amit nagymértékű zsugorodás kísér. Mivel a termékben vastagsági rétegenként eltérő hűlési profil alakul ki, az egyes részek eltérő mértékben zsugorodnak, ami a lehűlés után az anyagba „fagyott” maradó feszültséget eredményez. Az eltérő hűlési profil a polimerek rendkívül rossz hővezetésének köszönhető, a külső vízzel hűtött, és a belső szabad levegővel érintkező felület között nagy hőmérséklet eltérés lehet. Maciás és társai [63] átlátszó műanyag (a vizsgált esetben polikarbonát) lencsékben lévő belső feszültség csökkentését vizsgálták. A fröccsöntéssel előállított lencsékbe két módon juthat maradó feszültség. Az egyik maga a gyártási folyamat, a polimer ömledék folyékony állapotból szilárdvá válásakor bekövetkező deformáció és zsugorodás okozta. A másik mód pedig hűlés közben, az egyenetlen hűlés okozta belső feszültségek kialakulása. Mindkét esetben káros belső feszültségről beszélhetünk, ami a termék élettartamát, fényáteresztését és vegyi ellenálló képességét is negatív irányba befolyásolja. A belső feszültségek mérésénél is ezt használták ki, különböző vegyszerekkel reagáltatva, illetve a dupla fénytörést kihasználó fotoelasztikus mérésekkel határozták meg a mértékét. A maradó feszültséget hőkezeléssel csökkentették. A vizsgálatok alapján elmondható, hogy hosszabb ideig történő, az üvegesedési hőmérsékletet 24°C-al megközelítő hőkezelési eljárással a belső feszültség értéke jelentősen csökkenthető anélkül, hogy az anyagban jelentős degradációt okozna.

II.6.2. A hőkezelés alkalmazása

A korábbiakban taglalt maradó feszültségeket mindenképp csökkenteni kell, erre a leggyakoribb módszer a hőkezelés. A hőkezeléssel a feszültség ugyan teljesen nem szüntethető meg, de egy elfogadható határérték alá csökkenhető. Ez magasabb hőmérsékleten, az olvadási hőmérséklethez közelebb történik, hosszabb ideig, ami akár több nap időtartamot is felölel. Fontos, hogy a belső feszültségeknek legyen idejük leépülni, de a degradáció ne legyen túl nagy. Ezen kívül ügyelni kell a fűtési és hűtési sebességekre is, nehogy a túl gyors hőmérsékletváltozással a hőkezelési folyamat is feszültséget vigyen az anyagba.

Ahogy a fentiekből látszik az alapanyagban lévő, illetve a forgácsolással külön bevitt feszültség sok esetben külső terhelés nélkül is jelentős terhelést jelent az alkatrésznek, ezért a legtöbb esetben elkerülhetetlen a feszültségmentesítő hőkezelést alkalmazása. Az utólagos hőkezelés elsősorban nem a sorozatos, forgácsolástechnológiai hibák korrigálását szolgálja – bár arra is alkalmas –, de az optimális forgácsolási paraméterek betartása esetén is keletkező extra feszültség csökkentése révén, a késztermék használhatóságát jelentősen javítja. Az előzőekben leírtak a hőkezelés feszültségcsökkentő hatását írják le, a továbbiakban is ezzel foglalkozom. Azt azonban mindenképp meg kell említeni, hogy a hőkezelésnek műanyagok esetén nem csak feszültségcsökkentő hatása van. A hőkezelés célja lehet még:

Vegy ellenálló képesség javítása. Főleg amorf anyagok feszültség korróziós hajlamát csökkenti, illetve a hőkezelés hatására nő a kristályos részarány, ami tovább növeli a vegyi ellenálló képességet.

Kopásállóság javítása. Pl. PAI-ból készült siklócsapágyak esetén a kopásállóság, ezáltal az élettartam nagyban javítható a hőkezelés alatt zajló utópolimerizáció miatt. [5]

Utó-térhálósítás. Például poliimidek esetén (pl. a számítógépek üvegszál erősítésű PEI nyomtatott áramkörei) az alap polimert oldat állapotban dolgozzuk fel, üvegszál erősítéssel ellátott kompozitként. Ezeknél az anyagoknál a hőkezeléssel biztosított poliaddíciós folyamattal utólagos térhálósítás zajlik. [3]

Liang et al. [55] nem közvetlenül a hőkezelés, hanem az oldószeres gőzölés LED-ekre kifejtett pozitív hatását vizsgálták. A vizsgálatok során egyértelműen kiderült, hogy az eljárással lényegesen javítható a kék színű LED fénykibocsátása. Ugyan a javulás főleg kémiai reakciók összetett kombinációjának köszönhető, fontos megjegyezni, hogy a rétegek kialakítása közben többször is alkalmazzák a hőkezelést, mint kiegészítő eljárást. Jurik és társai [56] PES fóliára felhordott vékony aranyréteg viselkedését tanulmányozták különböző hőkezelési hőmérsékleteken. A kapott eredményre nagy hatással volt, hogy a polimer üvegesedési hőmérséklete (T_g) felett, vagy az alatt végezték a hőkezelési próbákat. A T_g közelében végzett hőkezeléseknél a fémréteg külön kisebb frakciókba oszlik. Ha a hőkezelés T_g alatti hőmérsékleten történt, a felület tús szerkezetűvé alakult. Ha ennél magasabb hőmérsékletet választottak, akkor ezek a túszerű hegyek eltűntek, egy tompább, rücskös felület adódott. A hőkezelési hőmérséklet befolyásolta a minták felületi ellenállását is. Minél magasabb volt a hőmérséklet, a felületi ellenállásra annál nagyobb értéket mértek. Cián-észter alapú gyanták hőkezelés alatti viselkedését kutatták Gusakova et al. [57]. 50°C-tól 250°C-ig, 48 órás hőntartással vizsgálták a porózus próbatesteken bekövetkező változásokat. A változások nagyban függtek a polimer molekulatömegétől, illetve az alkalmazott porogén mennyiségétől. Egy hatás azonban minden esetben mutatkozott; a hőmérséklet emelésével a próbatestek tömege is nagyobb mértékben csökkent a hőkezelés után. A 150°C feletti hőkezeléseknél az anyag irreverzibilis változásokat szenvedett, színe sötétebb lett, rideggé, törékennyé vált. Shang és társai [58] polimerből készült OFET tranzisztorok gyártás közbeni hőkezelését vizsgálták mikrohullámú besugárzás segítségével. A cél a hőkezelés elektromos tulajdonságokat befolyásoló hatásának feltárása volt.

A hőkezelés miatt nőtt a polimer kristályos részaránya, és határozott molekuláris orientációt okozott, ezáltal kedvezőbb szerkezetet kialakítva elektromos alkalmazásokhoz. A tranzisztorok teljesítménye a hőkezelésnek köszönhetően nőtt, a magas-alacsony jelszint aránya is nagyobb értéket vett fel. A hőkezelés pozitív, és negatív hatásait is részletesen bemutatják Myllari et al. [59] kísérletei. PEEK szálakat hőkezelték 250°C-on 1-128 napig. A hőkezelés rövidtávon (1-8 nap) kedvező hatást gyakorolt a mechanikai tulajdonságokra (szakítószilárdság és modulus értéke nőtt, szakadási nyúlás csökkent) a termikus és reológiai tulajdonságok jelentős romlása nélkül. Ezt a másodlagos kristályosodásnak, illetve a térhálók kialakulásának lehet tulajdonítani. 8 és 16 nap között a felületen vizuálisan is megjelenő degradációt érzékenyebb műszerekkel lehetett érzékelni, illetve a mechanikai tulajdonságok is romlottak, de a szálak használhatók maradtak. A 16. nap utáni időszakban (ami már inkább öregítés, mint hőkezelés) a mechanikai és termikus tulajdonságok egyértelmű romlása tapasztalható, a nagymértékű degradáció miatt. A termikus tulajdonságok romlásán az olvadási hőmérséklet csökkenését és az üvegesedési hőmérséklet növekedését értem. Mechanikai tulajdonságokat tekintve az anyag sokkal ridegebb, törékenyebb lett. A degradáció hatása, a szálak barnulása már szabad szemmel is jól észlelhető.

A legtöbb gyártó megadja a hőkezelési utasítást az alapanyagai mellé [75], illetve a szakirodalomban [5] is találhatunk ezzel foglalkozó fejezeteket. A hőkezelési folyamat egyes paramétereinek jelentőségét, illetve az anyagjellemzők hatását azonban bővebben nem részletezik. Ahogy az előzetes kutatásokból látszik, a helytelen hőkezelés is jelentős hibaforrás lehet a gyártási folyamatban, ezért ezt egy későbbi fejezetben vizsgálom.

III. A KÍSÉRLETEKNÉL FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

III.1. Szerszámgép, hűtőfolyadék és programozás

A témát tekintve, a mérések során fontos, hogy a valós ipari termeléshez nagyon hasonló, vagy azzal egyező körülményeket biztosítsak. Ennek tükrében a forgácsolási kísérletek az EuropTec Kft. által biztosított, a termelésben aktívan részt vevő Mori Seiki SL-150 ellenorsós eszterga megmunkáló központon történtek. A III.1. ábrán látható a megmunkáló központ, valamint egy forgácsolási próbafolyamat. A mérések során végig a szerszámgépre szerelt Kitagawa B-206 típusú tokmányt alkalmaztam. A szerszámgép néhány fontosabb paraméterét a III.1. táblázat tartalmazza.



III.1. ábra. Az alkalmazott megmunkáló központ és a forgácsolási folyamat [78]

A forgácsolási kísérletek során hűtő-kenőanyagként hűtő emulziót, 95% víz, 5% Aral Sarol EP40 olajat használtam fel. A hozzáadott olaj bór, amin, nitrit, klór valamint szilikonmentes, részben szintetikus olaj. A gyártó általános forgácsoló megmunkálási célokra ajánlja. A keverést a vízcsapra szerelt automata keverő berendezés biztosítja. Egyes kutatásoknál pont a hűtőfolyadék szerepét elemeztem, ebben az esetben az alternatíva a levegőhűtés volt. A levegőhűtés elérhető, ehhez különleges módosítás nem volt szükséges. A vizsgálatokhoz a gépet manuális úton programoztam, egy mintaprogramot az A. melléklet tartalmaz.

Gyártmány	Mori Seiki
Típus	SL-150
Gyártási év	1997
Maximális teljesítmény	7,5 [kW]
Főorsó max. fordulatszám	5000 [1/perc]
Lökethossz	X: 230 Z:520 [mm]
Gyorsjárat sebesség	X: 24 Z:18 [m/perc]
Szerszámhelyek	12
Vezérlés	CNC / Fanuc 18 iTA

III.1. táblázat. A megmunkáló központ tulajdonságai

III.2. A felhasznált szerszámok

A forgácsolási kísérletekhez többféle felhasználású és kialakítású szerszámot alkalmaztam. Az ipari gyakorlathoz hasonlóan váltólapkás kivitelű, bevonat nélküli forgácsoló szerszámokat használtam. A külső átmérő esztergálásakor Denitool SDJCR 2020 K11 késszáral, a többféle élelhelyezési szög vizsgálatához ezen kívül SDJCL 2020 K11, SVLCR és SVLCL 2020 K13 késszárakkal dolgoztam. A késszárat az erőmérővel szerelt késtartóban rögzítettem a lehető legkisebb kilógással. A erőmérő berendezés felépítése a „II.4. A forgácsoló erő mérése és kiértékelése” pontban kerül bemutatásra. A felhasznált lapkákat, valamint azok geometriai adatait az III.2. táblázat tartalmazza, ahol γ a homlokszög, α a hátszög, $R\epsilon$ a csúsrádiusz κ az élelhelyezési szög (egyes irodalmak belépési szögnek is nevezik), ϵ pedig a csúcsszög jelölése.

Jel.	Gyártó	Sorozatszám	γ [°]	α [°]	$R\epsilon$ [mm]	κ [°]	ϵ [°]
A	Denitool	DCGT11T302FN-250DX2	25	7	0,2	95	55
B	Denitool	VCGT130302FN-250DX2	25	7	0,2	95	35
C	Denitool	DCGT11T304FN-250DX2	25	7	0,4	95	55
D	Duracarb	DCGT11T308-DL	26	7	0,8	95	55
E	Duracarb	DCGT11T302-DL	26	7	0,2	95	55
F	Atorn	DCGT11T302-MNHW6310	25	7	0,2	95	55
A-BAL	Denitool	DCGT11T302FN-250DX2	25	7	0,2	30	55
B-BAL	Denitool	VCGT130302FN-250DX2	25	7	0,2	50	35

III.2. táblázat. A külső átmérő forgácsolásához használt lapkák

Külön pontban szerepel a szerszámkopás vizsgálata, amelyhez a III.2. táblázatban is szereplő „A” jelű Denitool lapkákat használtam. A kontrollált kopású lapkákat PA66 anyag esztergálásával készítettem elő. A koptatáshoz töltetlen műanyagot kell használni, hogy ne a töltőanyag (pl. üvegszál) okozta kopás domináljon. A koptatás során külső átmérőt esztergáltam $v_c = 3000$ fordulat/perc vágósebességgel, $f = 0,01$ mm/fordulat előtolással és $a = 5$ mm-es sugárirányú fogásvétellel. A lapkák között különbséget a mérés előtti koptatás mértéke, azaz a forgácsolt út hossza jelentette. Az A1 jelű lapka új, míg az A2 (200mm), A3 (400mm), A4 (900mm) lapkákat különböző hosszokon koptattam. A választott hosszok egy lapka élettartamához viszonyítva rövidek. Nem a teljes (szabad szemmel is jól látható), leselejtezésig tartó kopást, hanem a kopás folyamatának lefutását szeretném megvizsgálni.

III.3. A vizsgálat anyagok

A gyakorlati tapasztalat és az irodalomkutatás is kimutatta, hogy a műanyagok különböző típusai között jelentős különbségek lehetnek forgácsolás szempontjából is. Ezért fontos, hogy minél többféle anyagot vizsgáljak egy paraméterváltoztatás hatásainak elemzésekor. A választott anyagok a vizsgálati időtartam alatt a gyártásban leggyakrabban előforduló anyagok. Kivétel nélkül hőre lágyuló, erősítő, vagy töltőanyag nélküli műszaki, illetve tömegműanyagok. A kiválasztáskor fontos szempont, hogy az iparban gyakran alkalmazott műanyagokat vizsgáljak, ezt ne csak az EuropTec. Kft. termékpalettájára alapozzam. A műanyag-feldolgozás nagyon kis részét adja a forgácsolás, de más cégekkel egyeztetve a felhasznált anyagokat kijelenthető, hogy a forgácsolásban gyakran előforduló anyagokat is (pl. POM, PA, PE, PET) vizsgáltam. A III.2. ábrán a forgácsolt próbatestekről készült fotó látható. A vizsgált anyagok néhány mechanikai tulajdonságát a III.3. táblázat tartalmazza. A ShoreD keménység megállapításához a próbatestek homlokfelületén 10 mérési ponton mért értéket átlagoltam. A keménység mérése Shore D Durometer 0,5D (gyári szám: 8027824) eszközzel történt.



III.2. ábra. A felhasznált próbatestek

III.3.1. Poliamid 6 (PA6)

A poliamidok a részben kristályos polimerek családjába tartoznak, általában kiváló mechanikai és termikus tulajdonságaik miatt alkalmazzák gyakran. Kitűnő kopás és ütésálló képességük van, molibdén-diszulfiddal társított verzióját gyakran használják siklócsapágyak anyagaként kopásállóságuk miatt. Sokszor találkozhatunk az üvegszál erősítésű formájával, mert így merevsége tovább növelhető. Vegyi szempontból kőolajszármazékoknak, főleg a benzinnel nagyon jól ellenállnak. Alkalmazásukat tekintve gépészeti elemekként, pl. fogaskerekek, siklócsapágyak anyagaként használják. Hátránya a hidrophil tulajdonsága, ami miatt magas a vízfelvétele, ez pedig a mechanikai tulajdonságait (pl. húzófeszültséget) nagymértékben megváltoztatja.

III.3.2. Polikarbonát (PC)

A polikarbonát kedvező mechanikai tulajdonságai mellett optikai szempontok alapján is kiválasztható egy feladatra. Amorf szerkezetű, de nem teljesen átlátszó, ennek ellenére rendkívül magas ütőszilárdsága miatt a leggyakrabban a műszer és gépípar átlátszó biztonsági „üvegeként” alkalmazzák. Vízfelvétele csekély, élelmiszerrel, illetve gyógyszerrel is érintkezhet, ezért a biztonsági burkolatok mellett ez a másik nagy alkalmazási terület. Rendkívül jó mérettartású, és könnyedén megmunkálható. Natúr állapotban is jó égésgátlási tulajdonságokkal bír.

III.3.3. Polietilén (PE)

A polietilén esetén több altípus is megkülönböztethető, amelyek között a molekulatömeg jelenti a különbséget. Jelen esetben a HDPE, azaz a nagy molekulatömegű polietilénnel foglalkozom. A polietilén az egyik legnagyobb mennyiségben felhasznált tömegműanyag. Műszaki alkalmazások esetén kis sűrűségét, könnyű feldolgozhatóságát, és egyszerű kémiai szerkezetének köszönhető jó vegyi ellenálló képességét használják ki. Legtöbbet a csomagolóipar használja fel, de készülnek belőle tömítések, lágy tömlők, valamint tartályok, tüzelőanyag tartályok is.

III.3.4. Poli-éter-éter-keton(PEEK)

A PEEK, a korábbi anyagokkal ellentétben már nem a műszaki műanyagok, hanem az eggyel magasabb szinthez sorolt high-tech, vagy high-performance műanyagokhoz tartozik. Műanyagokhoz képest rendkívüli mechanikai tulajdonságai mellett magas hőállóságai miatt tartozik ezen anyagok közé, akár a 250-300 °C-os hőmérsékleten üzemelő alkatrészekhez is alkalmazható. A kedvező mechanikai tulajdonságait magas hőmérsékleten is megőrzi, vegyi és hidrolízis ellenálló képessége is magas. Az alkalmazásokra elmondható, hogy csak szélsőséges hőmérsékleti, vagy mechanikai igénybevétel esetén alkalmazzák viszonylag magas ára miatt.

III.3.5. Poli-éterimid (PEI) és Polifenilén-szulfon (PPSU)

E két anyagot a hasonló alkalmazási területük miatt veszem egy bekezdésben. Teljesítményüket tekintve ugyan nem sorolhatók a high-tech műanyagok közé, de mindkettőre jellemző a nagy mechanikai merevség és szilárdság, rendkívül jó termikus és elektromos tulajdonságok. Vegyi ellenálló képességük magas, élelmiszerrel és gyógyszerrel érintkezhetnek. Az alkalmazási terület általában ezekhez a kiemelkedő tulajdonságokhoz kapcsolódik, villamos szigetelő perselyeket, gyakran sterilizálандó és tisztítандó élelmiszer és gyógyszeripari termékeket, valamint hőhatásnak kitett alkatrészek készülnek belőlük.

III.3.6. Poli-etliéntereftalát (PET)

Nagy mechanikai szilárdságú és jó mérettartású anyag. Alacsony súrlódási tényezővel bír, emellett jó kopásállóságú. Élelmiszeriparban engedélyezett, a hétköznapiak során az üdítős palackok alapanyagaként fordul elő leggyakrabban. Vízfelvétele elhanyagolható. Általában nagy terhelésű csúszó elemek, lineáris vezetőelemek, valamint túlnyomásos gáznemű közegekkel érintkező alkatrészeket (pl. dugattyú) gyártanak belőle. Elektromosan jó szigetelő, gyakori az elektronikai ipari alkalmazás is.

III.3.7. Polioximetilén, vagy poliacetál (POM)

Két altípus különböztethető meg, a POM-C a kopolimer, és a POM-H a homopolimer. A kopolimer hőállósága és vegyi ellenálló képessége jobb, a homopolimer nagyobb fokú kristályossága miatt kedvezőbb mechanikai tulajdonságokkal bír. Mindkét típusra elmondható, hogy a terhelés megszűnése után a deformáció szinte teljesen visszaalakul a kiindulási állapotra. Gépészeti elemek esetén széles körben alkalmazzák, kiválóan forgácsolható. Fogaskerekeket, rugókat, csúszóelemeket, bütyköket, szelepülékeket is gyártanak belőle. Elhanyagolható vízfelvétele, valamint kiváló mérettartóssága miatt számos területen jól alkalmazható.

III.3.8. Polipropilén (PP)

A polipropilén szintén inkább a tömegműanyagokhoz sorolható, azonban kopolimerizációval rendkívül sok lehetőség rejlik benne, amit jól mutatnak a jelenlegi anyagfejlesztési trendek is. A háztartási műanyag termékek nagy része PP-ből készül. Műszaki alkalmazásokban alárendelt alkatrészeknél találkozhatunk alap PP-vel, de kedvező ára miatt gyakran használják. Nagy előnye, hogy időjárásálló, jól hegeszthető és forgácsolható, valamint nedves közegben is elektromosan szigetelő marad. Hátránya a viszonylag szűk alkalmazási hőmérséklet ($-20^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$). Műszaki területen kisebb igénybevételnek kitett gépelemek, burkolatok, kis koptató hatásnak kitett csúszdák esetleg vegyi tároló edények készülnek belőle.

III.3.9. Poli-vinilklorid (PVC)

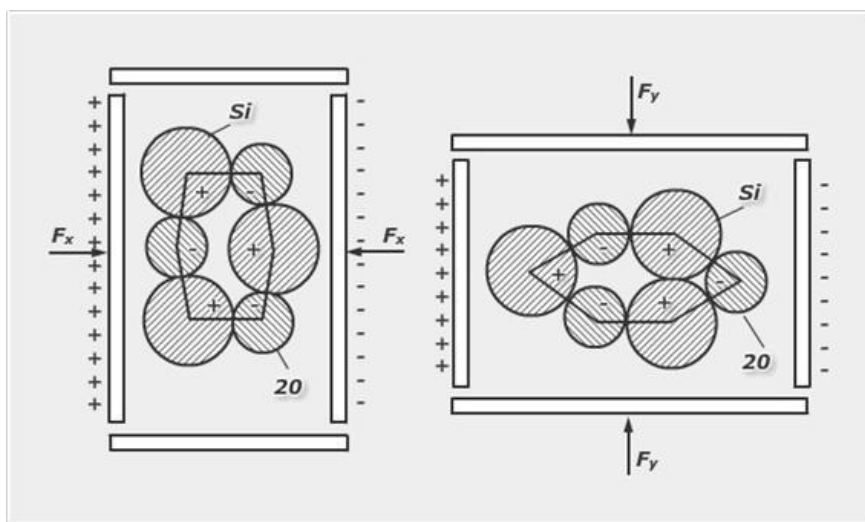
A PVC esetén szokás k-PVC, mint kemény és l-PVC, mint lágy anyagokról beszélni. Az egyik legnagyobb mértékben felhasznált tömegműanyag, az autóipar is gyakran alkalmazza, pl. a soft-touch műszerfalborításokhoz habosított formában. Az l-PVC-vel leginkább az építőiparban padlóburkolatok formájában találkozhatunk, a gépiparban a k-PVC-t alkalmazzák kisebb mechanikai és termikus terhelésnek kitett alkatrészek esetén; anyagtranszportoz, és tároló elemekhez, csövek, vezetőelemek, burkolatok, kádak stb. formájában. Rendkívül jól ragasztható, azonban környezetvédelmi szempontból a nagy lágyító tartalom miatt használata aggályos lehet.

Műanyag típusa	Sűrűség [kg/m ³]	Rugalmassági modulus [MPa]	Szakító szilárdság [MPa]	ShoreD keménység	Fajlagos törési munka (bemetszett) [J/m]	Nyomó szilárdság [MPa]
PA6	1150	3200	80	86,0	N.T.	68
PC	1190	2400	63	92,8	440	86
PE	970	200	10	76,5	N.T.	21
PEEK	1320	4000	97	95,9	120	170
PEI	1300	3400	110	97,5	55	140
PET	1360	2500	80	94,6	125	80
POM	1410	3200	60	91,8	68	31
PP	930	2000	34	87,2	42	45
PPSU	1400	3600	95	91,3	80	140
PVC	1400	2500	60	91,6	22	22

III.3. táblázat. A vizsgált anyagok összehasonlítása. [3][4][5][76]

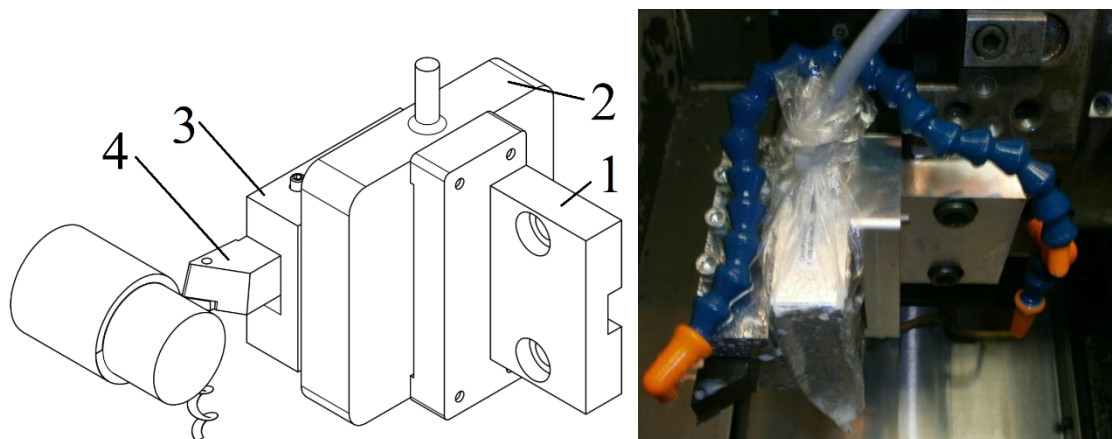
III.4. A forgácsoló erő mérése és kiértékelése

A forgácsolóerő meghatározásának módszerei alapvetően két nagy csoportba sorolhatók. Az első csoport számításon alapszik, vagy képlet, vagy grafikon leolvasásával állapító meg az erő értéke. Műanyagok esetében nem áll rendelkezésre ilyen jellegű táblázat, és a forgácsoló erőhöz kapcsolódó kutatások sem kiterjedtek. A (II.1.) képlet „ k_c ” anyagjellemzőjére sincsenek elfogadott értékek. A másik csoport a közvetlen erő, vagy teljesítménymérés. Mivel a műanyagok forgácsolásához a fémekhez viszonyítva kisebb erő szükséges, ezért a szerszám gép teljesítményfelvételéből nehéz visszaszámolni. A közvetlen erőmérés vagy a munkadarab befogásába (marásnál általában a gép asztala és a satu közé), vagy a szerszámtartóba (esztergálás vagy vésés kísérletek esetén ez a gyakoribb) épített érzékelő segítségével történik. Chen és társai [39] cikkükben jól felépített forgácsolóerő-mérő szenzor kalibrálásával foglalkoznak. A mérő felépítése jó kiindulópont a saját mérés megtervezéséhez. Az irodalomkutatás során jól megfigyelhető, hogy leggyakrabban két-három irányba mérő piezoelektromos erőmérő szenzort alkalmaznak a mérések lebonyolításához.[18][19][21][22][34][40]. A piezoelektromos mérőberendezések elve, hogy egyes anyagok (pl. kvarc) mechanikus feszültség hatására elektromosan polarizálódnak. A felületükön elektromos töltés többlet alakul ki, mivel a hexagonális rácsszerkezet deformálódik, és ennek hatására a töltések a III.3.a. ábrán látható módon szétválasztódnak. A mérés kiértékelése során ezt a töltésmennyiséget mérik, kapacitív úton. Fontos azonban megjegyezni, hogy a piezoelektromosság csak dinamikus, időben változó mennyiségek mérésére alkalmas, mivel a kerámia statikus alakváltozásakor létrejövő töltés-különbség kiegyenlítődik, ezért különleges erősítőket és adatgyűjtést kell alkalmazni.



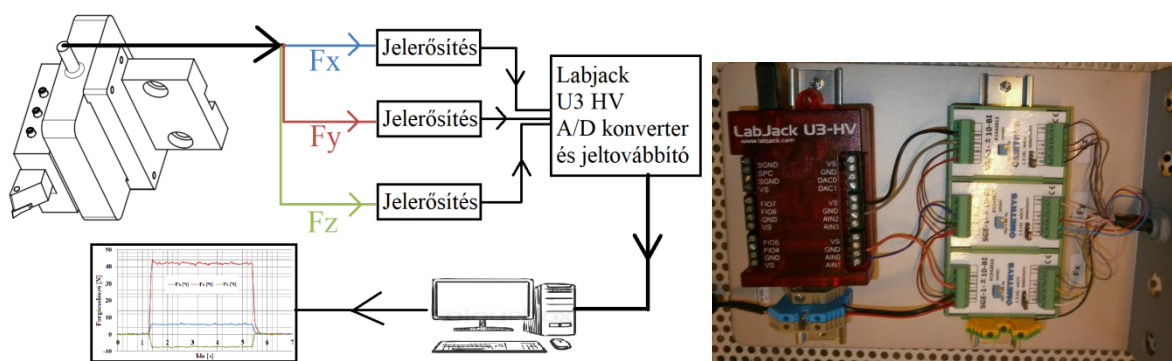
III.3.a. ábra. A piezoelektromos mérés elve [80]

Az erőméréshez használt eszköz felépítését mutatja be a III.3.b. ábra. A kereskedelmi forgalomban kapható ME-systeme K3D120 (2) (max. 1kN) három irányban mérő piezoelektromos erőmérő rögzítéséért a revolverfejhez illeszkedő adapter (1) felel. A szenzor másik feléhez egy speciálisan ehhez a feladathoz tervezett 20x20mm-es eszterga késszár (4) befogására alkalmas szerszámtartót (3) rögzítettem.



III.3.b. ábra. A forgácsolóerő mérése

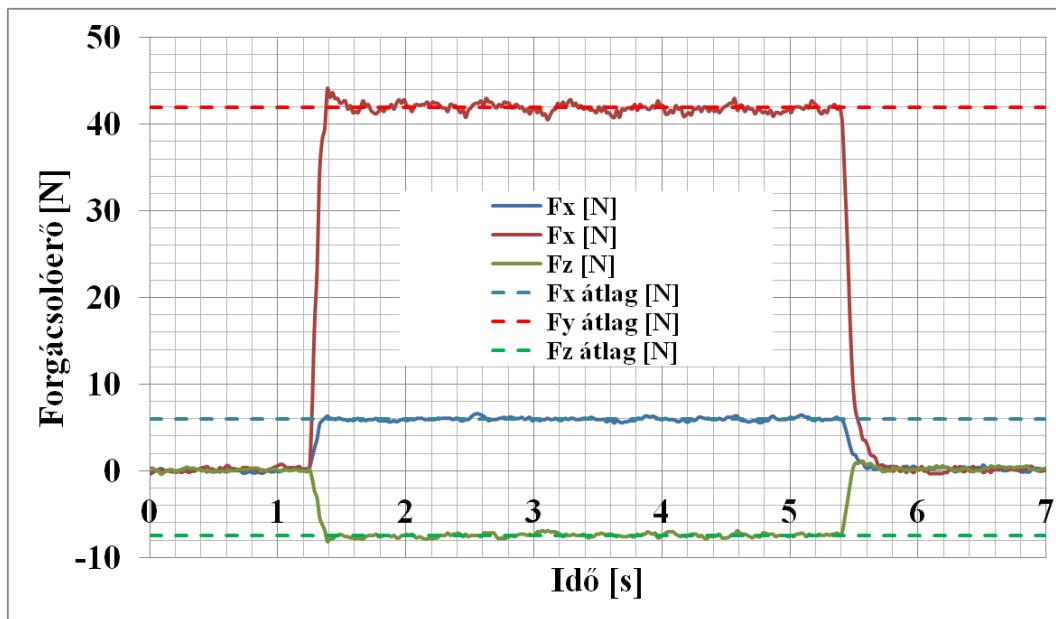
A III.4. ábrán látható mérőkör tervezését, építését és a kalibrálást az Ometrys Kft. végezte. A mérőcella három irányba mér, analóg jeleit külön-külön erősítés után egy többsatornás Labjack U3 HV USB-vel szerelt A/D konverterrel dolgoztam fel. A kalibrálást magával a konverterrel lehet végrehajtani, ami a mérési adatokat egy saját fájlba regisztrálja.



III.4. ábra. Az erőmérő kör felépítése

A mérés során kapott adatokat Microsoft Excel-be importálva a III.5.ábrán látható grafikon adódik. Az eredmények kiértékelése során a forgácsolás előtti és utáni részt, illetve az erő felfutását és lefutást figyelmen kívül hagytam. A később felhasznált érték a konstans rész átlaga. Az adatok kiértékelése során, a jobb láthatóság miatt az Fz eltolás irányú erő negatív előjellel szerepel a grafikonokon. A forgácsolóerőt befolyásoló tényezők elemzésénél legtöbbször az eredő erőt vizsgálom, amit a (III.1.) képlet alapján határoztam meg.

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (\text{III.1})$$



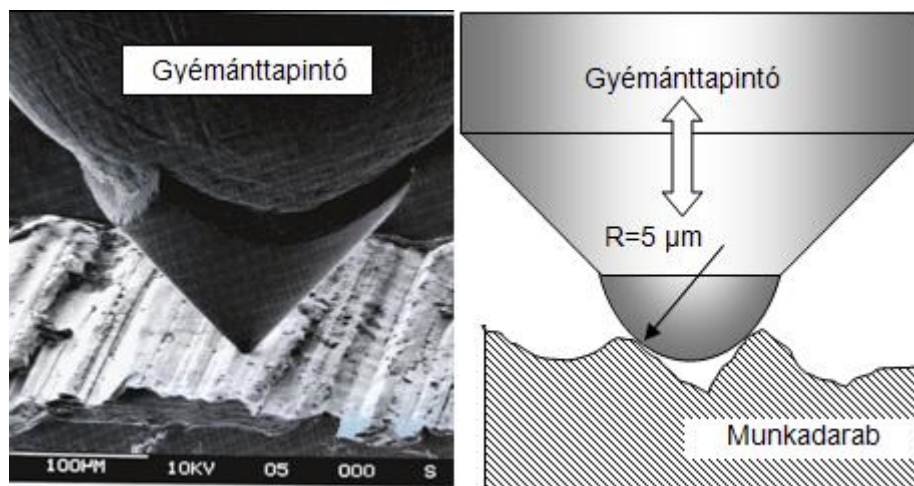
III.5. ábra. Az erőmérési adatok importálása utáni grafikon

III.5. A felületi érdesség mérése és kiértékelése

A felületi érdesség mérésénél is két módszert különböztethetünk meg. Az érintés nélküli, optikai vizsgálatok során egy nagyfelbontási mikroszkóppal szkenneljük be a próbatest felületét, majd ezt a geometriát elemezzük számítógépes szoftver segítségével. Ezeket a technikákat Dutta et al. [52] munkájukban ismertetik, és rendkívül részletesen bemutatják, elemzik. A gyakorlati tapasztalat, és az előzetes tesztek azonban azt mutatják, hogy fém, vagy sötétebb színű műanyagok esetén a technológia nagyon jól működik. Natúr (fehéres áttetsző) színű műanyag próbatestek esetén viszont a módszer nem ad megbízható eredményt, szórása rendkívül nagy. Szintén érintésmentes eljárás a lézer segítségével történő érdesség mérés. Ilyen például a Schmitt Industries Lasercheck sorozata. A lézerfény szóródásán alapuló technológiát használja az érintésmentes felületi érdesség mérésére. A rendszer rendkívül gyors és a mikronnál is pontosabb mérést tesz lehetővé, de a mérések elvégzésekor nem volt lehetőség ilyen berendezés használatára.[77] Optikai módszerek közé sorolható még az ún. fénymetszés eljárás. A módszer során két mikroszkópot használunk. A vetítőmikroszkóp segítségével egy vékony fénynyalábot a vizsgált felületre vetítünk, a másik figyelő mikroszkóppal vizsgáljuk a felület profilját. Mindkét mikroszkóp tengelye 45°-os szöget zár be a vizsgált felülettel és a két mikroszkóp tengelyének metszéspontja egybeesik az objektívek tárgypontjával.

A másik lehetséges módszer az érintéses felületi érdesség mérés. Ilyenkor általában gyémánt végű szerszám meghatározott sebességgel halad végig a felületen. Ahogy a III. 6. ábrán is látható, a kisebb érdesség völgyeket, karcokat nem lehet detektálni, gyakorlati szempontból a gyémánttapintó rendkívül kis sugara miatt elfogadható eredmény kapható. A mérési módszer, mérési hossz, valamint a kiértékelés az ISO 4286 és ISO 4287 szabvány szerinti. A mérés során a mérőberendezés összetartozó, x-z koordinátákat rögzít. Az x jelenti a mérőtüske húzás irányába történő elmozdulását, a z pedig a függőleges irányú elmozdulást. Ezek a pontpárok határozzák meg a a vizsgált felület profilját.

Ez a szűretlen profil, vagy P profil, amit szokás tovább bontani hullámossági W profilra, és R érdességi profilra. A gépi kiértékelés során ez a szétbontás a méréssel egy időben történik, ún. konvolúciós szűrőkkel, melyek szabványban meghatározott módon a mérési pont közelében adott súlyfüggvény szerint átlagolják az értékeket. A konvolúciós szűrők a mérési pont körül egy λ_c (a szakirodalomban cut-offnak nevezik) paraméter szerint átlagolnak, melynek értékét az ISO 4288 szabvány tartalmazza, értéke főleg a profil periodikusságának gyakoriságától függ, amely esztergálás során könnyen belátható, hogy az alkotó mentén a fordulatonkénti előtolással egyezik meg.



III.6. ábra. A mechanikai, vagy érintéses felületi érdesség mérés[79]

A mérőeszköz kiválasztásánál szintén fontos szempontnak tartottam az iparihoz hasonló környezetet. A választást megkönnyítette, hogy az iparban nagyon gyakran alkalmazzák ezt a módszert, az EuropTec Kft.-nél is hosszú évek óta mérik így a felületi érdességet az elvárásoknak megfelelő pontossággal. A tapintó alatti Herz feszültség miatti alakváltozások okozhatnak hibát, de a kipróbált optikai eszközöknél ennél jóval nagyobb hibát tapasztaltam fehér színű műanyagok esetén. A felületi érdesség mérése esetünkben mechanikus letapintással történt; Mahr Perthometer S2 feldolgozóegységgel, Mahr PZK-250 előtolóművel, valamint 200.400-260 2 µm-es tüvel. A mérési hosszt a szabvány tartalmazza, átlagosan 17,5 mm-nek tekinthetjük. A kiértékelés során a forgácsolt átmérőn 10 mérést elvégezve állapítottam meg a felületi érdesség mértékét. A 10 mérésből a legnagyobbat, valamint a legkisebbet elhagytam, a többi adatból képeztem az átlagot, valamint a szórást. Az átlagot a mérőberendezés felbontásának megfelelően kerekítettem.

A mérések során az Rz és Ra érdességi jellemzőket vizsgáltam, mivel az ipari gyakorlatban ez a két mérőszám fordul elő legtöbbször. A korábban definiált λ_c értéket $f=0,13\text{mm/fordulatig}$ 0,25-nek efelett 0,8-nak állítottam be.

A választott előtolásokkal ennél nagyobb vagy kisebb értékekre nem volt szükség. Egy PET próbatest mérését láthatjuk a III.7. ábrán, a mérési adatokat a III.4. táblázat tartalmazza.



III.7. ábra. A felületi érdesség mérése

Próbatest	1		2		3		4		5	
Előtolás	0,05		0,1		0,15		0,2		0,25	
Mérés	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0,41	2,53	1,61	7,21	3,71	15,40	6,91	29,80	11,71	46,70
2	0,40	2,61	1,62	7,25	3,72	15,60	6,93	29,70	11,70	47,70
3	0,40	2,53	1,60	7,28	3,73	15,40	6,94	29,80	11,57	50,00
4	0,40	2,45	1,61	7,38	3,71	14,90	6,93	29,80	11,70	52,30
5	0,32	2,55	1,61	7,17	3,71	15,40	6,95	29,40	11,72	48,10
6	0,40	2,56	1,62	7,33	3,73	15,40	6,94	29,60	11,63	49,40
7	0,41	2,64	1,61	7,37	3,72	15,30	6,93	29,10	11,77	47,00
8	0,40	2,54	1,61	7,29	3,74	15,46	6,87	30,10	11,84	48,90
9	0,41	2,64	1,62	7,46	3,73	15,50	6,90	29,70	11,85	49,30
10	0,41	2,76	1,60	7,29	3,74	15,60	6,94	30,30	11,59	50,30
Min	0,32	2,45	1,60	7,17	3,71	14,90	6,87	29,10	11,57	46,70
Max	0,41	2,76	1,62	7,46	3,74	15,60	6,95	30,30	11,85	52,30
Átlag	0,4	2,6	1,6	7,3	3,7	15,4	6,9	29,7	11,7	48,8
Szórás	0,03	0,08	0,01	0,08	0,01	0,19	0,02	0,32	0,09	1,60
Szórás %	6,36	3,14	0,42	1,11	0,27	1,22	0,33	1,06	0,77	3,28

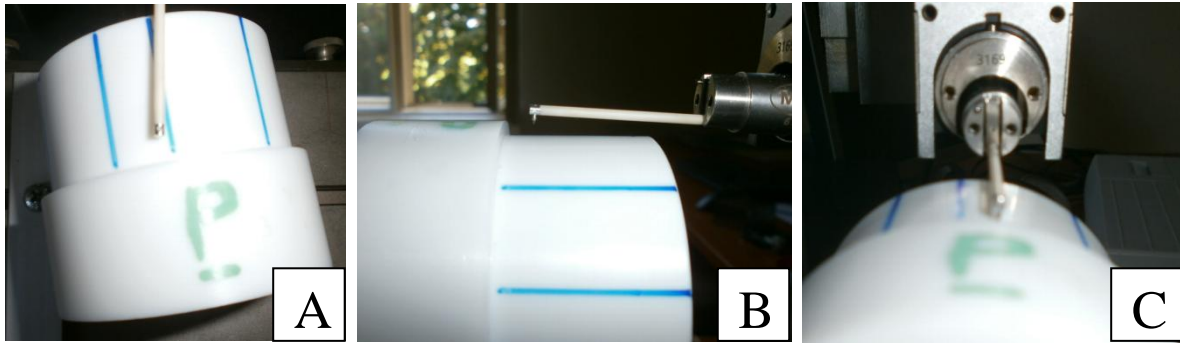
III.4. táblázat. A felületi érdesség kiértékelése

Az érdességmérés hibalehetőségei

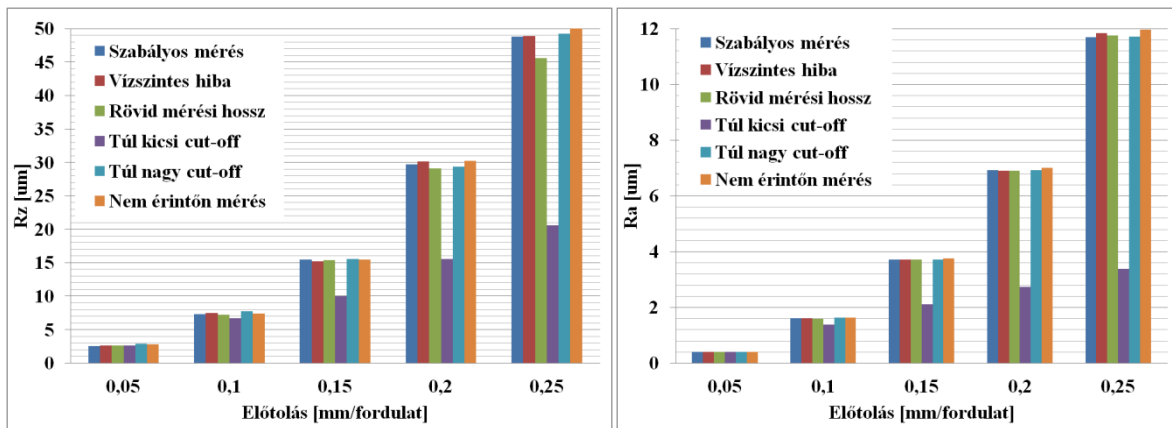
A felületi érdesség mérése során minden esetben húrirányban mértem. A tapintó illetve a munkadarab geometriája kizárta, hogy ésszerű munkadarab befogás mellett a tapintó oldalával mérjek, azonban érdemes megvizsgálni, hogy a nem megfelelő munkadarab elhelyezés milyen hatással van a mérési eredményre.

A fejezet során az alábbi hibalehetőségeket elemeztem, a hiba megjelenése a III. 8. ábrán, a hiba hatása a mért eredményre a III.9. ábrán látható.

- A munkadarab érintője és a mérési irány az X és Z irány által meghatározott síkban szöget zár be (III.8.B ábra). A hiba reprodukálásakor $2\pm 1^\circ$ -os szöget állítottam be a mérőfej és a darab alkotója között. Mivel a készülék a hullámosságot kompenzálja, ezért a hiba hatása rendkívül csekély, gyakorlatilag a szórással összevethető.
- A munkadarab érintője és a mérési irány az X irány és a Z-re merőleges által meghatározott síkban $5\pm 1^\circ$ -os szöget zár be (III.8.A ábra). Ilyenkor gyakorlatilag egy domború felületen mérünk, ami az előző hibához hasonlóan a hullámosság kivonásával kiküszöbölhető. A gyakorlatban azonban nagyon kis szöghiba esetén is a mérőkészülék a mérési határra jut, a mérést hibaüzenettel megszakítja, így hatását nem tudtam vizsgálni.
- A mérési hossz rövidebb, mint a szabványban előírt. A III.9. ábrán látható, hogy 0,25 mm/fordulatos előtolásnál látható eltérés, de alacsonyabb előtolásnál a hiba hatása minimális.
- Túl kis λ_c érték választása (a vizsgált esetben $\lambda_c = 0,16$). A vizsgált hiba okok közül ennek a hatása a legnagyobb, a készülék így jóval finomabb felületet mér, mint a valós, ez jól látszik a III.9. ábrán is.
- Túl nagy λ_c érték választása (a vizsgált esetben $\lambda_c = 1,4$). Az előző hibával ellentétben hatása szinte minimális, így bizonytalan esetben érdemes lehet nagyobb λ_c értéket választani.
- Párhuzamos mérés, de nem az érintőn, hanem egy mélyebben fekvő alkotón (a vizsgált esetben 6mm-re tőle.) Mivel a tapintó oldalával ésszerű beállítás és darab megfogás mellett nem lehet mérni, így a hiba hatása minimális.



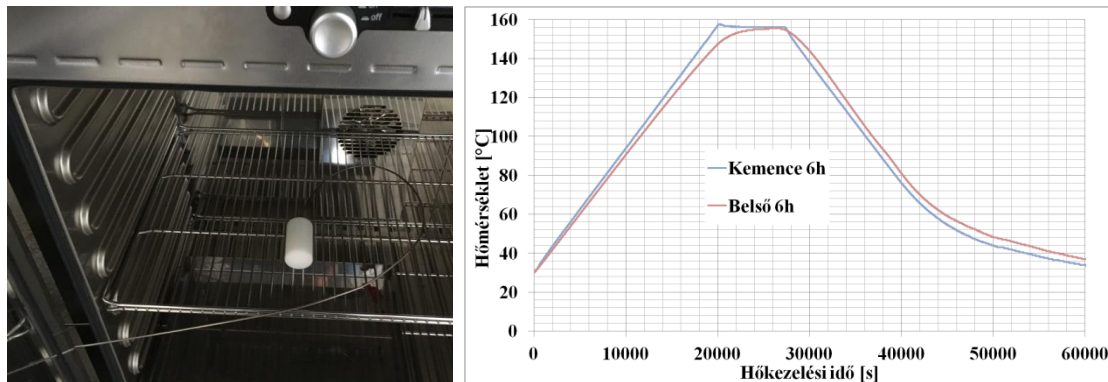
III.8. ábra. A szándékosan előidézett mérési hibák



III.9. ábra. A hibák hatása a felületi érdességre

III.6. A hőkezelés vizsgálata

A hőkezeléshez köthető vizsgálatok során a falvastagság, valamint a felfűtési/hűtési sebesség hatásait vizsgáltam. A cél annak a sebességnek a meghatározása, ahol a különbség a legmelegebb és leghidegebb pont között a szakirodalmakban [5] előírt $\pm 3^\circ\text{C}$ -os határon belül marad. A vizsgálatok során 20, 30, 40, 50, 60 mm átmérőjű, 60 mm hosszúságú POM próbatesteket használtam fel. Központjukban 30 mm mélységű 3mm-es átmérőjű furatot fúrtam a T-típusú hőelem férőhelyeként. Az adatokat EL-USB-TC (sorozatszám: 24371) USB-s adatregiszter egységgel gyűjtöttem 10 másodperces mintavételezési idővel. A mérési eredményekkel más teendő nem volt, az adatregiszter közvetlenül Microsoft Excel-be exportálja a mért értékeket. A próbatesteket évente kalibrált Memmert UNP 700 típusú univerzális kemencével hevítettem, illetve hűtöttem. A kemence vezérlése lehetővé tette a $\pm 0,5^\circ\text{C}$ -os szabályozási pontosságot, szabályozott fűtéssel illetve hűtéssel. A mérési elrendezést, illetve egy mérési görbét mutat be a III.10. ábra.



III.10. ábra. A mérési elrendezés és a $20^\circ\text{C}/\text{óra}$ fűtéshez tartozó görbe

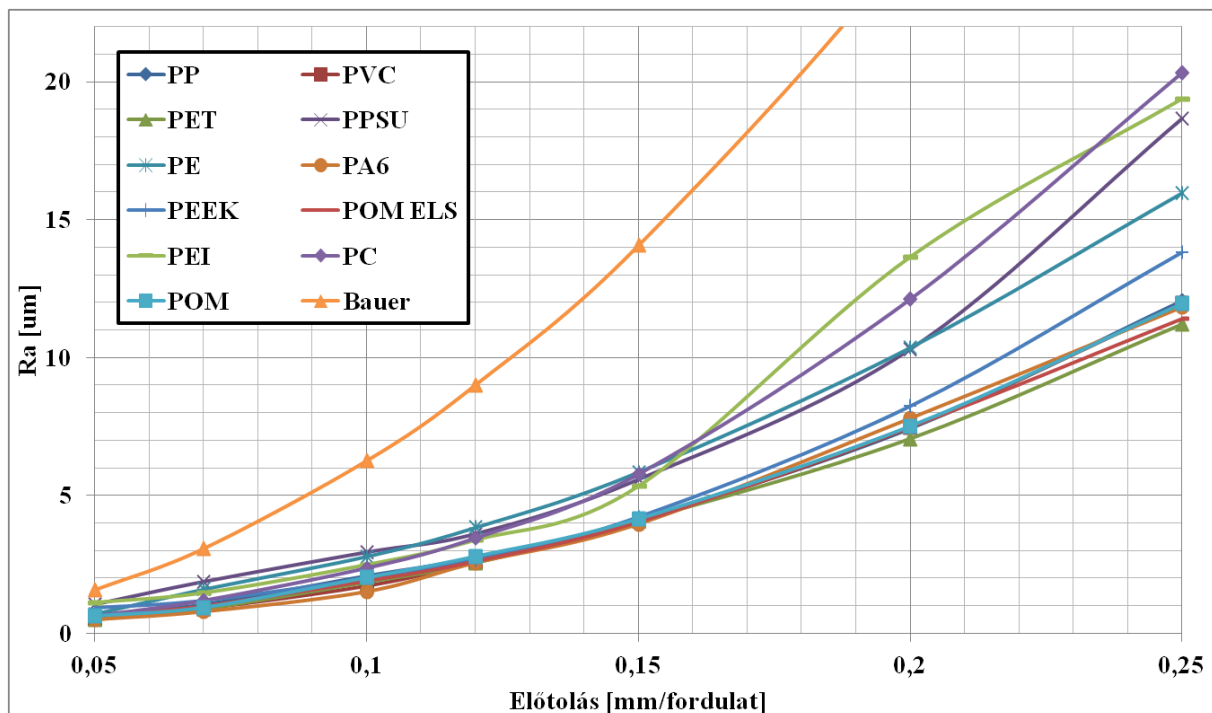
IV. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

IV.1. Az előtolás változtatása

A kísérletek során először a forgácsolási paraméterek változásának a felületi minőségre, és a forgácsoló erőre gyakorolt hatását vizsgáltam. A mérések során a szerszámozási és környezeti paramétereket változatlanul hagytam. A felhasznált eszközöket bemutató fejezet III.2. táblázatában található jelölésére hivatkozva a forgácsolást az „A” jelű, új lapkával, hűtőemulzió használatával végeztem. Az első vizsgált paraméter a fordulatonkénti előtolás. Az előtolás növelésével az irodalomkutatás, valamint a gyakorlati tapasztalat alapján az várható, hogy a forgácsolt felület érdessége, valamint a forgácsolóerő értéke is növekszik. A vizsgálatok során a vágósebesség és a fogásvétel állandó ($v_c=250\text{m/perc}$, $a=2\text{mm}$), a fordulatonkénti előtolás értékeknek pedig a következőket választottam:

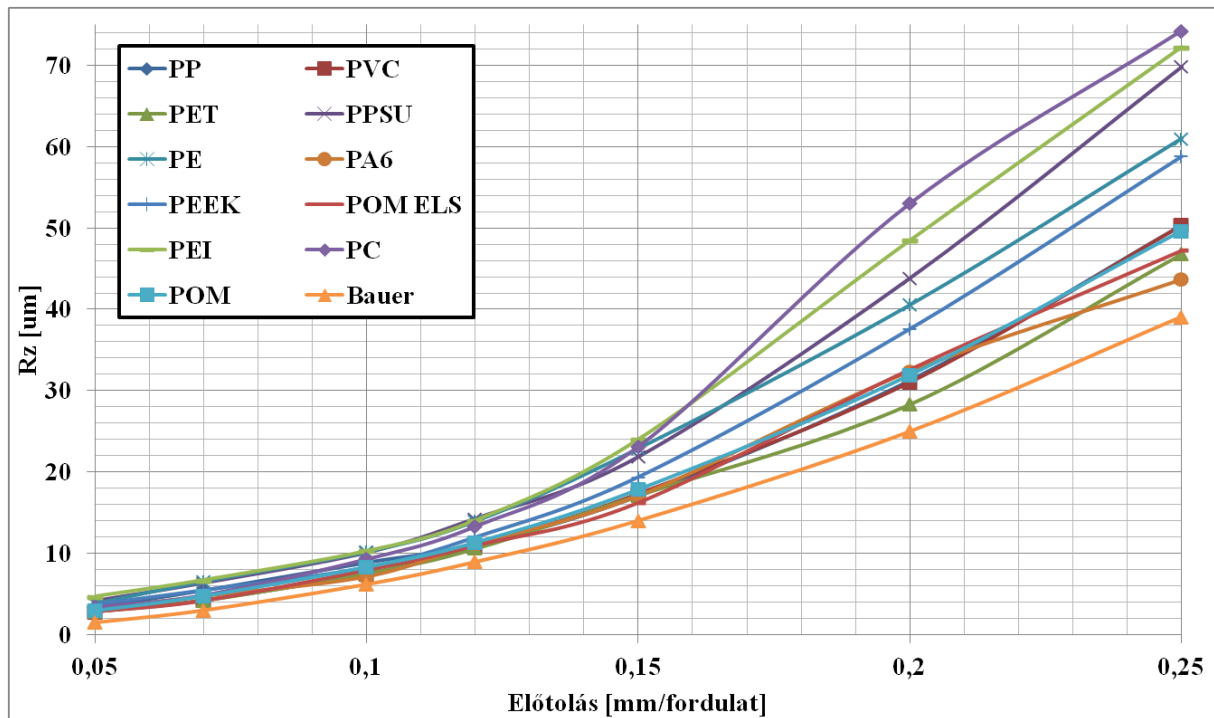
0,05 0,07 0,1 0,12 0,15 0,2 0,25 [mm/fordulat]

A felületi érdesség vizsgálata során az Ra és Rz értékeket mértem, e két paramétert az előtolás függvényében mutatja be az IV.1. és az IV.2. ábra.



IV.1. ábra. Az átlagos felületi érdesség változása a fordulatonkénti előtolás növelésével

A felületi érdességet leíró Bauer összefüggést is megjelenítettem az ábrákon. Mivel ez az elméleti érdességet írja le, az Rz paraméterekhez közelebb esik az értéke. A IV.2. ábrán jól megfigyelhető, hogy a függvények alakja, másodfokú polinom hasonlít a Bauer összefüggésben foglaltakra, de a képlet a valós felületi érdességnél kisebb értéket ad. A mért értékekből látszik, hogy az egyes műanyagok az azonos paraméterek ellenére különböző érdességi értéket adnak, például 0,25 mm/fordulat esetén PET-nél $Rz=46,8\mu\text{m}$, míg PC-nél $Rz=74,2\mu\text{m}$ érdességet mérhetünk, ami nem elhanyagolható 58,5%-os különbséget jelent. Az előtolás növelésével az anyagok közötti különbség egyre szignifikánsabb.

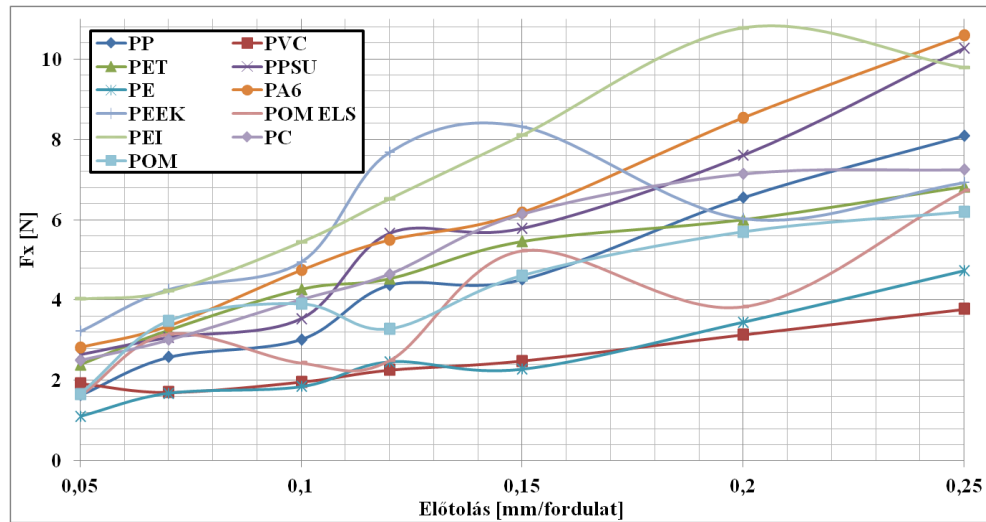


IV.2. ábra. Az egyenetlenség magasság változása a fordulatonkénti előtolás növelésével

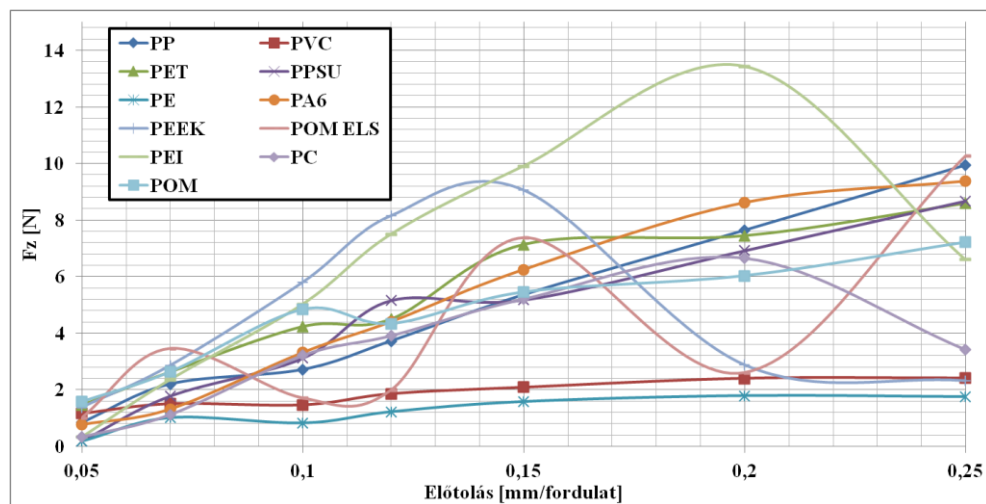
Mindkét ábrából világosan látszik, hogy az előtolás növelésével a felületi érdesség minden műanyagtípusnál nagymértékben nő, például PP esetén az előtolást 0,05 mm/fordulatról 0,25 mm/fordulatra növelve az Rz paraméter $3,5\mu\text{m}$ -ról $50,4\mu\text{m}$ -re emelkedik, ami 1685%-os növekedést jelent.

A IV.3 - IV.6. ábrákon a forgácsolóerő változása figyelhető meg. A várható trend, miszerint a forgácsolóerő az előtolás növelésével egyenes arányban nő mindhárom erőkomponensnél jól látszik. A felületi érdességnél is tapasztalt, műanyagoként eltérő viselkedés itt is jelentkezik, tehát kijelenthető, hogy a különböző típusú műanyagokat nem lehet összevonva, egy csoportba sorolni. Jó példa erre, hogy 0,25 mm/fordulat előtolásnál PVC esetén kb. 21N-t mértem, míg PA6 esetén ennek az értéknek több mint a háromszorosát, 68,4N-t. Az előtolás változására mutatott viselkedés is eltér. A korábban említett két műanyag esetén az előtolás 0,05 mm/fordulatról 0,25 mm/fordulatra emelésekor PVC esetén 52%-os, míg PA6 esetén 237%-os növekedést állapítottam meg. A forgácsolóerő mérésekor a berendezés lehetővé tette, hogy a forgácsolóerő mindhárom komponensét vizsgáljam.

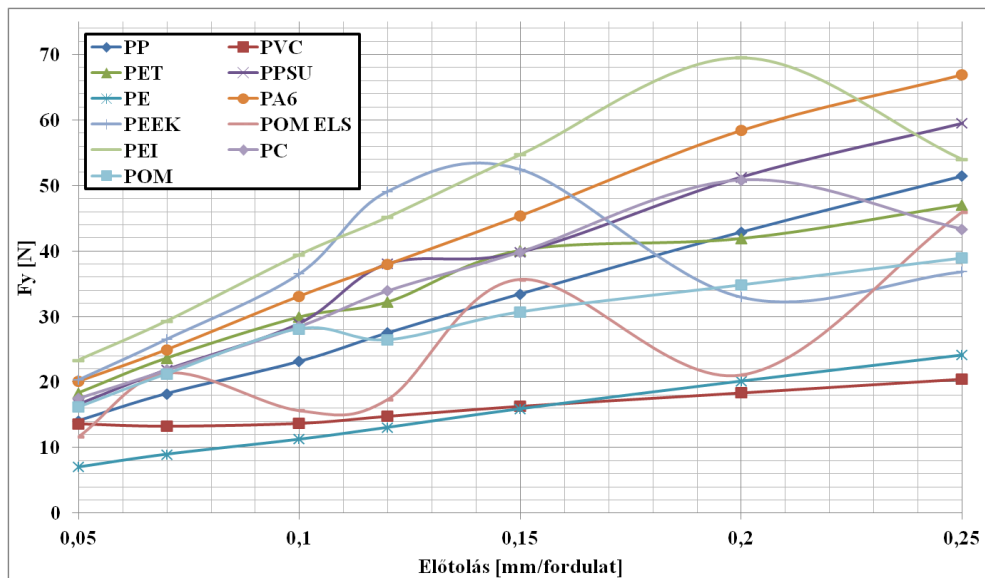
A három erőkomponens esetén világosan látszik, hogy az F_y főforgácsoló erő a legmagasabb, a IV.6. ábrán szereplő eredő erő is döntően ehhez korrelál. Mindhárom erőkomponens nő az előtolás növelésével.



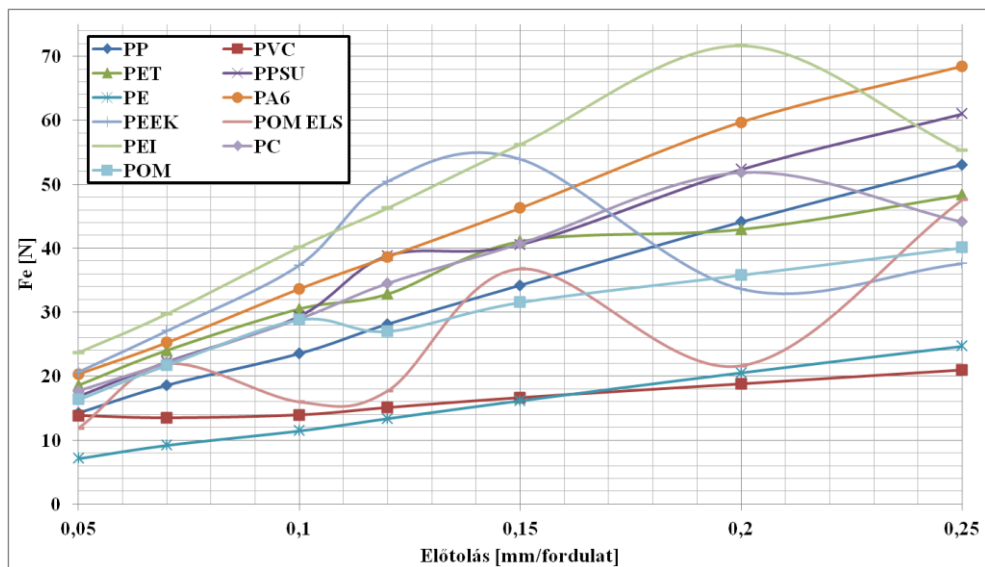
IV.3. ábra. A forgácsoló erő passzív komponensének változása növekvő előtolás esetén



IV.4. ábra. A forgácsoló erő előtolás irányú komponensének változása növekvő előtolás esetén

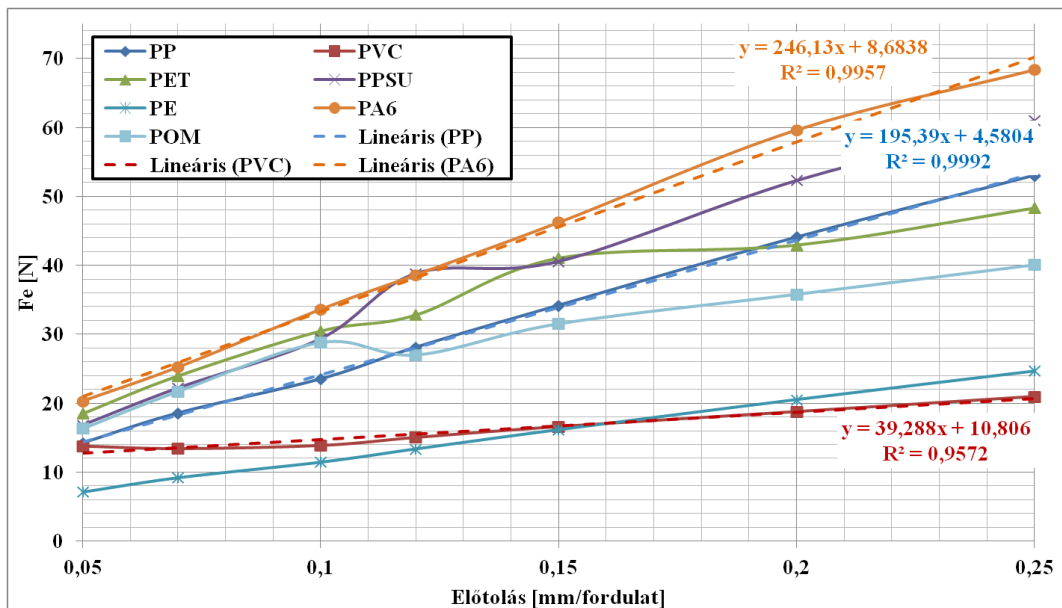


IV.5. ábra. A főforgácsoló erő változása növekvő előtolás esetén



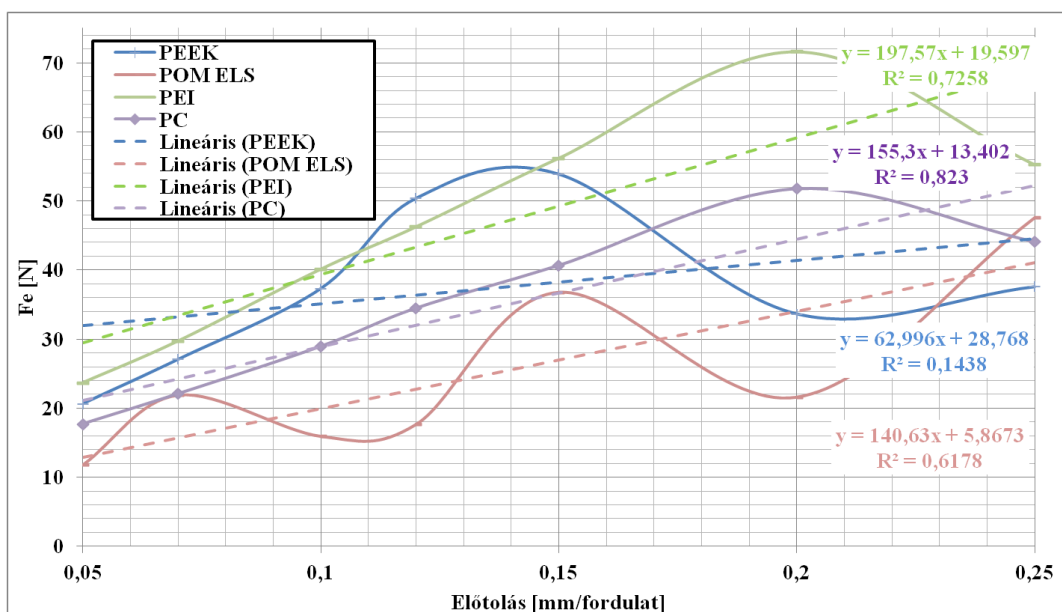
IV.6. ábra. Az eredő erő változása növekvő előtolás esetén

A IV.3-6. ábrákat tanulmányozva jól látszik, hogy a vizsgált műanyagok két alapvető csoportba sorolhatók. Az IV.7. ábrán feltüntetett, az első csoportba tartozó anyagok (PP, PET, PVC, PPSU, PA6, PE, POM) esetén az előtolás növelésével a forgácsolóerő lineárisan nő, a lineáris közelítő függvényre rendkívül jól illeszkedik.



IV.7. ábra. A lineáris erőnövekményt mutató műanyagok

A IV.8. ábrán található a másik csoportba sorolt műanyagok. Az előtolás növelésére adott válaszfüggvény nem lineáris. Ha ezekre az adatsorokra lineáris függvényt illeszttek, a tapasztalati korrelációs együttható négyzete ugyan 0,6-nál több, a műszaki gyakorlatban elvárt 0,64-as értékhez közeli, itt mégsem beszélhetünk lineáris illeszkedésről, de a közelítő lineárist tekintve belátható, hogy az előtolás növelésével a forgácsoló erő egyenes arányban nő. Kivételnek tekinthető a PEEK, ahol rendkívül rossz, $R^2 < 0,2$ érték adódik, így itt semmilyen elfogadható korrelációt nem állapítottam meg az előtolás és a forgácsolóerő között.



IV.8. ábra. A lineáris függvényre kevésbé illeszkedő műanyagok

Az előtoláshoz köthető felületi érdesség és forgácsolóerő változásokat foglalja össze a IV.1. táblázat. Mivel a forgácsolási paraméterek számszerű adatok, azért bevezetésre került a fajlagos változás. Ebben az esetben a teljes változás és az előtolás változásának hányadosát írom fel. A vizsgálatok során az előtolást 0,05 mm/fordulatról 0,25 mm/fordulatra emeltem, ami 400%-os növelést jelent. Az IV. 1. táblázat adataiból látszik, hogy a legnagyobb felületi érdesség növekedést a PC esetén, a legkisebb értéknél viszont nem egyértelmű a helyzet. Az egyenetlenség magasság (Rz) esetén a PA6, míg az átlagos felületi érdesség (Ra) esetén a PEEK műanyagoknál tapasztalható a legkisebb változás. A forgácsolóerőnél a legkisebb változás a PVC-nél, míg a legnagyobbat a POM ELS esetén tapasztalható. Ahogy korábban már említettem a különböző műanyagok eltérően viselkednek, ha azonban az átlagot vizsgáljuk, elmondható, hogy a felületi érdesség közel 15-szörösére, a forgácsolóerő pedig másfélszeresére növekedett az előtolás 0,05 mm/fordulatról 0,25 mm/fordulatra emelésével.

	Ra vált. %	Ra vált. fajlagos	Rz vált. %	Rz vált fajlagos	Fe vált. %	Fe vált. fajlagos
PP	1793,73	4,48	1352,05	3,38	273,05	0,68
PVC	2108,85	5,27	1684,77	4,21	51,86	0,13
PET	2168,59	5,42	1506,35	3,77	160,60	0,40
PPSU	1681,28	4,20	1578,89	3,95	262,41	0,66
PE	2145,98	5,36	1462,10	3,66	245,94	0,61
PA6	2286,67	5,72	1279,64	3,20	236,72	0,59
PEEK	1419,79	3,55	1476,41	3,69	82,01	0,21
POM ELS	1743,50	4,36	1540,05	3,85	302,68	0,76
PEI	1632,73	4,08	1430,74	3,58	133,30	0,33
PC	3148,14	7,87	2042,44	5,11	148,96	0,37
POM	1813,27	4,53	1562,48	3,91	145,22	0,36
Min	1419,79	3,55	1279,64	3,20	51,86	0,13
Max	3148,14	7,87	2042,44	5,11	302,68	0,76
Átlag	1994,78	4,99	1537,81	3,84	185,70	0,46
Szórás	444,97	1,11	191,09	0,48	78,89	0,20

IV.1. táblázat. Az előtolás változtatásának hatása a felületi érdességre és a forgácsoló erőre

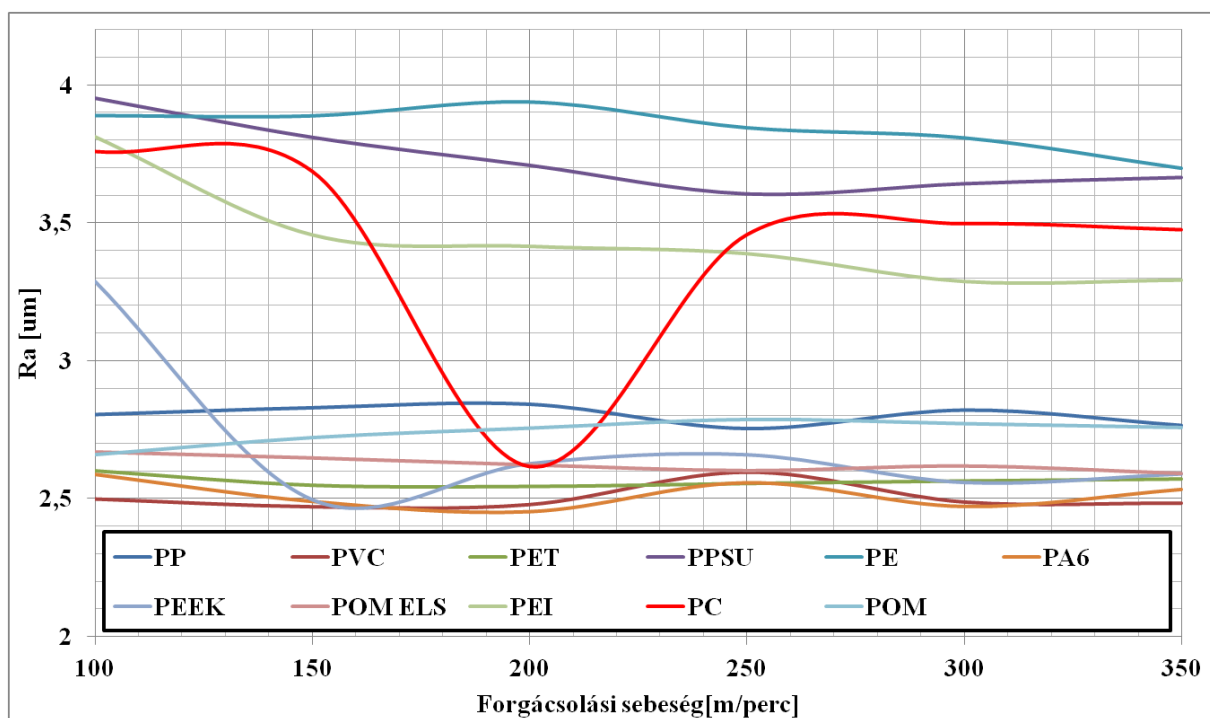
IV.2. A forgácsolási sebesség változtatása

A következő vizsgált paraméter a forgácsolási sebesség. Az irodalmakban különböző anyagok, különböző módszerrel való forgácsolását tanulmányozva nincs egyértelmű megállapítás arról, hogy a felületi érdességet, illetve a forgácsolóerőt hogy befolyásolja. Fémek esetén beszélhetünk egy minimális forgácsolási sebességből, ami felett az élrátét képződés megszűnik, manapság, a felgyorsult gyártási folyamatokban azonban inkább a felső határ érdekes. A minél nagyobb kihazatalú termékgyártás miatt a nagysebességű forgácsolások egyre elterjedtebbek. A felső határt a vizsgálatok során a beremegés, a rendszer nem kívánt lengése jelentette.

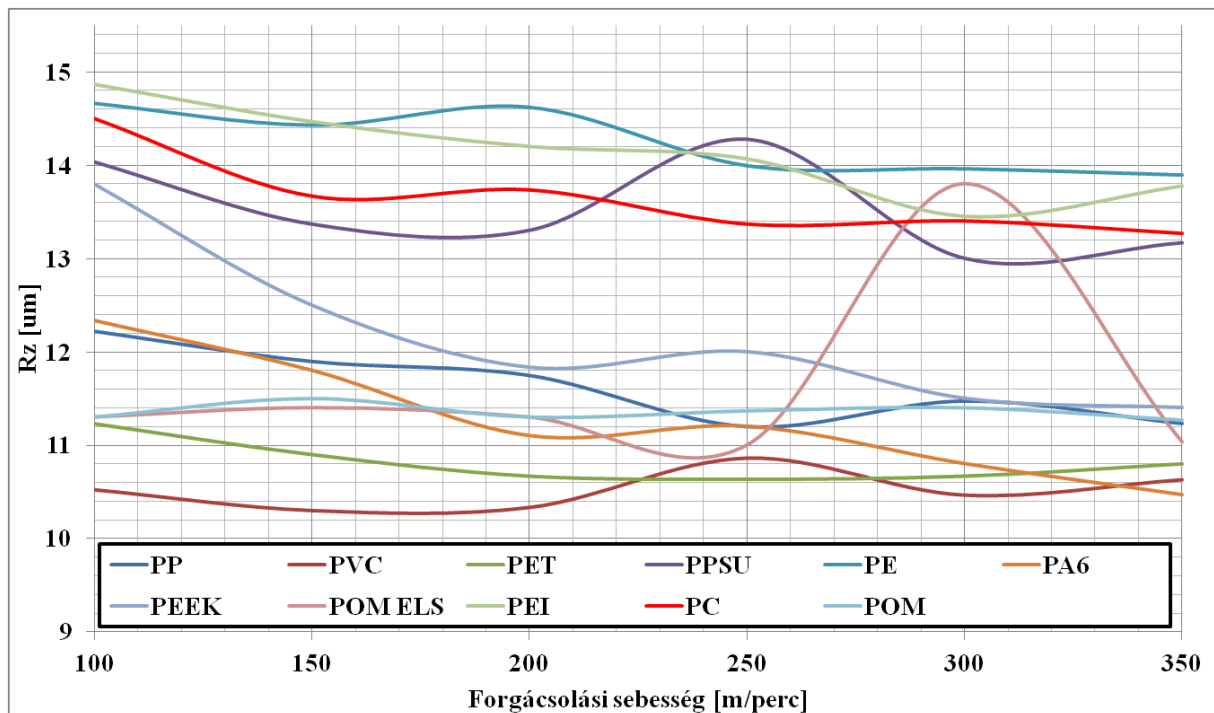
A beremegéssel, mint jelenséggel egy későbbi fejezetben foglalkozok részletesen. A beremegés általában rendkívül rossz felülettel, feltűnő hanghatással rosszabb esetben a szerszám vagy a munkadarab károsodásával járhat. A vizsgálatok során a fogásvétel ($a=2\text{mm}$) és az előtolás ($f=0,12\text{ mm/fordulat}$) állandó, a forgácsolási sebesség értékeinek a gyakorlati tapasztalatok alapján pedig a következőket választottam:

100 150 200 250 300 350 [m/perc]

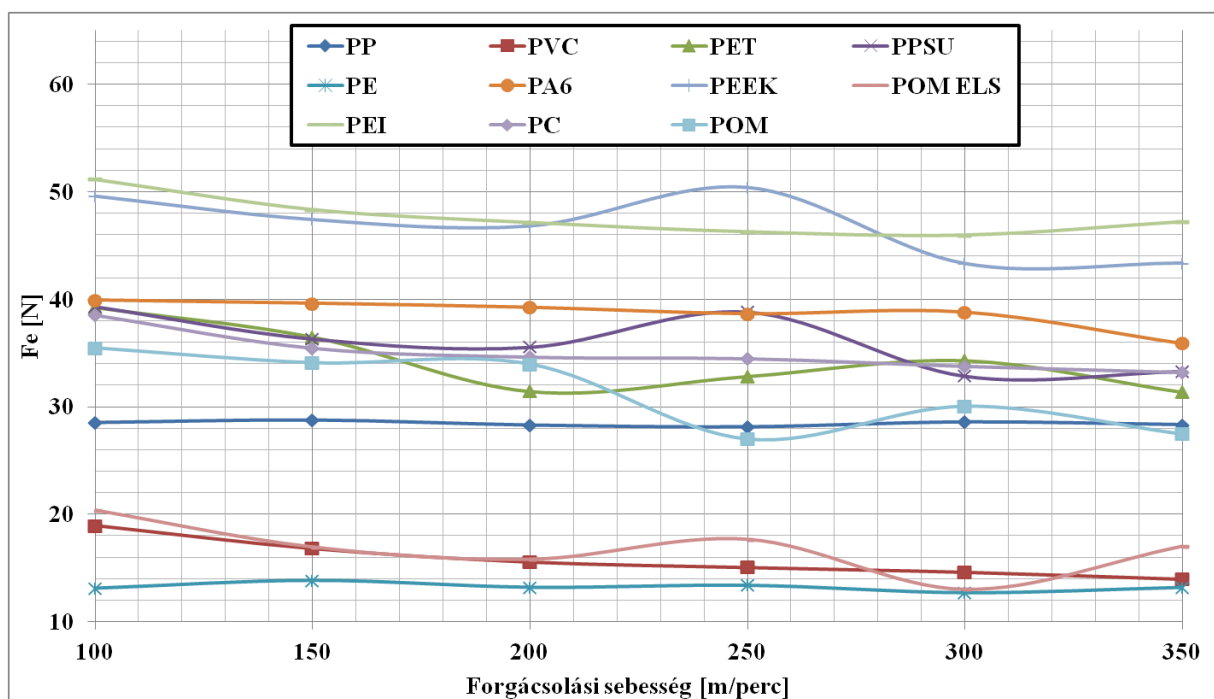
Az előtoláshoz kapcsolódó mérésekhez hasonlóan itt is kétféle felületi érdesség skálán vizsgáltam, amit a IV.9. és a IV.10. ábra mutat be. Mindkét ábrát tekintve jó közelítéssel elmondható, hogy a vágósebesség növelésével a felületi érdesség csökken, azonban figyelembe kell venni, hogy ez a változás kismértékű, pl. PP esetén pl. 9,2%. Az Ra skálát bemutató IV.9. ábrán a PEEK és PC anyagokat érdemes kiemelni. A többi anyagnál kismértékű ingadozás figyelhető meg, PC esetén egy lokális minimum, PEEK esetén pedig egy lokális maximum rajzolódik ki. Ez alapján kijelenthető, hogy PC esetén a 200 m/perc sebesség ideális, PEEK esetén pedig érdemes magasabb forgácsolási sebességet választani. Az eltérő értelmezésű Rz skálán, a IV.10. ábrán szintén két anyag emelhető ki. POM ELS esetén 300m/perc esetén egy lokális maximum tapasztalható. PPSU esetén kisebb mértékű, de szintén egy lokális maximum található 250 m/percnél.



IV.9. ábra. A vágósebesség változásának hatása az Ra skálán



IV.10. ábra. A vágósebesség változásának hatása az Rz skálán



IV.11. ábra. A forgácsolóerő különböző forgácsolási sebességeknél

A forgácsolóerő alakulása látható a fenti, IV.11. ábrán. Megállapítható, hogy a forgácsolási sebesség növelésével a felületi érdesség kismértékben csökken, vagy közel állandó értéken marad. Számszerűsített adatokat mutat be a IV.2. táblázat. A legnagyobb csökkenés POM ELS esetén tapasztalható. PP esetén viszont nincs számottevő változás.

Felületi érdességnél a késsel jelölt anyagoknál volt egy-egy lokális minimum vagy maximum érték, így ezekre az anyagokra érdemes nagyobb figyelmet fordítani a forgácsolási sebesség kiválasztásakor. A korábban megállapított tendencia, hogy a forgácsoló sebesség változásával a felületi érdesség kismértékben csökken, ingadózó jelleget mutat, összességében azonban nem jelent nagy változást. Az átlagokat nézve az érdesség kicsivel több, mint 10%-al, a forgácsolóerő pedig valamivel több, mint 20%-kal változik. A vágósebesség emelésével mindkettő enyhe csökkenéséről beszélhetünk, vagy a mért érték közel állandó értéken marad.

	Ra vált %	Ra vált fajlagos	Rz vált %	Rz vált fajlagos	Fe vált%	Fe vált fajlagos
PP	3,20	0,01	9,15	0,04	2,30	0,01
PVC	5,16	0,02	5,50	0,02	35,33	0,14
PET	2,28	0,01	5,64	0,02	25,05	0,10
PPSU	9,59	0,04	9,81	0,04	19,69	0,08
PE	6,49	0,03	5,52	0,02	8,63	0,03
PA6	5,43	0,02	17,83	0,07	11,16	0,04
PEEK	31,62	0,13	21,05	0,08	16,42	0,07
POM ELS	3,06	0,01	25,45	0,10	56,19	0,22
PEI	15,88	0,06	10,53	0,04	11,29	0,05
PC	43,68	0,17	9,30	0,04	16,10	0,06
POM	4,77	0,02	2,07	0,01	31,24	0,12
Min	2,28	0,01	2,07	0,01	2,30	0,01
Max	43,68	0,17	25,45	0,10	56,19	0,22
Átlag	11,93	0,05	11,08	0,04	21,22	0,08
Szórás	12,91	0,05	6,96	0,03	14,48	0,06

IV.2. táblázat. A forgácsolási sebesség változtatásának hatása a felületi érdességre és a forgácsolóerőre

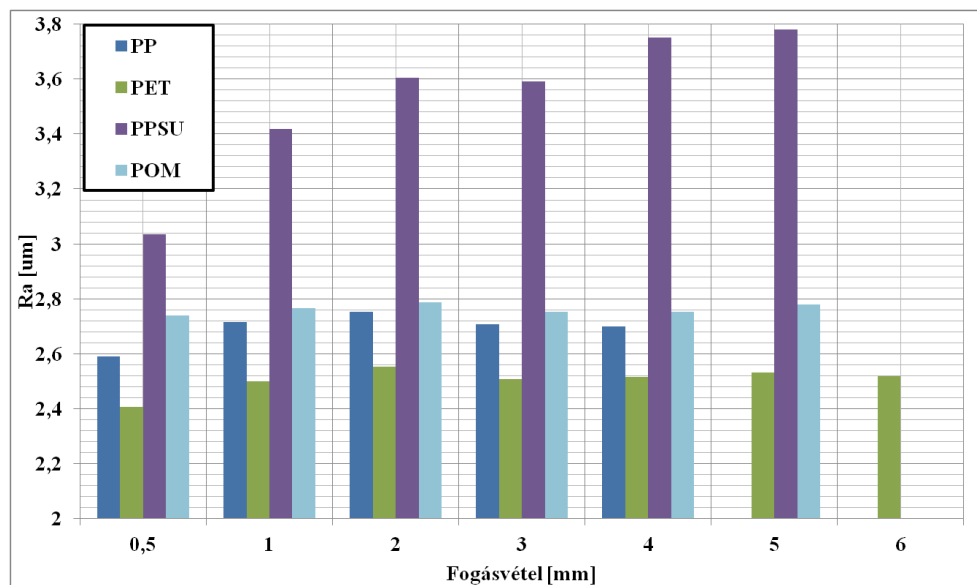
IV.3. A fogásvétel változtatása

Az utolsó vizsgált forgácsolási paraméter a sugárirányú fogásvétel. Az előzetes irodalomkutatás és a gyakorlati tapasztalatok alapján az várható, hogy a forgácsolóerő növekszik, a felületi érdesség változását azonban a kutatások nagy részében nem vizsgálták. Mivel a szerszám által forgácsolt felületi geometria elméletileg nem változik, (szerszámgeometria és az előtolás is egyenlő) nagy valószínűséggel a felületi érdesség értéke sem változik számottevően. A választott fogásvétel értékeknél az alsó határ megválasztásnál szintén a gazdaságossági és kihazatali szempontok játszottak szerepet, túl kis fogásvételekkel nem lesz gazdaságos a gyártás. A felső határt két kedvezőtlen folyamat határozza meg, a későbbiekben tárgyalt beremegés, valamint az elméleti alapoknál is tárgyalt túl nagymértékű kihajlás, és az abból következő alakhiba.

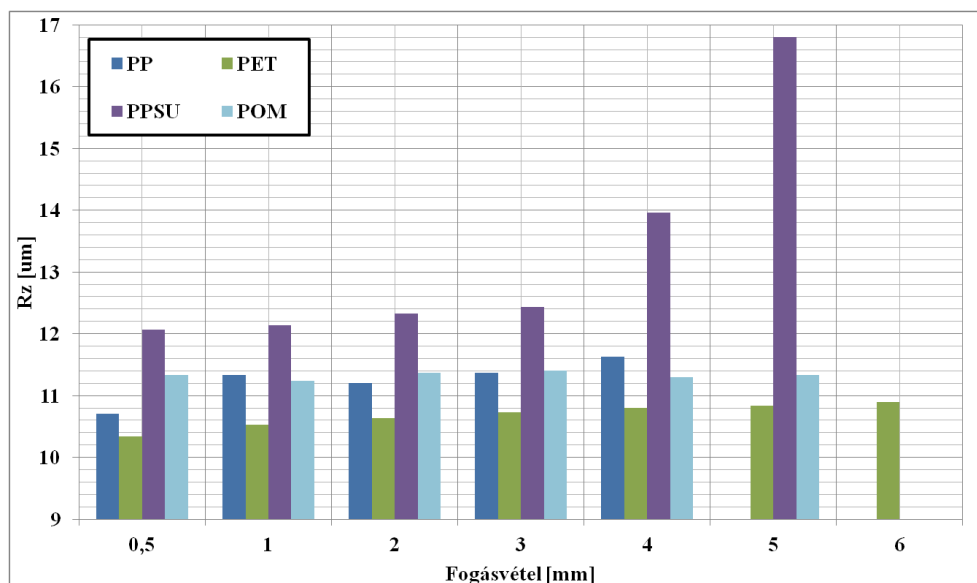
A vizsgálatok során a forgácsolási sebesség ($v_c=250$ m/perc) és az előtolás ($f=0,12$ mm/fordulat) állandó, a fogásvétel értékeinek pedig a következő értékeket választottam:

0,5 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0 7,0 [mm]

Érdeemes megjegyezni, hogy a 7,0 mm-es fogásvétel ugyan szerepel a szinteknél, a kiértékelésben azonban nem, mivel ekkora fogásnál az adott vágósebességgel a forgácsolási rendszer beremegett, hibás mérést eredményezve. A 6 mm-es fogásvételnél már tapasztalható volt a beremegetés, a forgácsolóerő még mérhető, a fogácsolt felület azonban annyira érdes, hogy a felületi érdesség mérő méréshatárán kívül esik.

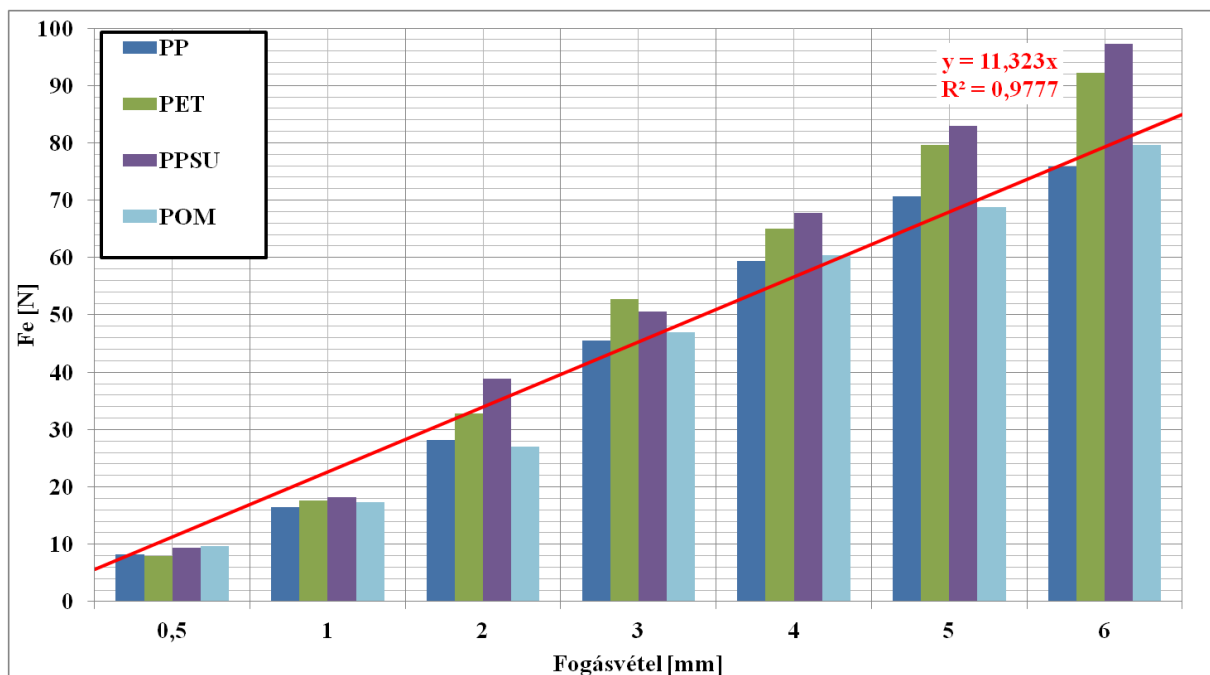


IV.12. ábra. Az Ra felületi érdesség alakulása különböző fogásvételek esetén



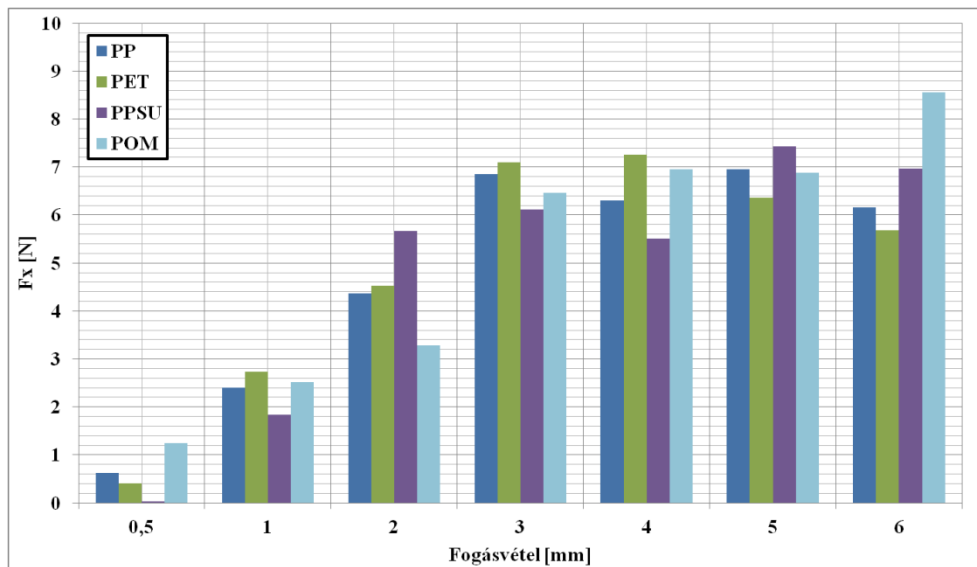
IV.13. ábra. Az Rz felületi érdesség alakulása különböző fogásvételek esetén

A felületi érdesség vizsgálatokor megállapítható, hogy mindkét skála, illetve minden anyag esetén közel azonos hatás figyelhető meg a IV.12. és IV.13. ábrán. Az egyes anyagok bizonyos fogásvételekhez nem tartozik adat, ami azt jelenti, hogy az adott mérési pontban a felület beremegett, mérése nem volt lehetséges. Kivehető egy kismértékű érdesség növekedés a fogásvétel növelésével, ami PPSU esetén határozottan jelentkezik, főleg 3 mm-es fogásvétel felett. A többi anyagnál viszont elmondható, hogy a fogásvételnek nincs számottevő hatása a felületi érdességre. Inkább úgy lehetne meghatározni, hogy egy felső határ felett a próbatest beremeg, ami rendkívül rossz felületet eredményez. Ez anyagtól függően 5 vagy 6 mm felett következik be. A forgácsolóerő esetén egyértelmű, a IV.14. ábrán is jól látható módon határozott növekedés állapítható meg. Az ábrába egy lineáris egyenest berajzolva ez az összefüggés jól látszik. Az erő értéke anyagonként eltér, de a tendencia minden anyagnál azonos.

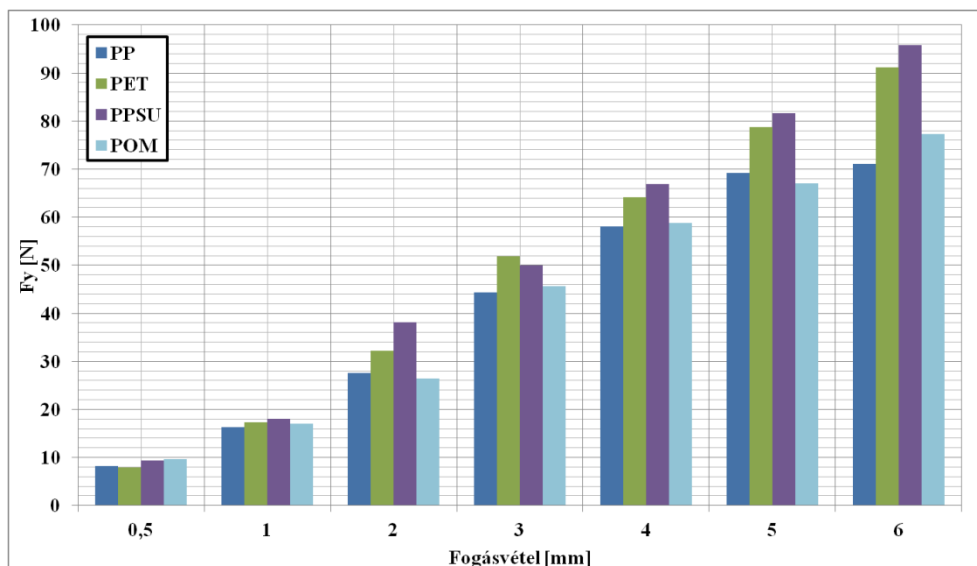


IV.14. ábra. Az eredő forgácsoló erő növekedése a fogásvétel növelésével

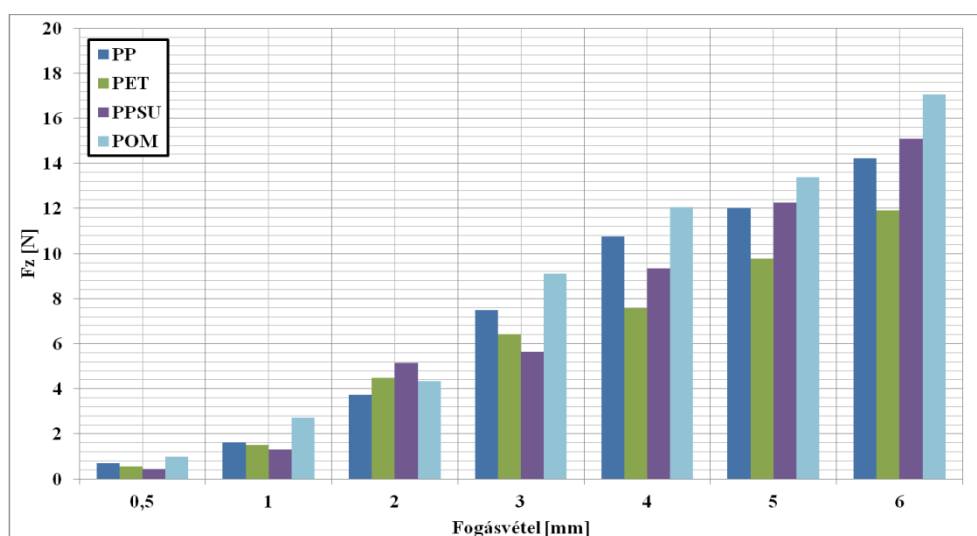
A forgácsolóerőt a továbbiakban érdemes összetevőkre bontva vizsgálni. A IV.15. ábrán az erő passzív komponense, a IV.16. ábrán a főforgácsoló erő, a IV.17. ábrán pedig az előtolás irányú erő szerepel. Mivel a IV.16. ábrán megjelenített főforgácsoló erő a legnagyobb erőkomponens, ennek alakja nagymértékben hasonlít az eredő erő alakjára. Jól látszik, hogy a legnagyobb erő érték a PPSU forgácsolásakor mérhető, a legkisebb erő pedig PP és POM esetén. A IV.17. ábrán található előtolás irányú erőt vizsgálva azonban feltűnik, hogy a POM-nál a legnagyobb ez az erő. Ezek alapján elmondható, hogy anyagonként az egyes forgácsolóerő komponensek aránya is eltér. A IV.15. ábrán található passzív erő esetén is más karakterisztika látható. Az előtolást növelve a passzív erő is nő, 2 mm felett jó közelítéssel kijelenthető, hogy értéke nem növekszik jelentősen, stagnál. Az anyagok közti különbségek itt nem annyira számottevőek, mint a főforgácsoló erő esetén.



IV.15. ábra. A passzív erő különböző fogásvételekkel



IV.16. ábra. A főforgácsoló erő különböző fogásvételekkel



IV.17. ábra. Az előtolás irányú erő különböző fogásvételekkel

A fogásvétel változtatásának eredményeit számszerűsíti a IV.3. táblázat. A felületi érdesség változása nem számottevő. A beremegett darabokat ebbe nem számítom bele, mivel adott forgácsolásban ezek selejtnek számítanak. Legnagyobb változás a PPSU esetén mérhető, a másik három vizsgált anyagnál az érdesség változása kevesebb, mint 10%. A forgácsolóerő esetén a korábbi ábrákból is jól láthatóan nagyobb változás tapasztalható, átlagosan, 870%-os, azaz közel kilencszeres növekedés mérhető. Az anyagok közül a PET változott nagyobb mértékben, mérsékeltabb a POM-hoz és PP-hez tartozó forgácsolóerő növekedés, ami 700% körüli. Ez alapján kijelenthető, hogy a fogásvétel a forgácsolóerőt nagymértékben növeli, míg a felületi érdességre mérsékelt hatása van.

	Ra vált. %	Ra vált. fajlagos	Rz vált. %	Rz vált. fajlagos	Fe vált. %	Fe vált. fajlagos
PP	6,32	0,00	8,72	0,01	771,55	0,59
PET	6,09	0,00	5,48	0,00	1052,39	0,81
PPSU	24,55	0,02	39,23	0,03	938,23	0,72
POM	1,70	0,00	0,89	0,00	718,02	0,55
Min	1,70	0,00	0,89	0,00	718,02	0,55
Max	24,55	0,02	39,23	0,03	1052,39	0,81
Átlag	9,67	0,01	13,58	0,01	870,05	0,67
Szórás	8,79	0,01	15,07	0,01	132,96	0,10

IV.3. táblázat. A fogásvétel változtatásának hatása a felületi érdességre és a forgácsoló erőre

IV.4. A forgácsoló szerszám csúsrádiuszának változtatás

A forgácsolási paraméterek után a különböző szerszámgeometria hatásait vizsgálom. A szerszámot, azaz a forgácsoló geometriát számos paraméter határozza meg, ezek közül esztergáláskor az egyik legfontosabb a csúsrádiusz. Mivel a forgácsolt felület elméletileg az előtolás és a szerszám csúcsának kombinációjából adódó lenyomat, így a felületi érdességre biztosan hatással lesz. Az irodalmakban találkoztam olyan mérésekkel, amelyek a rádiusz hatásait vizsgálják, de ezek egyrészt nem műanyag próbatestekkel történtek, másrészt pedig a rádiusz forgácsolóerőre gyakorolt hatását általában nem elemezték. A mérések során állandó forgácsolási sebességgel ($v_c=250\text{m/perc}$) és állandó fogásvétellel ($a=2\text{mm}$) történtek. A különböző csúsrádiuszokat összehasonlító görbék felvételéhez a különböző lapkával változó előtolással végeztem méréseket.

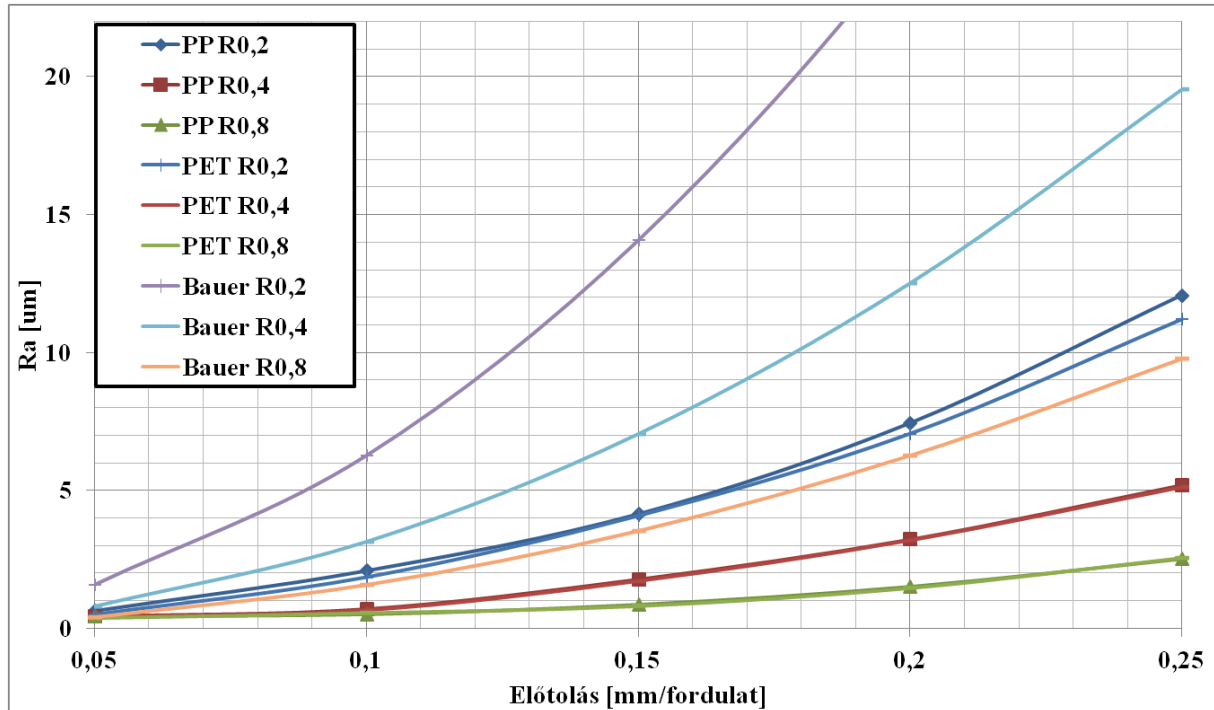
A csúsrádiusz értékek:

0,2 0,4 0,8 [mm]

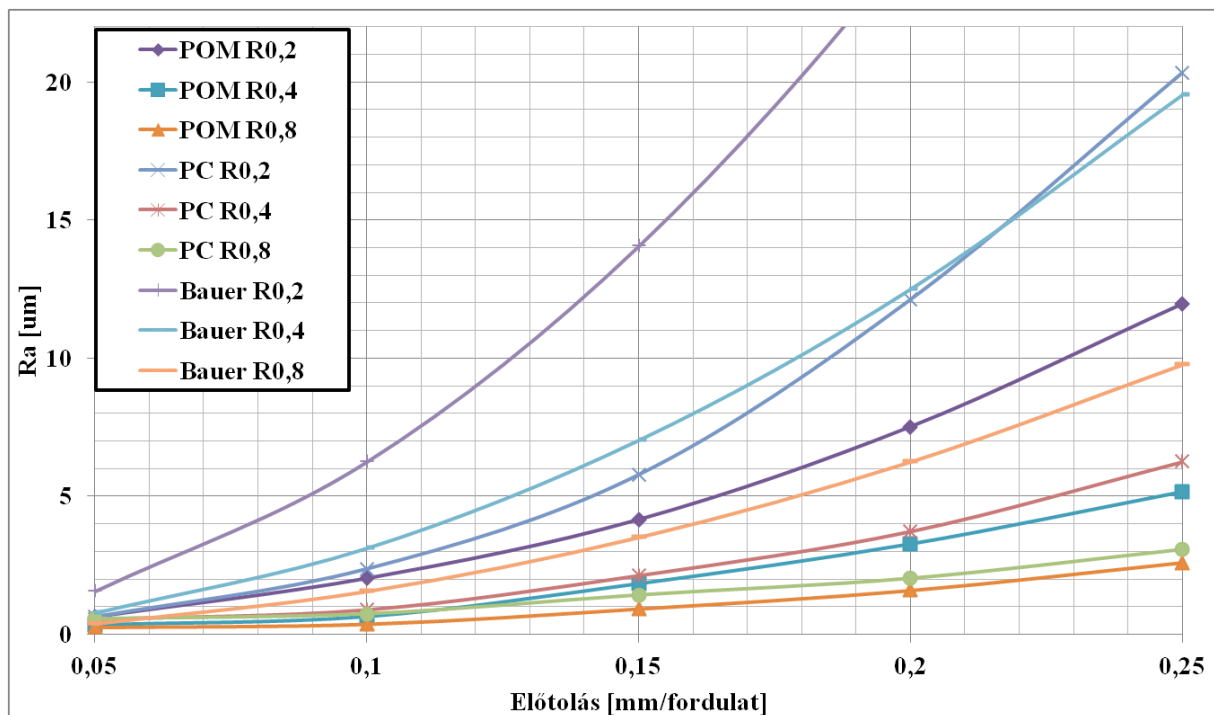
Az előtolás értékek:

0,05 0,1 0,15 0,2 0,25 [mm/fordulat]

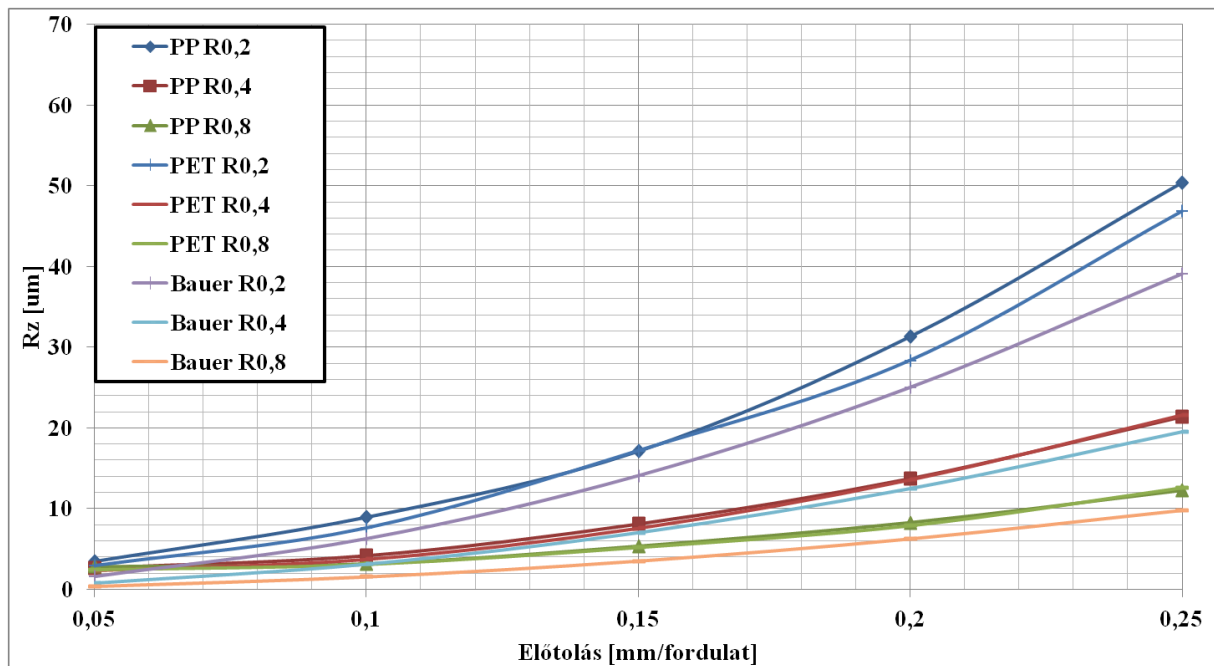
A mérésekhez „III. Felhasznált anyagok és módszerek” -ben bemutatott „A”-jelű ($r_\epsilon=0,2\text{mm}$), valamint a C ($r_\epsilon=0,4\text{mm}$) és D ($r_\epsilon=0,8\text{mm}$) jelű lapkákat alkalmaztam. Minden mérést új lapkával folytattam le, hűtőemulzió alkalmazásával. A jobb láthatóság kedvéért a műanyagokat érdességi paraméterenként két grafikonra bontva mutatom be a IV.18-19-20-21. ábrákon.



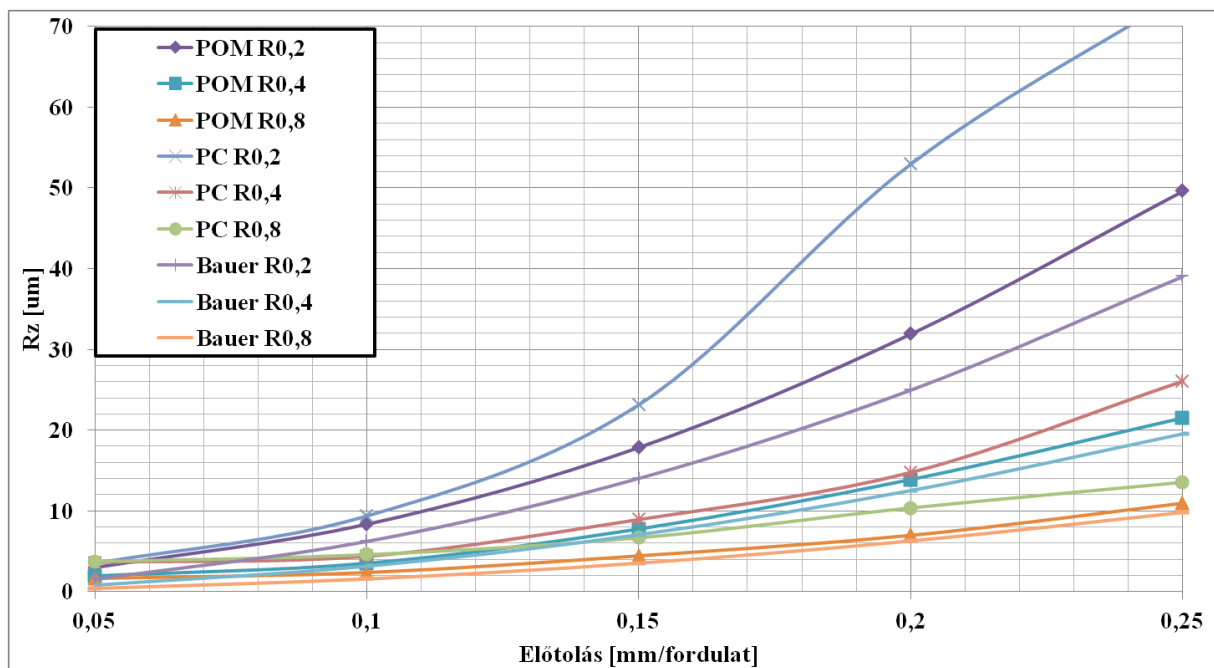
IV.18. ábra. Különböző rádiuszú lapkával végzett forgácsolás I.



IV.19. ábra. Különböző rádiuszú lapkával végzett forgácsolás II.



IV.20. ábra. Különböző rádiuszú lapkával végzett forgácsolás III.

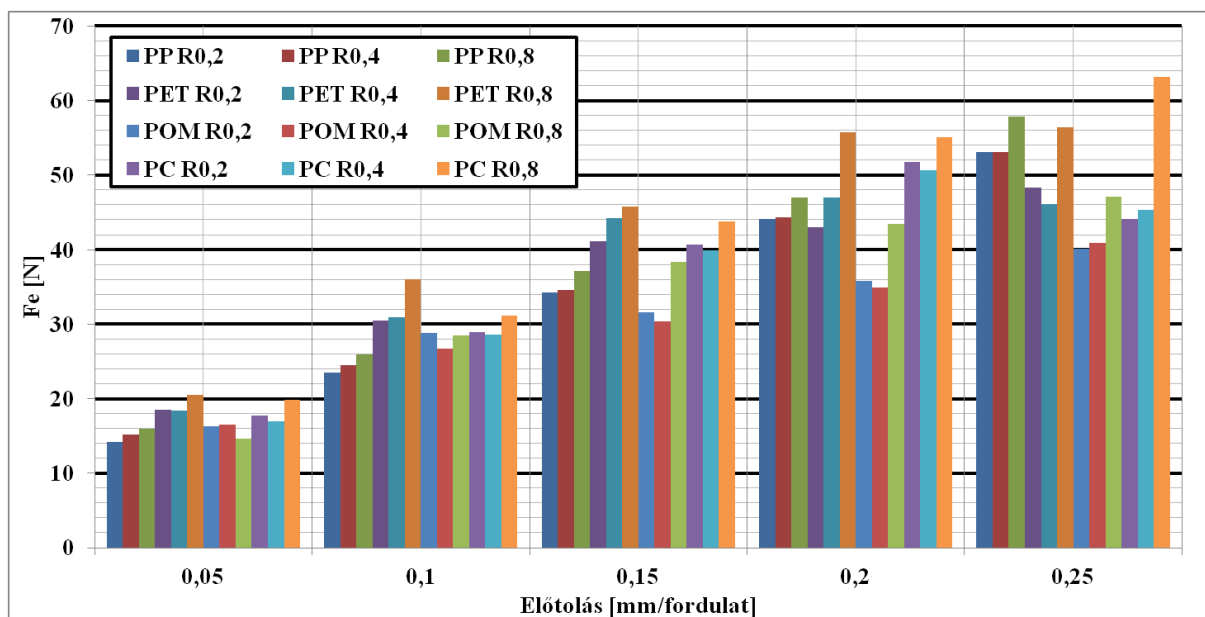


IV.21. ábra. Különböző rádiuszú lapkával végzett forgácsolás IV.

A nagyobb csúcsrádiuszú lapka az elötolás növelésénél tapasztaltakat nem változtatja meg. Az elötolás emelésével továbbra is négyzetesen növekszik a felületi érdesség. A nagyobb csúcsrádiusz csak a görbét tolja el laposabb formára. Egyértelműen látszik, hogy a nagyobb csúcsrádiusszal jóval finomabb felület esztergálható azonos forgácsolási körülmények között. Ha a grafikonokra berajzolom a Bauer összefüggést, egyértelmű, hogy a felületi érdesség magassághoz az elméleti közelítés jóval közelebb áll.

Érdemes azonban megfigyelni, hogy az elméleti képlet az érdességnél kedvezőbb felületet állapít meg minden műanyag és mindegyik alkalmazott csúcsrádusz esetén. Az is kivehető, hogy a csúcsrádusz növelésével a Bauer képlet egyre jobb közelítést ad, illetve az egyes műanyagok közötti különbségek egyre mérsékeltebbek.

A forgácsolóerő változását mutatja be a IV.22. ábra. Az erő növekedése figyelhető meg minden műanyag esetében, ha nagyobb csúcsráduszu lapkát alkalmazok. Az előtolás növelésével ez a hatás egyre nagyobb mértékű. Nagyobb előtolásoknál (pl. 0,2 és 0,25 mm/fordulat) az $r_\epsilon=0,8\text{mm}$ lapkák alkalmazásakor a forgácsolóerő megugrik. Ez az ugrás jellegű erő növekedés $r_\epsilon=0,2\text{mm}$ -ről $r_\epsilon=0,4\text{mm}$ -re váltva nem jelentkezik.



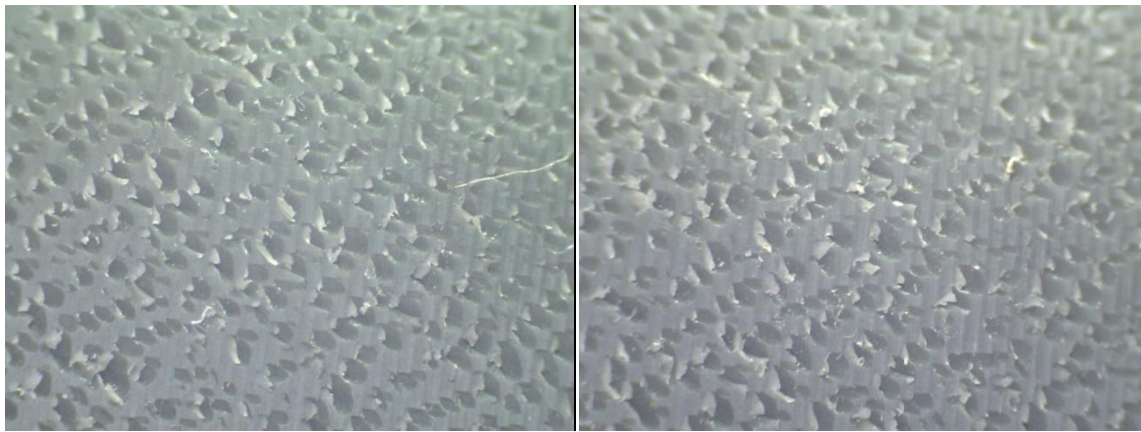
IV.22. ábra. A forgácsolóerő változása különböző csúcsráduszu lapkák esetén

A csúcsrádusz okozta különbségeket számszerűsítve mutatja be a IV.4. táblázat. A rádiusz értékét 0,2-ről 0,8 mm-re változtattam, ami 300%-os növekedést jelent. A numerikus adatokon is jól látszik, hogy nagyobb csúcsrádusszal elért felületi érdesség csökkenés az előtolás növelésével egyre nagyobb mértékű. A műanyagok itt is eltérő viselkedést mutatnak, a PC és POM esetén nagyobb érdesség változás (320-330% átlagosan) figyelhető meg, mint PET, vagy PP esetén. A forgácsolóerő növekménye nem nevezhető jelentősnek a csúcsrádusz nagymértékű változtatásának függvényében, alig 16%-os növekedés jellemző.

Nem csak a IV.19-22- ábrákon látható anyagokat vizsgáltuk, hanem a PVC próbatesteket is. A mérések során azonban megfigyelhető az a jelenség, hogy $r_\epsilon=0,2\text{mm}$ -nél nagyobb rádiuszu lapkával esztergálva tépett, rendkívül rossz minőségű felületet kaptam. A felületből a kisebb részeket mintha a lapka nem vágná el, hanem kiszakítaná onnan. A IV.23. ábrán is látható ez a hatást. Ennek tükrében a kiértékelés és az adatok elemzése során a PVC-hez tartozó adatokat nem vettem számításba (a felület egyébként is kívül esett az eszköz mérés határán). A megfigyelt jelenség azonban számos információt rejt. A mérés során tapasztaltak alapján kijelenthető, hogy PVC esetén kisebb csúcsráduszu szerszámot tanácsos választani.

	f	Ra vált. %	Ra vált. fajlagos	Rz vált. %	Rz vált. fajlagos	Fe vált. %	Fe vált. fajlagos
PP	0,05	47,57	0,16	32,60	0,11	11,91	0,04
PP	0,1	310,67	1,04	180,48	0,60	10,49	0,03
PP	0,15	383,71	1,28	218,29	0,73	8,61	0,03
PP	0,2	392,65	1,31	278,13	0,93	6,68	0,02
PP	0,25	378,40	1,26	311,02	1,04	8,99	0,03
Max		392,65	1,31	311,02	1,04	11,91	0,04
Átlag		302,60	1,01	204,10	0,68	9,34	0,03
Szórás		130,80	0,44	97,04	0,32	1,77	0,01
PET	0,05	29,38	0,10	24,31	0,08	11,30	0,04
PET	0,1	228,13	0,76	142,40	0,47	18,27	0,06
PET	0,15	399,23	1,33	228,08	0,76	11,38	0,04
PET	0,2	380,62	1,27	257,56	0,86	29,82	0,10
PET	0,25	337,77	1,13	270,89	0,90	22,20	0,07
Max		399,23	1,33	270,89	0,90	29,82	0,10
Átlag		275,03	0,92	184,65	0,62	18,59	0,06
Szórás		136,42	0,45	91,80	0,31	6,99	0,02
POM	0,05	138,29	0,46	84,26	0,28	13,21	0,04
POM	0,1	435,01	1,45	254,82	0,85	7,88	0,03
POM	0,15	347,00	1,16	304,68	1,02	25,93	0,09
POM	0,2	371,48	1,24	360,18	1,20	24,56	0,08
POM	0,25	360,94	1,20	355,28	1,18	17,61	0,06
Max		435,01	1,45	360,18	1,20	25,93	0,09
Átlag		330,54	1,10	271,84	0,91	17,84	0,06
Szórás		100,74	0,34	101,31	0,34	6,80	0,02
PC	0,05	16,36	0,05	7,56	0,03	17,08	0,06
PC	0,1	221,95	0,74	114,99	0,38	8,90	0,03
PC	0,15	307,46	1,02	246,95	0,82	9,69	0,03
PC	0,2	499,63	1,67	412,08	1,37	8,81	0,03
PC	0,25	562,86	1,88	449,63	1,50	43,23	0,14
Max		562,86	1,88	449,63	1,50	43,23	0,14
Átlag		321,65	1,07	246,24	0,82	17,54	0,06
Szórás		196,57	0,66	169,15	0,56	13,21	0,04
Összesítés							
Min		16,36	0,05	7,56	0,03	4,75	0,02
Max		562,86	1,88	449,63	1,50	43,23	0,14
Átlag		268,70	0,90	192,08	0,64	15,82	0,05
Szórás		157,05	0,52	132,73	0,44	8,73	0,03

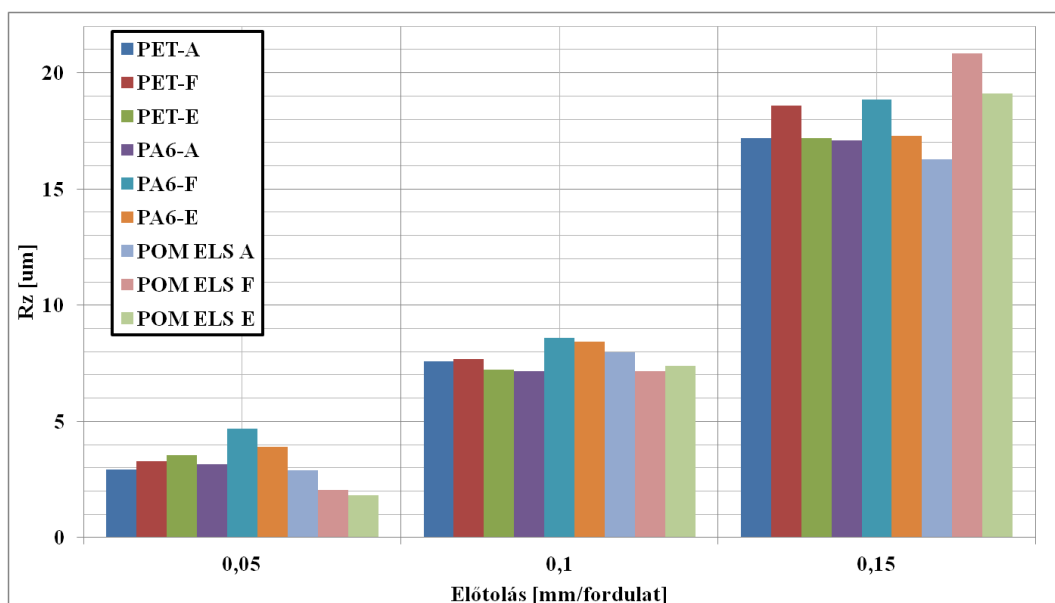
IV.4. táblázat. Különböző csúcsrádiusú lapkával végzett forgácsolások eredményei



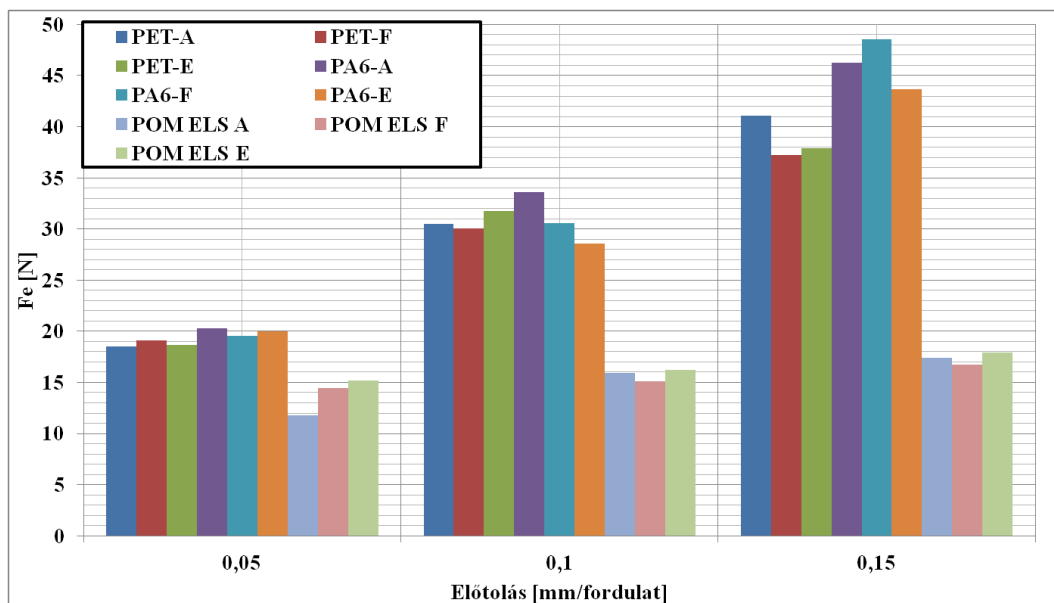
IV.23. ábra. A nagyobb rádiuszú lapkával való fogácsoláskor tapasztalt tépett PVC felület.

IV.5. Hasonló élgeometriájú szerszámokkal végzett forgácsolás

A szerszámgeometriát leíró tulajdonságok közül a következő vizsgálat során hasonló szerszámokkal forgácsoltam. A kísérletsorozat célja, hogy meghatározzam, az adott lapkával végzett kísérletek mennyire „univerzálisak”, azaz más gyártmányú, de hasonló geometriai paraméterekkel bíró szerszámoknál milyen forgácsolóerő és felületi érdesség értékek mérhetők. Az előtolás értékeit változtattam, az állandó forgácsolási sebességgel ($v_c=250\text{m/perc}$) és állandó fogásvétellel ($a=2\text{mm}$) végzett mérések során Atorn, Duracarb és Denitool lapkákat használtam, a III.2. táblázat jelölése szerinti A, E és F jelűeket. A táblázatból kivehető, hogy pl. a csúcsrádiusz, hátszög, stb. azonos, mindhárom lapka bevonat nélküli. A különbséget 1° eltérés jelenti a homlokszögben. Jogos feltevés, hogy ebben az esetben biztosan nem tapasztalható nagy változás, azonban fontos megjegyezni, hogy a lapkák geometriájában a forgácsterelő és mellékszögek eltérőek lehetnek. A mérések eredményeit mutatja be a IV.24. és IV.25. ábra, számszerűsítve a IV.5. táblázat.



IV.24. ábra. Különböző lapkával forgácsolt próbatestek felületi minősége



IV.25. ábra. Különböző gyártmányú lapkával való esztergálás közben mért forgácsoló erők

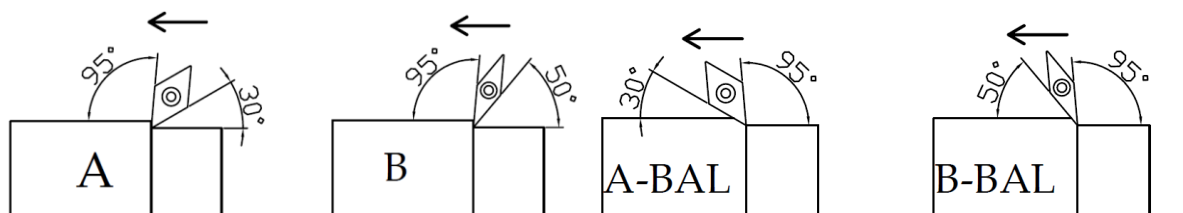
A felületi érdesség alapján az anyagok ismét nem sorolhatók egy csoportba. Különböző előtolásoknál POM ELS és PET esetén nem állapítható meg egyértelműen, hogy melyik lapka ideális. PA6 esetén állapítható meg egyedül, hogy az „A”-jelű lapkával forgácsolható a legfinomabb felület. Különösen a IV. 5. táblázat adatait tanulmányozva figyelhető meg, hogy nagy különbség a legkisebb, 0,05 mm/fordulatos előtolásnál mérhető az érdességi értékben. Ez akkor érdekes, ha nagyon finom felület elérése a cél. Érdekes többféle, főbb paramétereket tekintve azonos lapkát is kipróbálni. A fenti ábrákból jól látszik, hogy különböző gyártmányú lapkával 0,15 mm/fordulat előtolásnál lassabban végzett esztergálásnál a lapkák közötti különbségek a forgácsolóerő szempontjából nem jelentősek. A mért erő értékek közötti különbség 0,15 mm/fordulat válik kissé szignifikánsabbá, de itt is 10% körüli értékekről beszélhetünk. A forgácsolóerőre minimális, a felületi érdességre főleg csak kis előtolásoknál van hatása a lapka gyártmányának.

PET				POM ELS			
f	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált. %	f	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált. %
0,05	34,48	22,01	3,00	0,05	126,65	57,09	28,34
0,1	16,31	6,51	5,56	0,1	8,20	11,70	6,92
0,15	5,21	8,30	10,29	0,15	8,68	28,07	6,97
Max	34,48	22,01	10,29	Max	126,65	57,09	28,34
Átlag	18,67	12,27	6,28	Átlag	47,84	32,29	14,08
Szórás	12,07	6,93	3,02	Szórás	55,73	18,77	10,09
PA-6				Összesítés			
0,05	35,34	48,30	3,88				
0,1	18,64	20,14	17,78				
0,15	10,12	10,14	11,28				
Max	35,34	48,30	17,78	Max	126,65	57,09	28,34
Átlag	21,36	26,19	10,98	Átlag	29,29	23,58	10,45
Szórás	10,47	16,16	5,68	Szórás	35,97	17,05	7,61

IV.5. táblázat. Különböző gyártmányú lapkával végzett forgácsolás

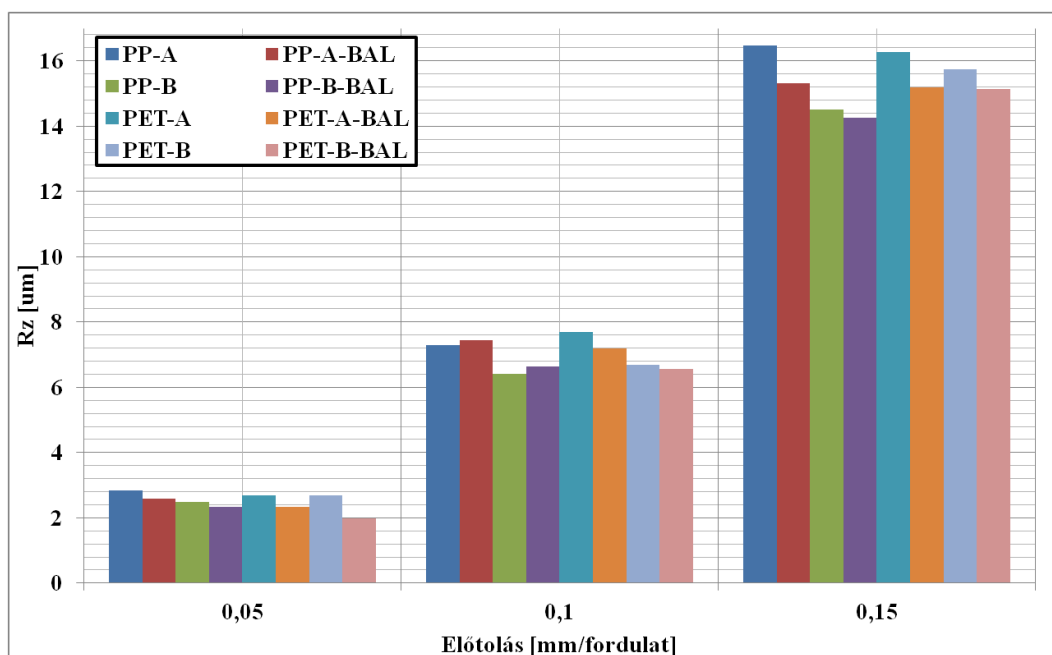
IV.6. Az élelhelyezési szög hatása

A következő szerszámgeometriát érintő vizsgálat a különböző élelhelyezési szög, valamint az ehhez kapcsolódó csúcshézag befolyásoló képessége. A vizsgálatok során a forgácsolási sebesség állandó ($v_c=250$ m/perc), a fogásvétel esetén 2, 3, 4 mm-es értékeket választottam, míg előtolás értékekből a korábban is alkalmazott 0,05 0,1 és 0,15 mm/fordulat szinteket. Minden lapka csúcsrádusza $r_\epsilon=0,2$ mm. A szögek értelmezését mutatja be a IV.26. ábra. A lapkák páronként azonosak (pl. „A” és „A-BAL”), csak a befogó késszárban térnek el, a „BAL” a balos késszárát jelenti. Az A és B jelölések a II.2. táblázat szerinti.



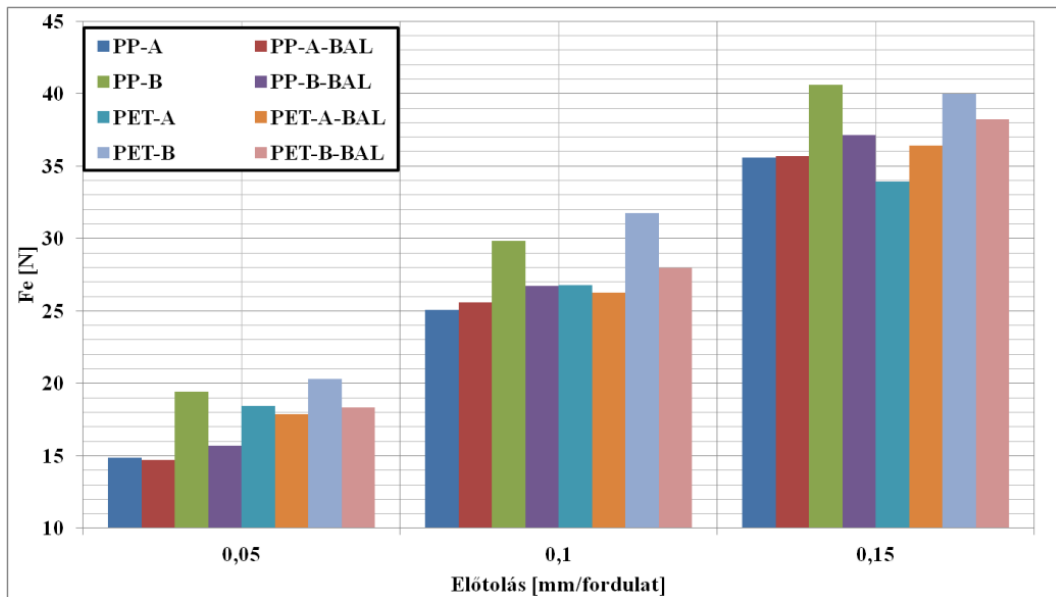
IV.26. ábra. A különböző élelhelyezési szögek

Az élelhelyezési szögek változtatása során tapasztaltakat felületi érdesség vizsgálatok mutatja be a IV.27. ábra. Ahogy azt már az előző méréseknél is megállapítottam, a különbségek az előtolás növelésével egyre szignifikánsabbá válnak. A legjobb felületi érdességet a 0,1mm-es előtolással esztergált PP próbatestnél látható kis eltérést nem számítva a „B-BAL” élelhelyezéssel, 50°-os belépési szöggel és 35°-os lapka csúcshézaggal lehetett elérni. Az IV.6. táblázatban számszerűsített adatokból látszik, hogy ez a változás nem túl nagymértékű, kb. 20%-os változást jelent.

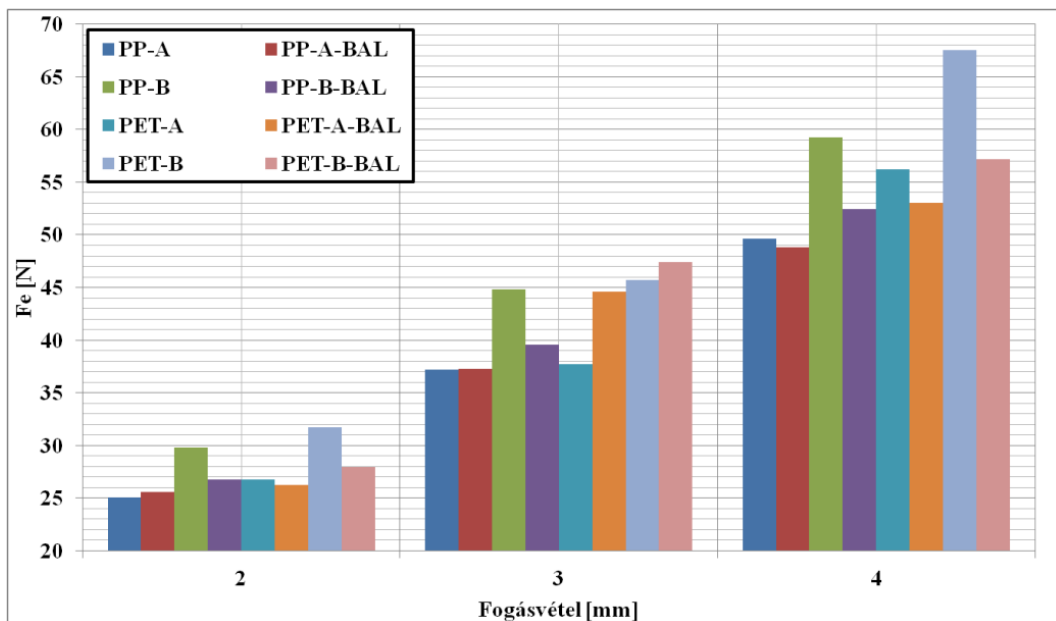


IV.27. ábra. Felületi érdességek különböző élelhelyezési szögekkel

A forgácsolóerő vizsgálatokor mind változó előtolást, mind változó fogásvételt alkalmaztam, ezeket figyelhetjük meg a IV.28 és IV.29. ábrán. A forgácsoló erő minimumára optimalizálva érdemesebb 55° -os csúcshölygű lapkákat alkalmazni, mivel ezeknél a lapkáknál kisebb eredő erő mérhető, mint 35° -os lapkáknál. Az főél elhelyezési szögnél a 95° és a 30° között számottevő különbség nem tapasztalható, látványosabb különbség csak 3 vagy 4 mm-es fogásvételnél, vagy nagyobb előtolásnál adódik. A diagramokat vizsgálva jól látszik, hogy a legkedvezőtlenebb konfiguráció minden anyag, előtolás és fogásvétel esetén 95° -os főél elhelyezési szög és 35° -os csúcshölygű.

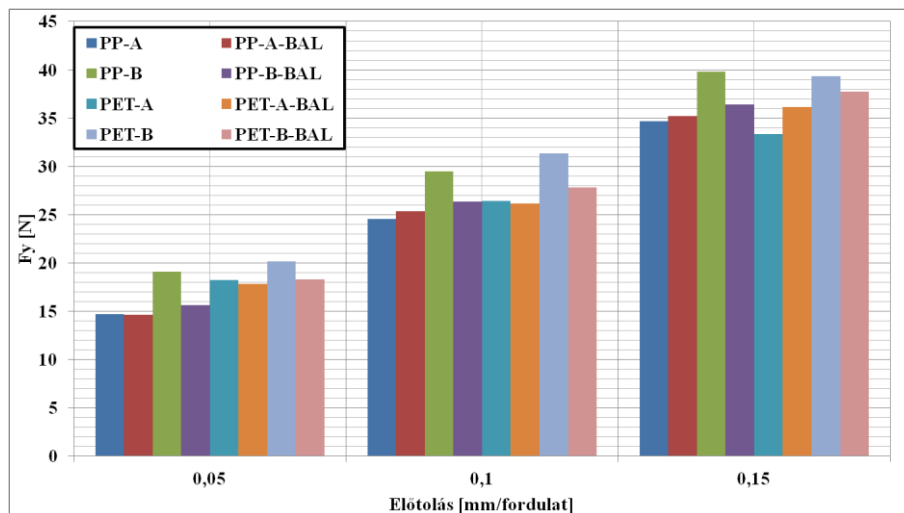


IV.28. ábra. Az eredő erő az előtolás függvényében különböző élelhelyezési szögekkel

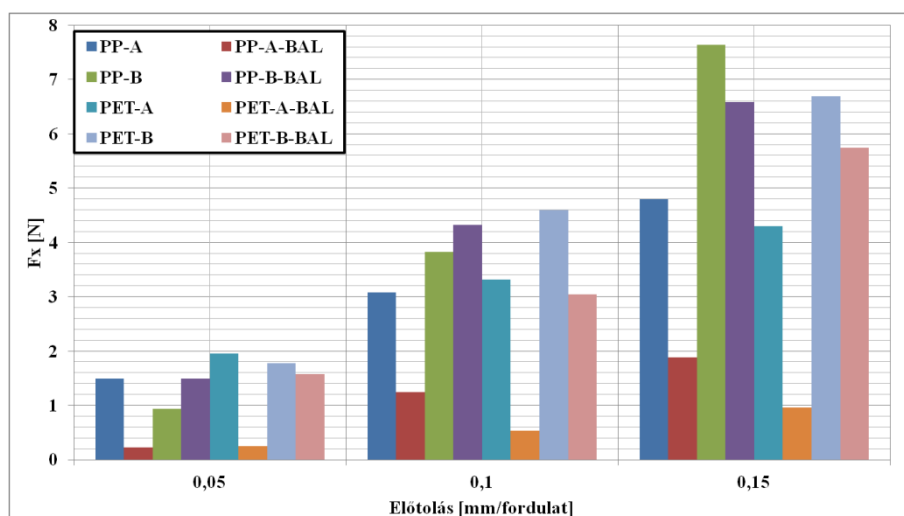


IV.29. ábra. Az eredő erő a fogásvétel függvényében különböző élelhelyezési szögekkel

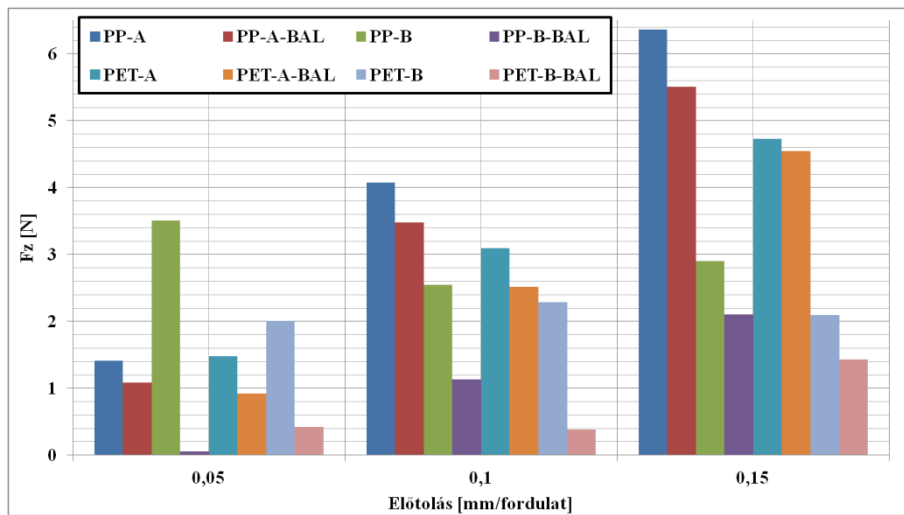
A forgácsolóerőt komponenseire bontva mutatja be a IV.30-32. ábra. Fontos megjegyezni, hogy az előtolást változtatva hasonló arányok adódnak, ezért a különböző fogásvételekkel végzett mérési eredményeket külön nem részletezem. Mivel a legnagyobb erő komponens a főforgácsoló (F_y) erő, ezért ennek alakja nagyban hasonlít az eredő erő alakjára. A IV.31. ábrán bemutatott passzív erő esetén a erőminimum optimuma egyértelműen az „A-BAL”, azaz a 30° -os főél elhelyezési szög, és az 55° -os csúcshög. A IV.32-33. ábrán látható előtolás irányú erő esetén viszont -a legkisebb előtolást nem számítva- fordított hatás figyelhető meg, a legkisebb előtolás irányú erők a 35° -os csúcshögű lapkával mérhetők, a forgácsolási paramétereiktől függően más főél elhelyezési szögnél. A számszerűsített adatokat mutatja be a IV.6. táblázat. Jól látszik, hogy mind a forgácsolóerőre, mind a felületi érdességre kb. 20%-os hatással bír, így nem nevezhető döntően nagy befolyásoló tényezőnek. Figyelembe véve a kismértékű változásokat, gyakorlati szempontból előnyösebb lehet a 95° -os főél elhelyezési szög, mivel így az oldalazás és a lépcsős munkadarab kialakítás is megoldható.



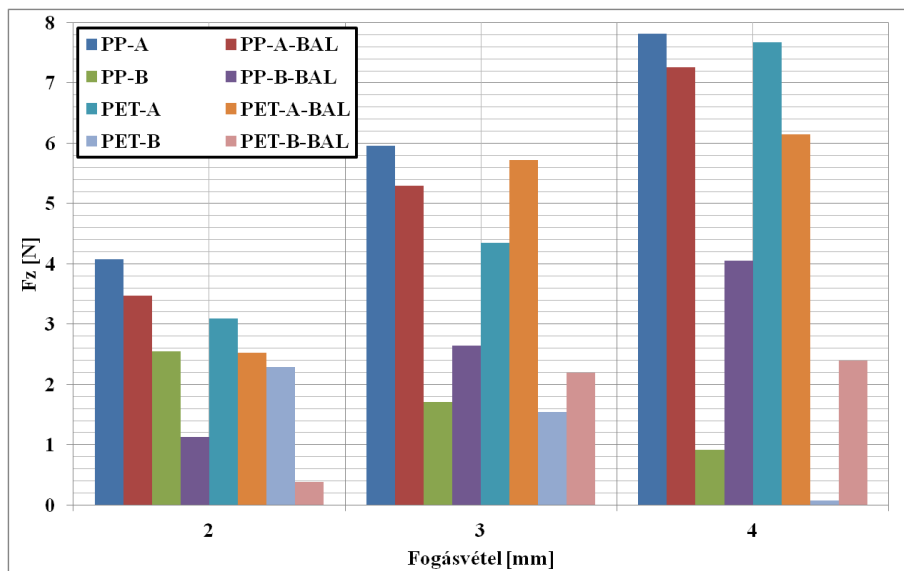
IV.30. ábra. A főforgácsoló erő különböző élhelyezési szögekkel



IV.31. ábra. A forgácsolóerő passzív komponense különböző élhelyezési szögekkel



IV.32. ábra. Előtolás irányú erő az előtolás függvényében különböző élelhelyezési szögekkel



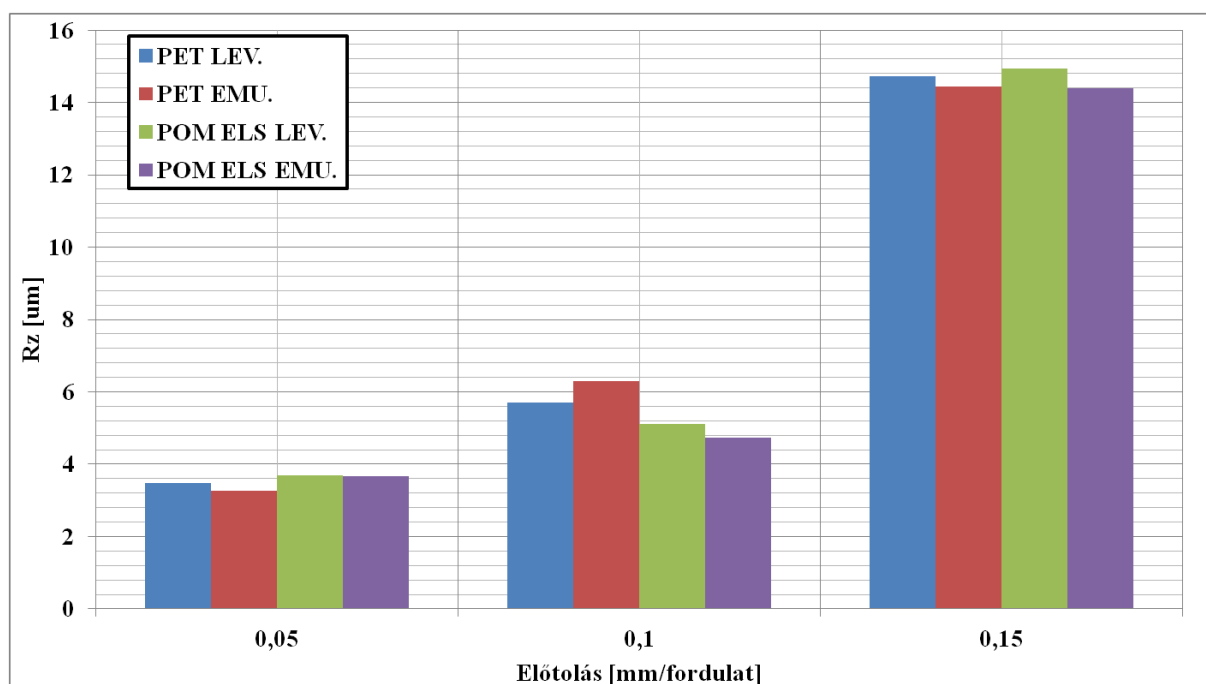
IV.33. ábra. Előtolás irányú erő a fogásvétel függvényében különböző élelhelyezési szögekkel

PP				PET			
f/a	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált.%	f/a	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált. %
0,05/2	17,10	21,78	31,87	0,05/2	75,95	35,86	13,76
0,1/2	9,01	16,34	18,92	0,1/2	10,11	17,12	20,93
0,15/2	14,84	15,42	14,08	0,15/2	11,95	7,54	17,81
0,1/3	14,37	18,24	20,33	0,1/3	9,10	10,77	25,66
0,1/4	10,41	31,59	21,36	0,1/4	8,66	14,09	27,32
Max	17,10	31,59	31,87	Max	75,95	35,86	27,32
Átlag	13,15	20,67	21,31	Átlag	23,15	17,07	21,09
Szórás	2,99	5,88	5,84	Szórás	26,42	9,92	4,98
Összesítés							
Max	75,95	35,86	31,87				
Átlag	18,15	18,87	21,20				
Szórás	19,46	8,35	5,43				

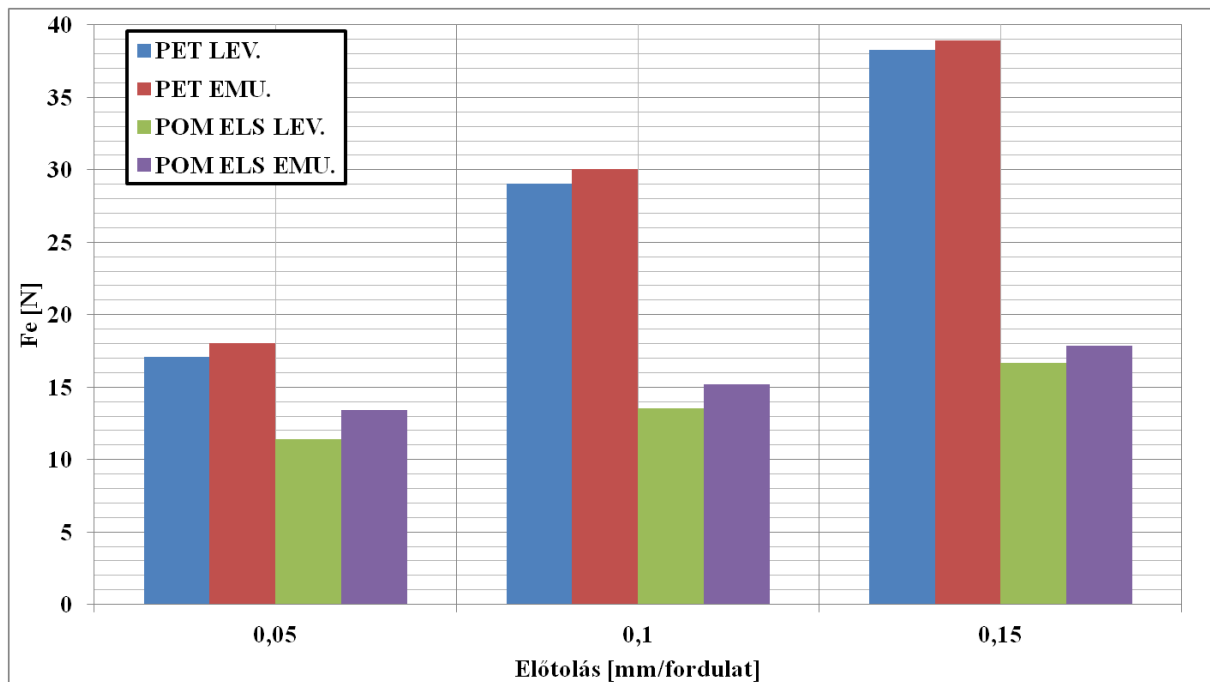
IV.6. táblázat. Különböző élelhelyezési és csúcsszögekkel végzett mérések

IV.7. A hűtő-kenőfolyadék

A szerszámozási és forgácsolási jellemzőkön kívül egy folyamatot egyéb, de nagyban meghatározó jellemzők is leírják. Ilyen az alkalmazott hűtő-kenőközeg használata. A műanyagok esetén a legtöbbször alkalmazott két módszer a levegőhűtés vagy a hűtőemulzió. A vizsgálatok során is ezt a két hűtési módot alkalmaztam. A hűtési mód megválasztásánál számos tényezőt figyelembe kell vennünk. A hűtőemulziót kizárhatja például az forgácsolt műanyag típusa, pl. a nagy vízfelvételű poliamidok esetén. Ide tartozik a porózus, nagy tisztasági követelményű alkatrészek forgácsolása is. A levegőhűtés nagy előnye, hogy nem keletkezik veszélyes anyag (használt hűtővíz) és nem szennyezi a levegőt a párolgó hűtőemulzió. A hűtőemulzió mellett szól nagyobb hűtőteljesítménye, és műanyagok forgácsolása esetén egy rendkívül fontos hatás, a forgács eltávolítása a forgácsolási zónából. A tapasztalt hatásokat a forgácsolóerőre mutatja be a IV.34 és 35. ábra. A vizsgálatok során a forgácsolási sebesség ($v_c=250$ m/perc) és a fogásvétel ($a=2$ mm) állandó, míg előtolás értékekből a korábban is alkalmazott 0,05 0,1 és 0,15 szinteket választottam. Minden lapka csúcsrádiusza $r_\epsilon=0,2$ mm. A felületi érdesség tekintetében az alkalmazott hűtőemulzió hatása nagyon csekély, az IV.7. táblázat adatai alapján alig 4%. A forgácsolóerő esetén az eltérés kissé nagyobb, kb. 8,5%, az emulzióval mérhető a magasabb forgácsolóerő. A forgácsolási paraméterek ezt a különbséget döntően nem befolyásolják. Összességében kijelenthető, hogy a két hűtőközeg között nagy különbség nincs a vizsgált műanyagok esetén, gyakorlati tapasztalatok alapján a hűtőemulzió alkalmazása kedvezőbb a jobb forgácselvezetés miatt.



IV.34. ábra. Levegő és emulzióhűtéssel végzett forgácsolás hatása a felületi érdességre



IV.35. ábra. Levegő és emulzióhűtéssel végzett forgácsolás hatása a forgácsoló erőre

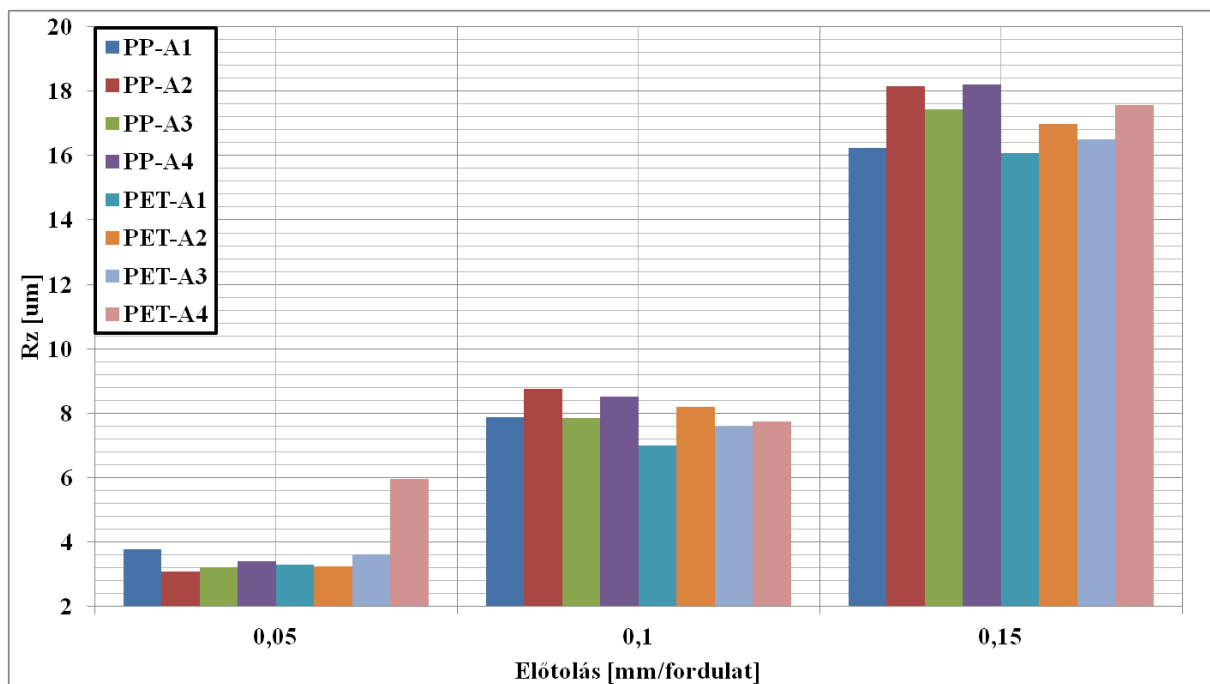
PP				POM ELS			
f/a	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált.%	f/a	Ra vált. %	Rz vált. %	Fe vált.%
0,05/2	4,070	6,979	5,506	0,05/2	2,90	0,68	17,67
0,1/2	0,334	10,147	3,498	0,1/2	0,87	7,90	11,85
0,15/2	0,169	2,021	1,740	0,15/2	2,33	3,70	6,95
0,1/3	1,369	3,058	3,792	0,1/3	1,53	4,15	11,67
0,1/4	0,000	0,000	11,306	0,1/4	1,64	0,61	11,58
Max	4,070	10,147	11,306	Max	2,90	7,90	17,67
Átlag	1,188	4,441	5,169	Átlag	1,86	3,41	11,94
Összesítés							
Max	4,07	10,15	17,67				
Átlag	1,52	3,92	8,56				
Szórás	1,23	3,24	4,76				

IV.7. táblázat. Különböző élelhelyezési és csúcsszögekkel végzett mérések

IV.8. A szerszámkopás vizsgálata

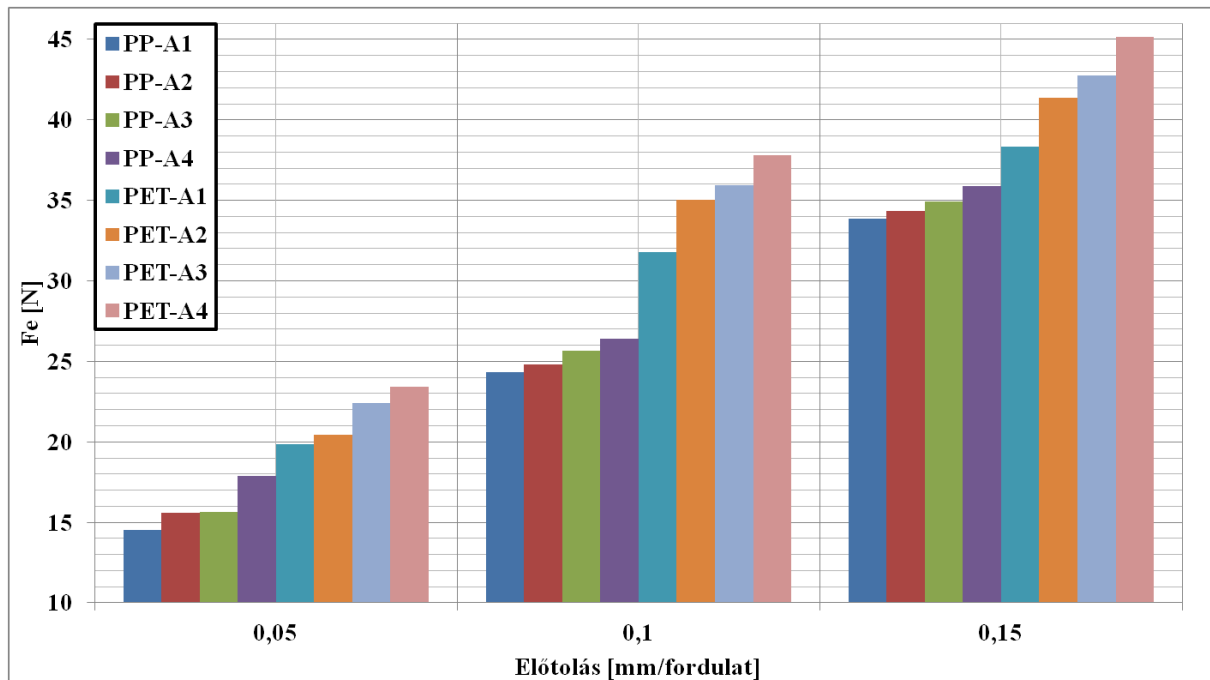
A korábbi vizsgálatok esetén mindig új, mikroszkóp alatt szemrevételezéssel ellenőrzött lapkákat alkalmaztam, kizárva ezzel a lapkakopás befolyásoló hatását. A gyakorlatban azonban ez nem oldható meg, sem gazdasági, sem hasznossági szempontokból. A III.2. pontban leírtak alapján koptatott lapkákat különböző előtolás (0,05 0,1 0,15 mm/fordulat) és különböző fogásvétel (2 3 4 mm) értékekkel vizsgáltam. A forgácsoló sebesség állandó ($v_c=250$ m/perc). A lapkák mind azonos típusúak, a III.2. táblázat jelölése szerinti „A” lapkákat alkalmaztam. A változást főleg az okozza, hogy a kopás hatására a lapka geometriája, felületi érdessége változik, így a paramétereknek is módosulnia kell. A kopás mértékének függvényében A1-től A4-ig jelöltem. A mérések utolsó csoportjában a kopás hatását vizsgáltam a felületi érdességre és a forgácsolóerőre, emellett pár tipikus, műanyagok esetén is tapasztalható kopástípust mutatom be.

A IV.36. ábrát tekintve ugyan látható a különbség a kopott és új lapkák között, azonban egyértelmű tendencia nem illeszthető az adatsorokra.

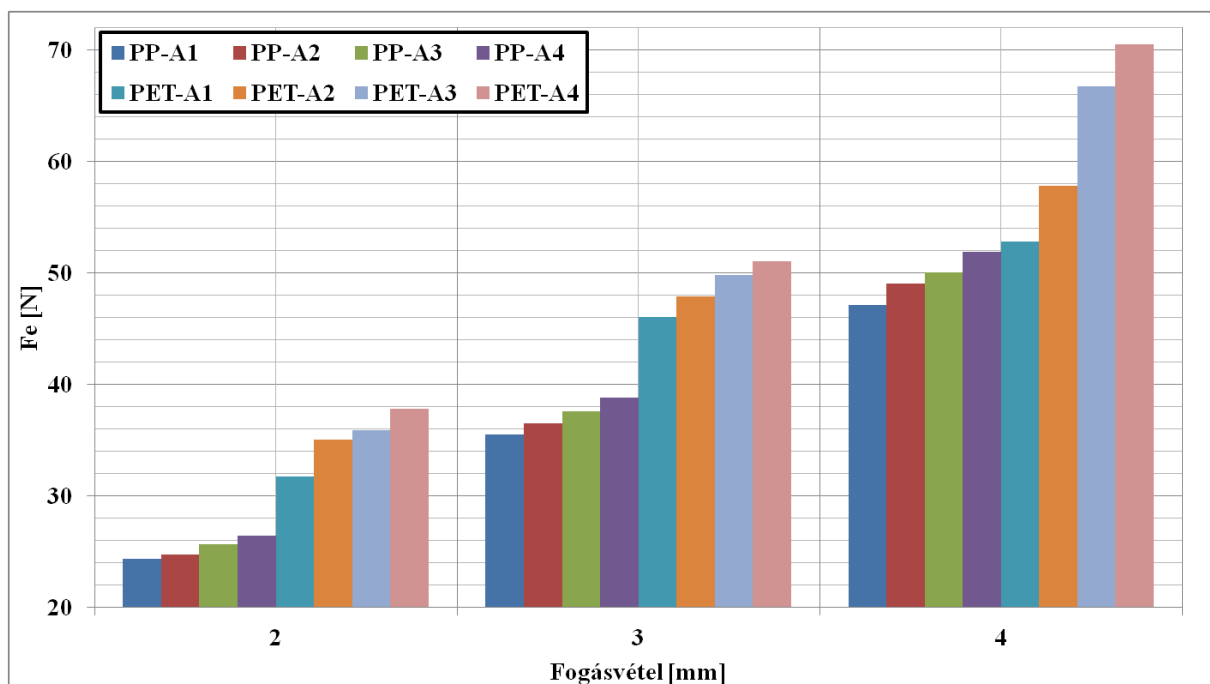


IV.36. ábra. Felületi érdesség különbözőképpen kopott lapkával

A forgácsolóerő növekedése mindkét műanyag, minden forgácsolási paraméter kombinációban egyértelmű a lapka kopásával. Ezt a növekedés, főleg PET 4mm-es fogásvétellel történő esztergálásakor látható szignifikánsnak. A tapasztalt forgácsolóerő változás a IV.37-38. ábrákon szerepel. A lapka kopása hatással van a forgácsolóerőre és a felületi érdességre is. Az érdesség romlik, a forgácsolóerő pedig növekszik, de jó regressziós függvény a forgácsolóerőre mutatkozik, így ez lehet kedvezőbb megoldás a szerszámél-monitoringa.



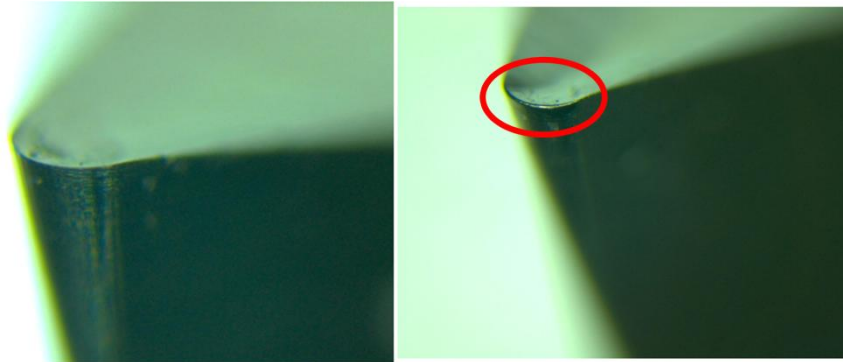
IV.37. ábra. Az eredő forgácsoló erő növekedése a lapka kopásával különböző elötolás értékeknél



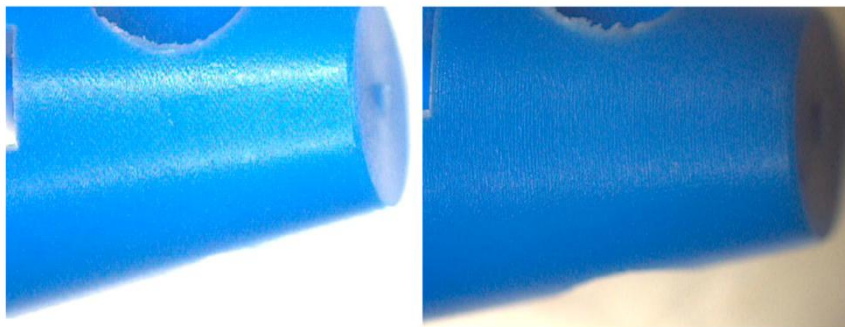
IV.38. ábra. Az eredő forgácsoló növekedése a lapka kopásával különböző fogásvétel értékekkel

A mérések másik célja a tipikusan műanyagok forgácsolása esetén megjelenő szerszámkopások bemutatása. Jó összehasonlítás a IV.39. ábrán lévő lapkákkal forgácsoló felületek, amelyeket a IV.40. ábrán látható. A bal oldali képen egy új, míg a jobb oldali képen egy szemrevételezéssel kopottnak ítélt, 6 órát forgácsoló lapka van.

A lapkán az egyik legjelentősebb kopás, az élkopás figyelhető meg, az is főleg a szerszám csúcán a legjelentősebb. A kopott szerszámon már nincs éles vágóél, mert egy rádiusszerű felületté kopik. A forgácsolt munkadarab sima felülete helyett egy barázdált, érdesebb felület adódik.

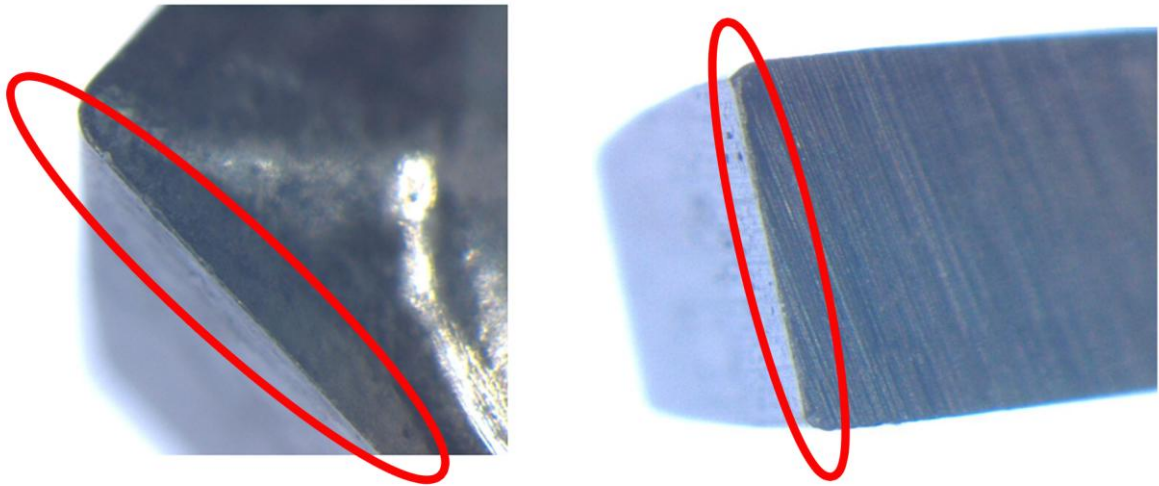


IV.39. ábra. Ép és kopott lapkák PTFE felület esztergáláshoz

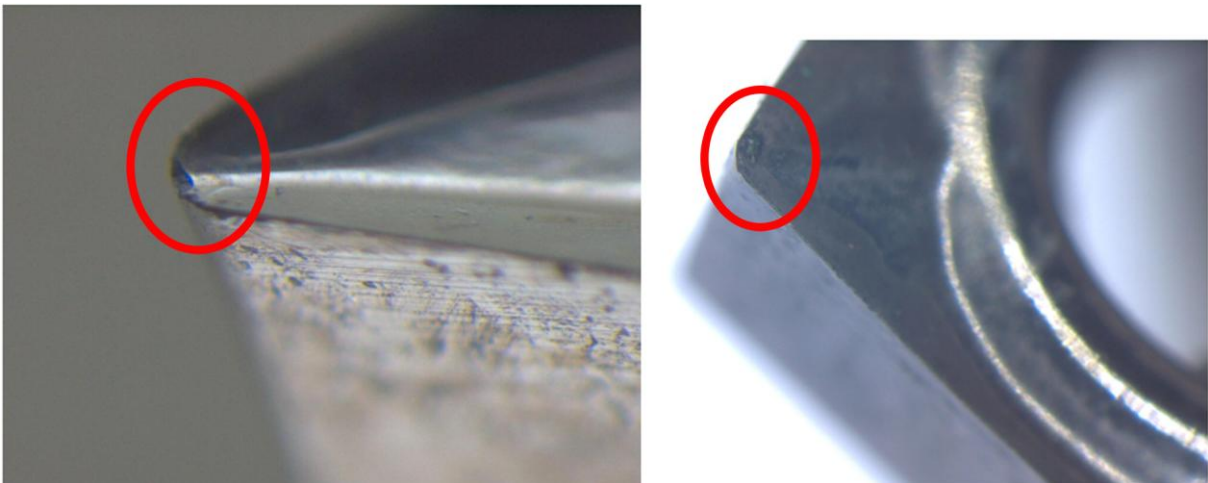


IV.40. ábra. AZ IV.39. ábra lapkáival forgácsolt felület

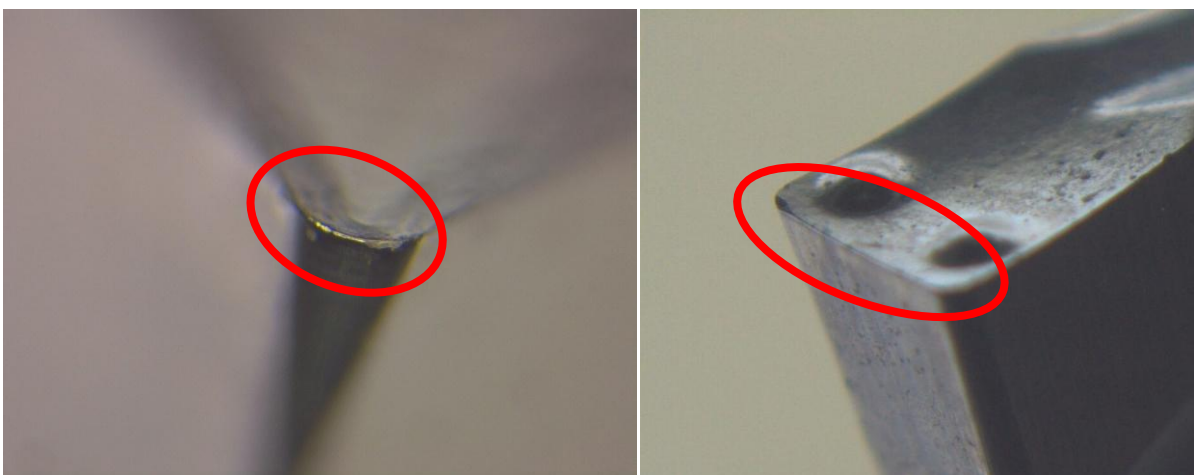
A IV. 39. ábrán is látható élkopás a leggyakrabban előforduló kopástípus erősítő-, és töltőanyagot nem tartalmazó hőre lágyuló műanyagok esetén. Ez figyelhető meg egy furatkés lapkáján a IV.41. ábra bal oldalán. Az ábra jobb oldalán pedig egy beszűrő lapka található hasonló kopással. A másik gyakori kopás, vagy inkább szerszám tönkremeneteli forma a kipattogzás (az angol irodalmakban „pitting”), ami a IV. 42. ábrán figyelhető meg. A két tönkremeneteli forma nem kizárólagosan jelenik meg, gyakran mindkét típus egyszerre jelentkezik a szerszámokon. Két ilyen, összetett hiba látható a IV.43. ábrán is.



IV.41. ábra. Forgácsoló lapkák élkopással



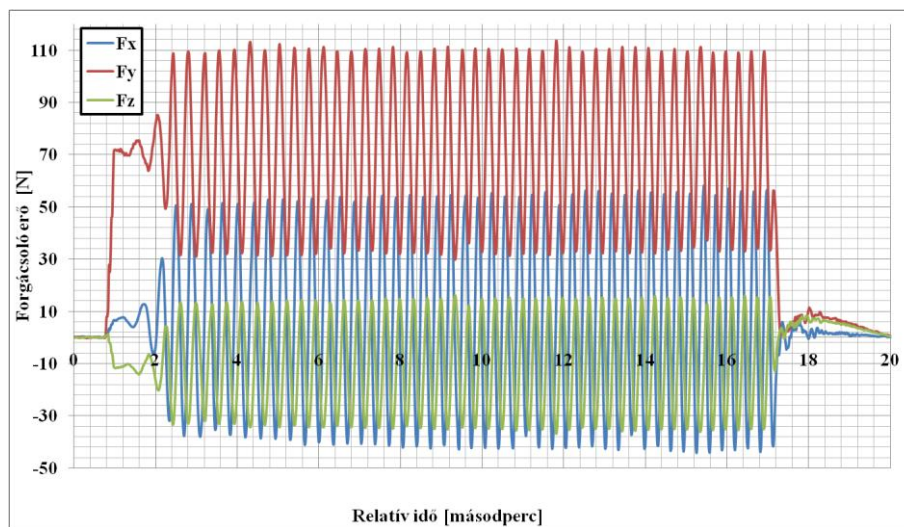
IV.42. ábra. Forgácsoló lapkák a felület kitöredésével



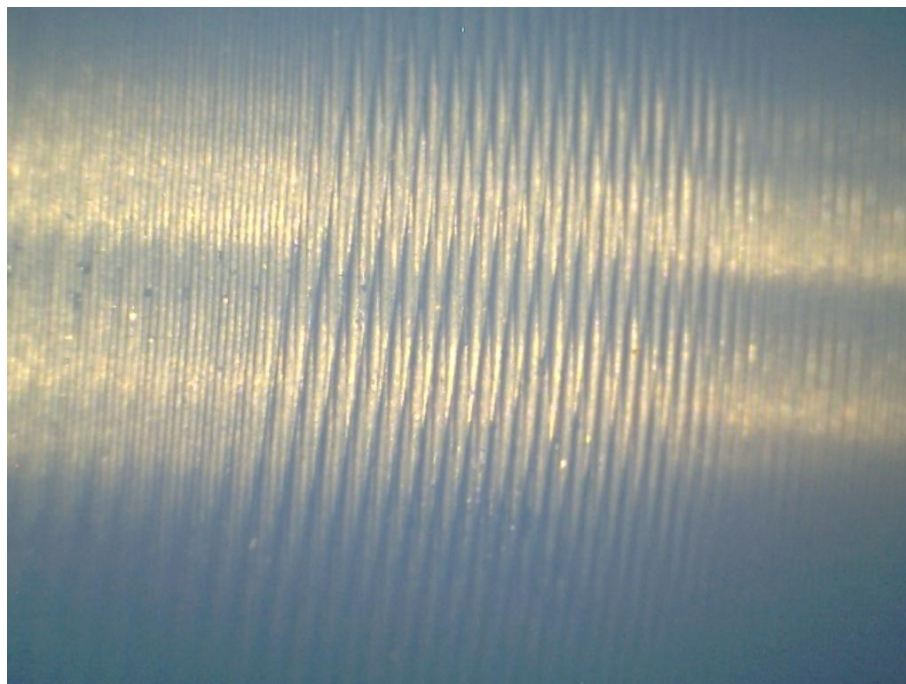
IV.43. ábra. Forgácsoló lapkák a felület kitöredésével

IV.9. A beremegés jelensége

A mérések során gyakran említettem a „beremegés” jelenségét. Beremegésen azt a káros állapotot értem, amikor a forgácsolási rendszer az adott paraméter, szerszámozás, stb. kombinációban nem kívánatos, nagy amplitúdójú rezgésbe kezd. A beremegést általában hanghatás is kíséri, és a túl magas forgácsoló sebesség (a mérések alatt ez jelentette a felső határt), vagy a túl nagy fogásvétel okozza. Fontos, hogy a beremegés is nagyban függ a műanyag típusától. A fogásvételhez kapcsolódó mérések esetén megállapítottam, hogy PP esetén 4 mm, POM és PPSU esetén 5 mm, PET esetén 6 mm jelentette a fogásvétel felső határát, ami után a forgácsoló rendszer beremegett. A forgácsolóerő a IV.44. ábrán is látható módon lengeni kezd, a folyamat eredménye rendkívül rossz, alakhibás felület, amit a IV.45. ábra mutat be.



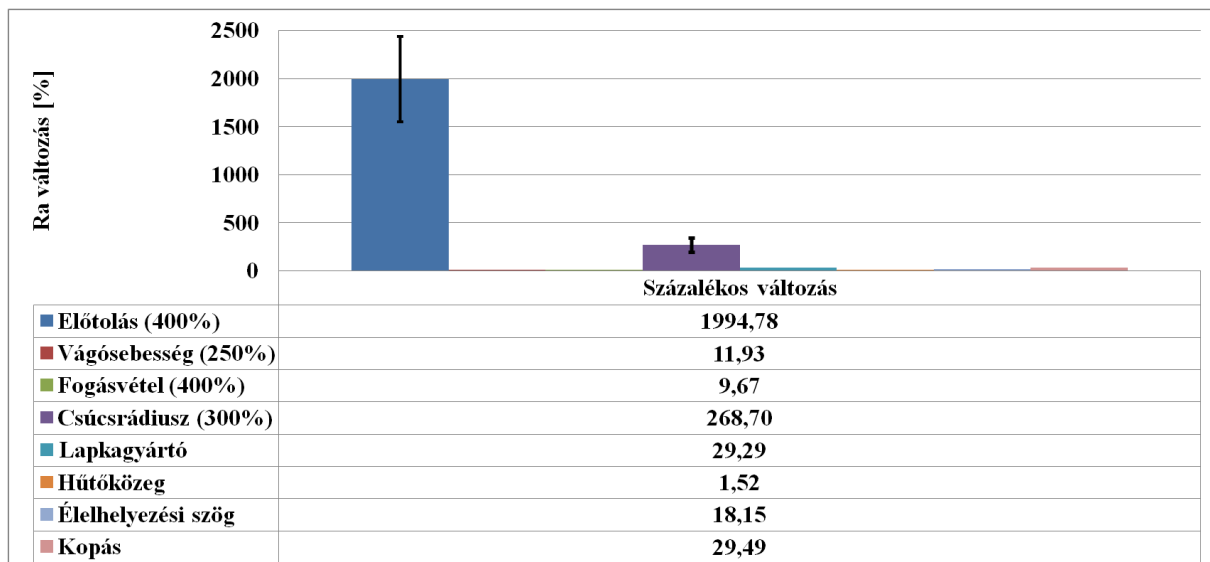
IV.44. ábra. A beremegés közben mért forgácsoló erő



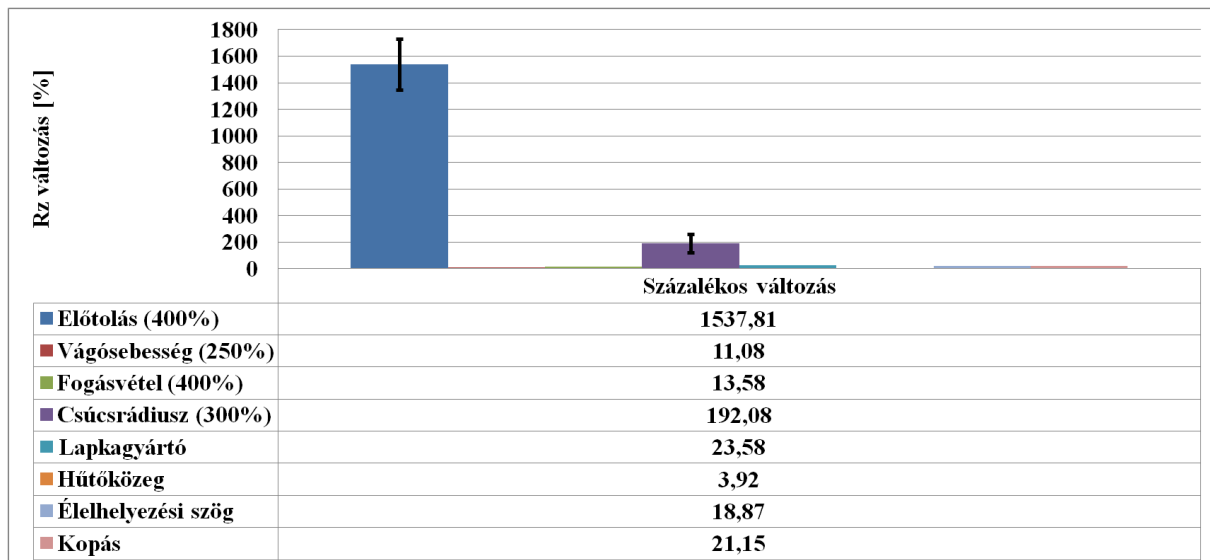
IV.45. ábra. PPSU próbatest felületének változása, ahogy a forgácsolás beremeg

IV.10. A felületi érdességet és a forgácsolóerőt befolyásoló tényezők

A korábbi pontokban vizsgáltam több, a forgácsolási folyamatot meghatározó paramétert vagy jellemzőt. A forgácsolási paramétereket, több szerszámgeometriát leíró, valamint egyéb a forgácsoláshoz köthető jellemzőt elemeztem. Az egyes jellemzők különböző mértékben befolyásolták a felületi érdesség, vagy a forgácsolóerő értékét. Fontos megjegyezni, hogy az egyes műanyagoknál a tapasztalt változások eltérő mértékűek, így egyértelműen kijelenthető, hogy a műanyagok nem kezelhetők egyként. Mégis, hogy összehasonlíthatók legyenek az egyes vizsgálatok, a következő pontokban minden jellemzőre egy adott átlagot számoltam. Az átlagolás során minden egyes műanyag típusra meghatároztam a változás mértékét, majd ezeknek vettem az átlagát, hogy a műanyagokra összességében vizsgáljam az egyes paraméterek hatását. Hogy a műanyagok közötti különbséget ne hagyjam figyelmen kívül az ábrákon hibásávként feltüntettem a szórás nagyságát is. Az Ra felületi érdesség paramétert leginkább meghatározó paramétereket mutatja be a IV.46. ábra. Az Rz skálát befolyásoló tényezőket mutatja be a IV.47. ábra.



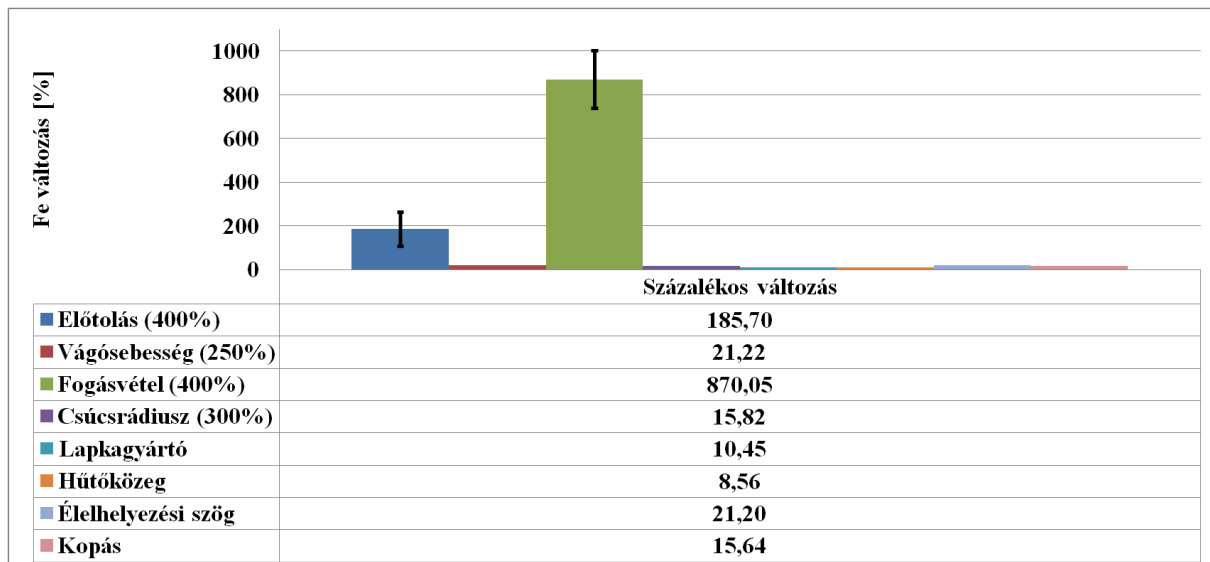
IV.46. ábra. Az Ra skálán értelmezett felületi érdességet befolyásoló tényezők



IV.47. ábra. Az Rz skálán értelmezett felületi érdességet befolyásoló tényezők

Bár a két skála eltérő értelmezése a felületi érdességnek, az egyértelmű, hogy a felületi érdességet leginkább az előtolás, valamint a lapka csúcsrádiusza határozza meg. Ennek a két paraméternek a megváltozásával tudtam leginkább befolyásolni a felületi érdesség értékét. Az előtolás módosítására reagál legérzékenyebben a minta, közel 20-szoros növekedés tapasztalható az előtolást az ötszörösére növelve. A csúcsrádiuszt 0,2-ről 0,8 mm-re növelve befolyásolható az érdesség értéke, ekkor közel 200%-al csökken. Az előbbi két jellemzőn kívül megemlíthető még a lapkagyártó és a kopás hatása, ezek valamivel több, mint 20%-os befolyással bírtak. A lapkagyártó esetén az átlagot a kis előtolások esetén tapasztalható nagyobb mértékű változások húzzák felfelé.

Ha forgácsolóerőnél is megvizsgálom a korábbi pontokban leírt eredményeket a IV.48. ábrán látható diagramokat kapom. A fogásvétel, valamint az előtolás határozza meg leginkább a forgácsolóerő értékét. A fogásvételnek rendkívül nagy hatása van az erő értékére, 0,5 mm-ről 6 mm-re növelve a fogásvételt a forgácsolóerő közel a tízszeresére növekszik. A másik ilyen jellemző az előtolás, ezt a korábban már említett ötszörös értékre növelve a forgácsolóerő közel háromszorosára emelkedik. A két fő hatáson kívül, kb. 20%-os aránnyal a vágósebesség, valamint az élelhelyezési szög határozza meg.

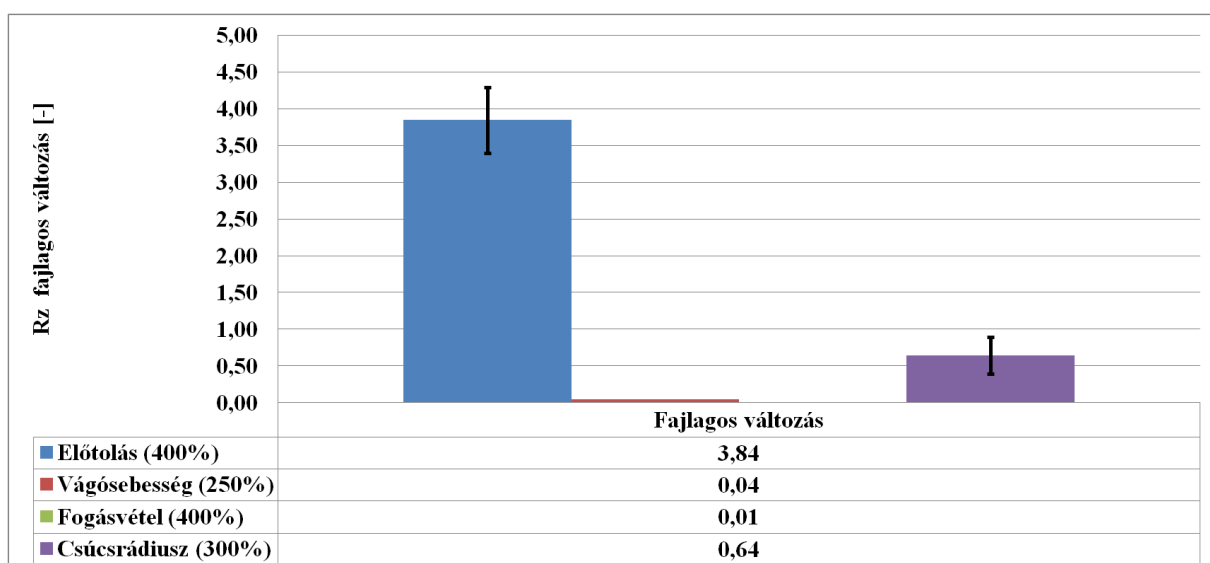


IV.48. ábra. A forgácsolóerőt leginkább befolyásoló tényezők

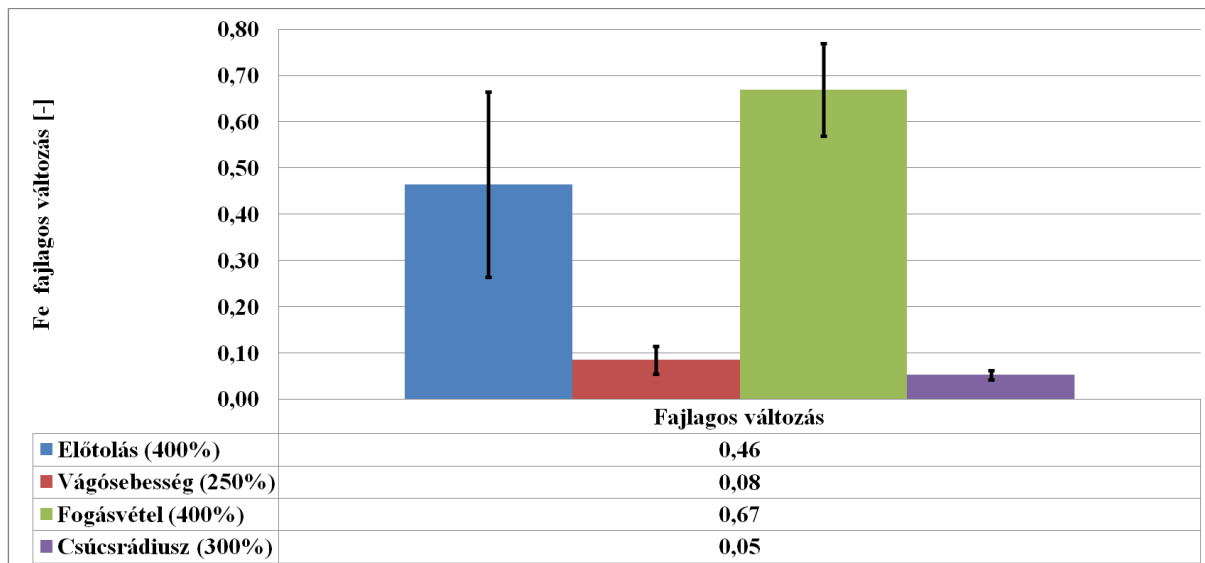
A korábbi vizsgálatokat összefoglaló táblázatokban már szerepelt az ún. fajlagos érték, ezeket a fajlagos változásokat a (IV.1.) képlet alapján bemutatott példa szerint számoltam;

$$\Delta = \frac{\frac{Rz_{0,25} - Rz_{0,05}}{Rz_{0,05}}}{\frac{f_{max} - f_{min}}{f_{min}}} \quad (IV.1.)$$

Mivel a felületi érdességet és a forgácsolóerőt is számszerű adatok jellemzik, így lehetséges a fajlagos értékek számítása, amely azért ad pontosabb képet, mert a egyes paramétereket a mérések során nem ugyanolyan széles skálán vizsgáltam. A felületi érdességre és a forgácsolóerőre mutat fajlagosított értékeket a IV.49. és IV.50. ábra.



IV.49. ábra. A felületi érdességet befolyásoló tényezők fajlagosítva



IV.50. ábra. A forgácsolóerőt befolyásoló tényezők fajlagosítva

A fenti ábrákat tekintve a megállapítások nem változnak, a felületi érdességet az előtolás, és a lapka csúcsrádusza határozza meg leginkább. A felületi érdesség az előtolás változtatására válaszol a legérzékenyebben, így elsősorban ennek változtatásával lehet befolyásolni a kívánt felületi érdességet. A csúcsrádusszal kisebb változás érhető el, de érdemes azt meggondolni, hogy ugyanazt az érdességi értéket nagyobb előtolással, nagyban leegyszerűsítve kevesebb idő alatt lehet elérni. A forgácsolóerő esetén a IV.48. ábrán is látható fogásvétel dominanciája a IV.50.ábrán már nem annyira kiugró, bár még fajlagosítva is a fogásvétel hatása a legerősebb. Az előtolásnak szintén nagy hatása van, így elsősorban ezzel a két paraméterrel érdemes a forgácsolóerő értékét befolyásolni.

IV.11. A felületi érdesség képletének illesztése hőre lágyuló műanyagokhoz

A fenti megállapításokat alapul véve az előtolás, illetve a csúcsrádiusz kombinációja határozza meg a forgácsolt felületi érdességet hőre lágyuló műanyagok esetén. A Bauer-formulában pont ez a két paraméter szerepel. Fontos azonban megemlíteni, hogy ez egy elméleti felületi érdességet jelent, nem összevethető az R_z skálával. Jól látszik, hogy két függvény hasonlóan tekinthető, így érdemes a Bauer formulát hőre lágyuló műanyagokra optimalni. Két korábbi, a IV.2. és a IV.19. ábrákon jól látható módon az összefüggés jóval finomabb felületet ad meg, illetve nem tesz különbséget a műanyagok altípusai között. A (II.2.)-ben meghatározott alap formulát ezért a (IV.2)-ben szereplő, kibővített formulában kell felírni, ahol A, B, C, D az adott műanyagra jellemző anyagjellemzők.

$$R_{z_{számolt}} = \frac{(Af + B)^2 + C}{D \cdot r_\varepsilon} \quad (IV. 2.)$$

A D szorzó főleg a csúcsrádiusz hatásához köthető, ezt a következő pontban vizsgálom. Az A, B, C paraméterek a másodfokú összefüggés finomhangolásához szükségesek, az egyes paramétereket a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg, ahol a (IV.3.)-(IV.5) képleteket írhatjuk fel a, b, és c értékek meghatározására.

$$R_{z_{számolt}} = a + b \cdot f + c \cdot f^2 \quad (IV. 3.)$$

$$f \cdot R_{z_{számolt}} = a \cdot f + b \cdot f^2 + c \cdot f^3 \quad (IV. 4.)$$

$$f^2 \cdot R_{z_{számolt}} = a \cdot f^2 + b \cdot f^3 + c \cdot f^4 \quad (IV. 5.)$$

A következőkben a PP próbatestek mintáján mutatom be a számítások menetét, fő cél a legjobb illeszkedés elérése. A vizsgálatok első felében a csúcsrádiusz értékét 0,2mm-nek választottam.

	f	R_z	f²	f³	f⁴	f·R_z	f²·R_z
1	0,050000	3,467500	0,002500	0,000125	0,000006	0,173375	0,008669
2	0,070000	5,517500	0,004900	0,000343	0,000024	0,386225	0,027036
3	0,100000	8,933333	0,010000	0,001000	0,000100	0,893333	0,089333
4	0,120000	11,200000	0,014400	0,001728	0,000207	1,344000	0,161280
5	0,150000	17,100000	0,022500	0,003375	0,000506	2,565000	0,384750
6	0,200000	31,300000	0,040000	0,008000	0,001600	6,260000	1,252000
7	0,250000	50,350000	0,062500	0,015625	0,003906	12,587500	3,146875
SUM	0,940000	127,868333	0,156800	0,030196	0,006350	24,209433	5,069943

IV.8. táblázat. A legkisebb négyzetek módszerének alkalmazása

A korábban felírt (IV.3.)-(IV.5) egyenletek legegyszerűbb megoldásához a Gauss elimináció módszerét használok fel. A számítási adatokat tartalmazza a IV.8. táblázat, az eliminációhoz felírt mátrix a (IV.6.) képletben látható.

$$\begin{bmatrix} 7 & f & f^2 \\ f & f^2 & f^3 \\ f^2 & f^3 & f^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Z\text{számolt}} \\ f \cdot R_{Z\text{számolt}} \\ f^2 \cdot R_{Z\text{számolt}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

A IV.8. táblázat adatait a (IV.6.) mátrixba beírva, majd az adódó egyenletrendszereket megoldva adódnak a következő értékek.

$$a=3,9915 \quad b=-52,322 \quad c=948,32$$

Az a, b, c értékek ismeretében az egyenletrendszert visszaírva az (IV.2. ben látható alakra) adódnak a következő értékek:

$$A=31,04 \quad B= -0,93 \quad C=3,58$$

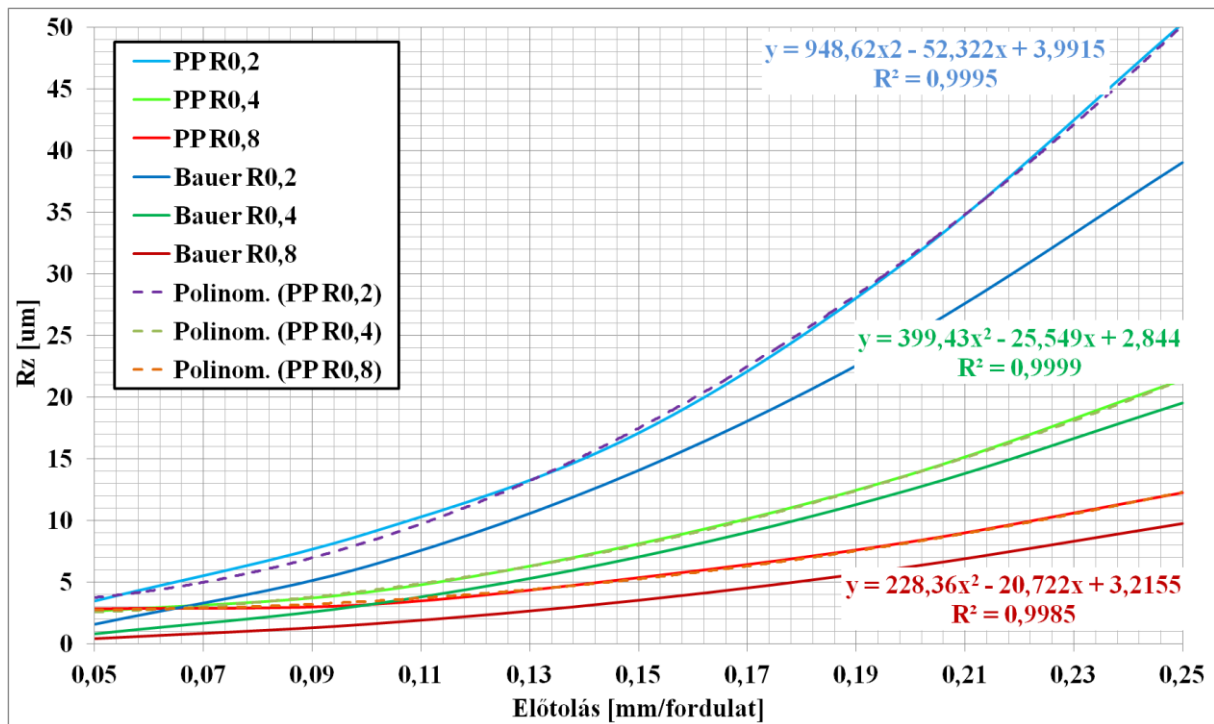
A fenti számításokkal sikerült felírni a felületi érdesség és a fordulatonkénti előtolás közötti összefüggéseket, azonban fontos a kapott értékek ellenőrzése is. Az ellenőrzést a tapasztalati korrelációs index négyzetének kiszámításával végeztem el. Ha a tapasztalati korrelációs index négyzete 0,64-nél nagyobb, főleg ha ez egy 1-hez közeli szám, akkor jó illeszkedésről beszélhetünk. A tapasztalati korrelációs index négyzetének kiszámításához használt értékeket tartalmazza a IV.9. táblázat. Az SSE (sum of squared errors, hibatagok négyzetének összege) és a SSR (regression sum of squares, a regresszióval magyarázott változékonyág) értékekből állapítható meg a tapasztalati korrelációs index négyzete az (IV.7.)-ben látható módon.

	R_Z mért	R_Z számolt	$R_{Z\text{mért}} - R_{Z\text{számolt}}$	$R_{Z\text{mért}} - R_Z$ átlag	$(R_{Z\text{mért}} - R_Z \text{ számolt})^2$	$(R_{Z\text{mért}} - R_Z \text{ átlag})^2$
1	3,5	3,968	-0,500	-14,7994	0,250	219,0224
2	5,5	5,123	0,394	-12,749	0,155	162,547
3	8,9	8,302	0,631	-9,334	0,399	87,116
4	11,2	11,385	-0,185	-7,067	0,034	49,941
5	17,1	17,454	-0,354	-1,167	0,125	1,362
6	31,3	31,424	-0,124	13,033	0,015	169,862
7	50,4	50,212	0,138	32,083	0,019	1029,325
SUM					0,998 (SSE)	1719,175 (SSR)

IV.9. táblázat. A tapasztalati korrelációs index kiszámításához szükséges adatok

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (R_{Z\text{mért}} - R_{Z\text{számolt}})^2}{\sum (R_{Z\text{mért}} - R_{Z\text{átlag}})^2} \quad (\text{IV.7.})$$

PP esetében az R^2 értéke 0,9995, ami azt mutatja, hogy a függvény és a valós adatok között rendkívül jó illeszkedés van. A forgácsolt felületi érdesség jól megállapítható a finomított Bauer formulával. Hogy ezt vizuálisan is megjelenítsem a IV.51. ábrán feltüntettem az eredeti Bauer-formula által megállapított, a mért, valamint az értékekre legjobban illeszkedő másodfokú függvényt. Ahogy azt korábban tapasztaltam, a formula hagyományos alakjában finomabb felületet állapít meg, mint a valós, az illesztett másodfokú függvénnyel azonban rendkívül pontos adat adható meg.



IV.51. ábra. Az illesztett függvények megjelenítése

IV.11.1. A lapka csúcsrádiuszának vizsgálata

Az előző vizsgálatokban mindvégig 0,2 mm-es csúcsrádiusú lapkát alkalmaztam, mivel a gyakorlati tapasztalat alapján ez a leggyakrabban előforduló típus. Ebben a fejezetben azonban megvizsgálom más, nagyobb csúcsrádiusú lapkákra is a fenti egyenletek érvényességét. A IV.51. ábrán megjelenítettem a PP esetében megállapított egyenleteket. Minden egyes adathalmazra saját görbét illesztettem, ami rendkívül jó illeszkedést mutat, de időigényessé teszi a behelyettesítést. A következőkben azt vizsgálom, hogy az $r_\xi = 0,2$ mm csúcsrádiusnál megállapított képleteket csak D értékének megfelelő megválasztásával mennyire lehet alkalmazni nagyobb csúcsrádiuszok esetén is.

Az egyszerűség kedvéért a D értékét a kezdetekben 5-nek választottam (a 0,2 mm-es csúcsrádiusszal a szorzata így 1-et adott) így a nagyobb csúcsrádiuszok esetén is meghagytam ezt az értéket. Jól látszik a IV.52. ábrán, hogy a PP próbatestek esetén a megállapított $D=5$ érték nagyobb csúcsrádiuszok esetén is rendkívül jó közelítést adnak, $r_\xi = 0,4$ mm –nél az $R^2=0,92$, míg $r_\xi = 0,8$ mm –nél az $R^2=0,90$, ami 1-hez közeli, tehát jó illeszkedést mutat.

Ha $D=4$, akkor mindkét csúcsrádus esetén jóval kedvezőtlenebb a korreláció (0,39 és 0,72). Ha $D=6$, akkor is kedvezőtlenebb illeszkedést kaptam. Ugyan $r_\varepsilon=0,4$ mm –nél az $R^2=0,95$ kedvezőbbnek tűnik, azonban $r_\varepsilon=0,8$ mm –nél az $R^2=0,75$, ami viszont sokkal rosszabb. Ha a D értékét a lehető legpontosabbnak szeretném meghatározni $r_\varepsilon=0,4$ mm csúcsrádus esetén a $D=5,772$ adja a legjobb illeszkedést, míg $r_\varepsilon=0,8$ mm csúcsrádus esetén a $D=4,84$ érték bizonyul optimálisnak. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez csak PP-re vonatkozik, és az egyszerűbb 5-ös érték is megfelelően jó közelítést ad.

IV.11.2.A megállapítások kiterjesztése többféle műanyagra

Mivel fordulatonkénti előtolás-felületi érdesség vizsgálatnál számos műanyagra rendelkeztem mérési eredménnyel, így az előzőekhez hasonló módon az illesztett függvényt $r_\varepsilon=0,2$ mm esetén felírható a többi anyagra is, a (IV.2.) képletben meghatározott formában. Az illeszkedések ellenőrzése után látható a tapasztalati korrelációs index négyzete, amely minden esetben egy 1-hez közeli számot, azaz nagyon jó illeszkedést jelent. Az együtthatókat és az R^2 értékeket a IV.10. táblázat tartalmazza.

Műanyag	A	B	C	D	R^2
PP	31,04	-0,93	3,58	5	0,9994
PVC	30,77	-0,76	2,26	5	0,9999
PET	28,85	-0,56	2,21	5	0,9988
PPSU	38,01	-1,38	4,18	5	0,9993
PE	31,61	-0,18	1,88	5	0,9989
PA6	24,55	0,64	-1,1	5	0,9918
PEEK	34,35	-1,11	3,33	5	0,9991
POM ELS	28,05	-0,16	1	5	0,9965
PEI	37,75	-1,08	3,65	5	0,9963
PC	37,81	-0,76	1,03	5	0,9891
POM	29,15	-0,37	1,83	5	0,9999

IV.10. táblázat. Anyagra jellemző függvényoptimalási adatok

IV.11.3.A csúcsrádus összefüggés kiterjesztése többféle műanyagra

Csúcsrádus vizsgálatok esetén PP, POM, PVC, PC és PET próbatesteket használtam fel. A D érték megállapításához azonban a korábban említett tépett felület miatt a PVC-re vonatkozó adatokat kihagytam. A IV.10. táblázat adatait a IV.8. összefüggésbe helyettesítve adódik a IV.11. táblázat. A táblázat adataiból jól kivehető, hogy a $D=5$ közelítés a vizsgált anyagokra is elfogadható illeszkedést mutat, kivéve a PC -ot.

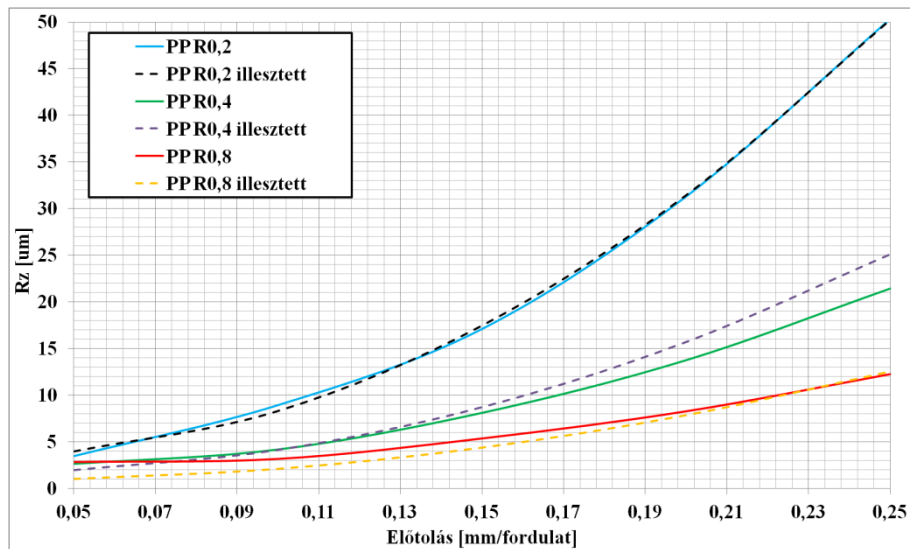
Az anyag felületi érdességének alakulása $r_\varepsilon > 0,2\text{mm}$ esetén már nagyban eltér a másodfokútól, illetve $0,2\text{mm}$ -es rádiusznál megállapított együtthatók egész számmal osztott értékétől. A különböző D értékek vizsgálatakor a $D=6$ érték adta a legjobb közelítést, ami $r_\varepsilon=0,4\text{ mm}$ -nél elfogadható, azonban $r_\varepsilon=0,8\text{mm}$ már csak bizonyos megkötésekkel tekinthető jó eredménynek.

$$R_{Z_{\text{számolt}}} = \frac{(Af + B)^2 + C}{5 \cdot r_\varepsilon} \quad (\text{IV.8.})$$

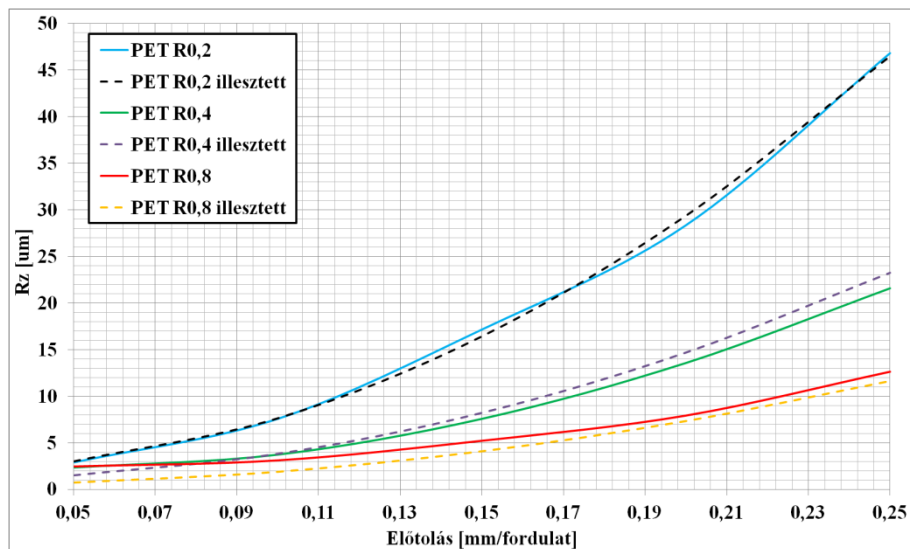
Plastic	r_ε [mm]	D	R^2
PP	0,2	5	0,9994
	0,4		0,9217
	0,8		0,9032
PET	0,2	5	0,9986
	0,4		0,9794
	0,8		0,8876
POM	0,2	5	0,9999
	0,4		0,9322
	0,8		0,9274
PVC	0,2	5	0,9999
	0,4		Tépett felület
	0,8		Tépett felület
PC	0,2	5	0,9878
	0,4		0,275
	0,8		0,2798
PC Módosított	0,2	6	0,9174
	0,4		0,8611
	0,8		0,6283

IV.11. táblázat. Nagyobb csúcsrádiuszú lapkák hatása

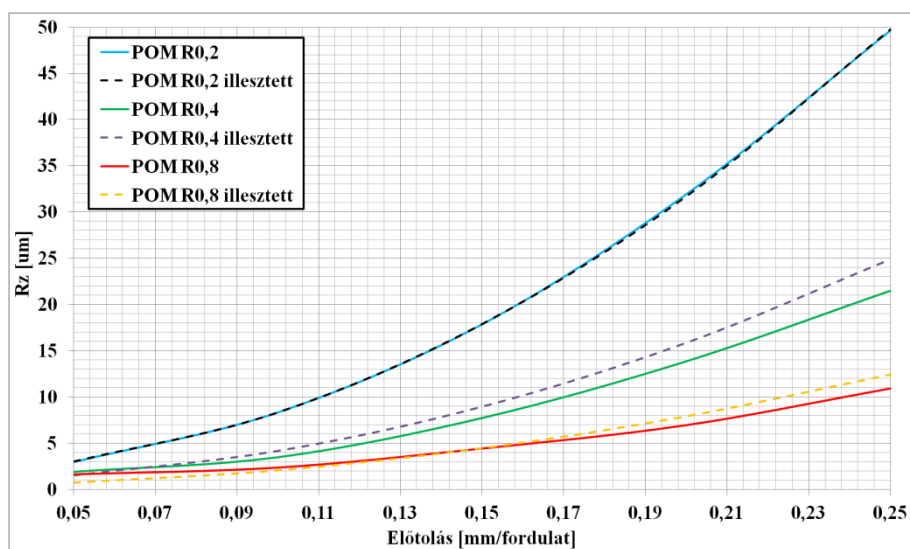
A megállapított függvények illeszkedését mutatja be a következő, IV.52-IV.55. ábra.



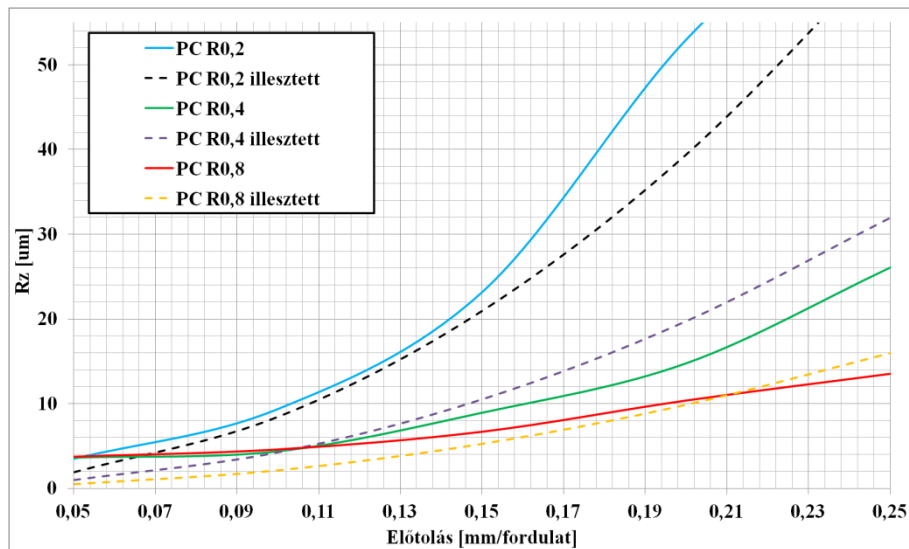
IV.52. ábra. Az illesztett függvények megjelenítése



IV.53. ábra. Az illesztett függvények megjelenítése



IV.54. ábra. Az illesztett függvények megjelenítése



IV.55. ábra. Az illesztett függvények megjelenítése

IV.11.4. A hőre lágyuló műanyagokra optimált Bauer-összefüggés általánosítása

Az IV.10. táblázat adataiból látszik, hogy az értékek ugyan műanyagonként eltérnek, de az A érték egy 30 körüli, B érték egy -1 és 1 közötti, a C pedig egy 0 és 4 közötti szám. A Bauer képlet nagy előnye, hogy felhasználásával nagyon könnyen számítható a felületi érdesség. A következő pontban az A, B, C értékekre egy átlagos, azonban mérési pontokra jól illeszkedő függvényt keresek. A D értéket 5-nek választva a PC kivételével megfelelő pontosság érhető el, a többi együtthatót viszont anyagonként külön-külön állapítottam meg. A paraméterek optimalálása az összes elérhető mérés (csúcsrádiusz és előtolással kapcsolatos mérések is) adatait felhasználva az alábbi optimum értékek adódnak:

$$A=29,6586 \quad B=-0,8215 \quad C=4,9019 \quad D=4,8466$$

Ahol a tapasztalati korrelációs index négyzete: $R^2=0,956$. Az egyszerűbb számításhoz azonban fontos lépés, hogy a kapott értékek egyszerűsítése a következők szerint;

$$A'=30 \quad B'=-0,8 \quad C'=5 \quad D'=5$$

Ahol az $R^2=0,956$ értékű marad, így a kapott eredményeket nem „rontottam el”. Az optimalizált Bauer-összefüggés a következő formában írható fel (IV.9.) szerint;

$$Rz_{számolt} = \frac{(30f - 0,8)^2 + 5}{5 \cdot r_\epsilon} \quad (IV.9.)$$

Az értékeket visszaellenőrizve az egyes műanyagokra, valamint az eredeti Bauer formula illeszkedését vizsgálva írható fel a IV.12. táblázat. A Bauer-formula alaphelyzetben 0,74-es tapasztalati korrelációs indexszel bír, míg az optimált felírásakor 0,92-es tapasztalati korrelációs index számítható. A fejezet elején meghatározott célt elérve, hőre lágyuló műanyagokra alkalmazható, nagypontosságú felületi érdességet leíró összefüggést megállapítva.

Alapanyag	r_ϵ	R^2 - Bauer	R^2 - opt. Bauer
PP	0,2	0,88	0,99
PVC	0,2	0,90	0,99
PET	0,2	0,94	0,97
PPSU	0,2	0,59	0,84
PE	0,2	0,67	0,92
PA6	0,2	0,93	0,96
PEEK	0,2	0,76	0,95
POM ELS	0,2	0,91	0,98
PEI	0,2	0,53	0,79
PC	0,2	0,52	0,76
POM	0,2	0,89	0,99
PP	0,4	0,96	0,92
PP	0,8	0,64	0,95
PET	0,4	0,97	0,91
PET	0,8	0,70	0,97
POM	0,4	0,97	0,91
POM	0,8	0,92	0,93
PC	0,4	0,82	0,99
PC	0,8	0,09	0,69
Átlag		0,74	0,92

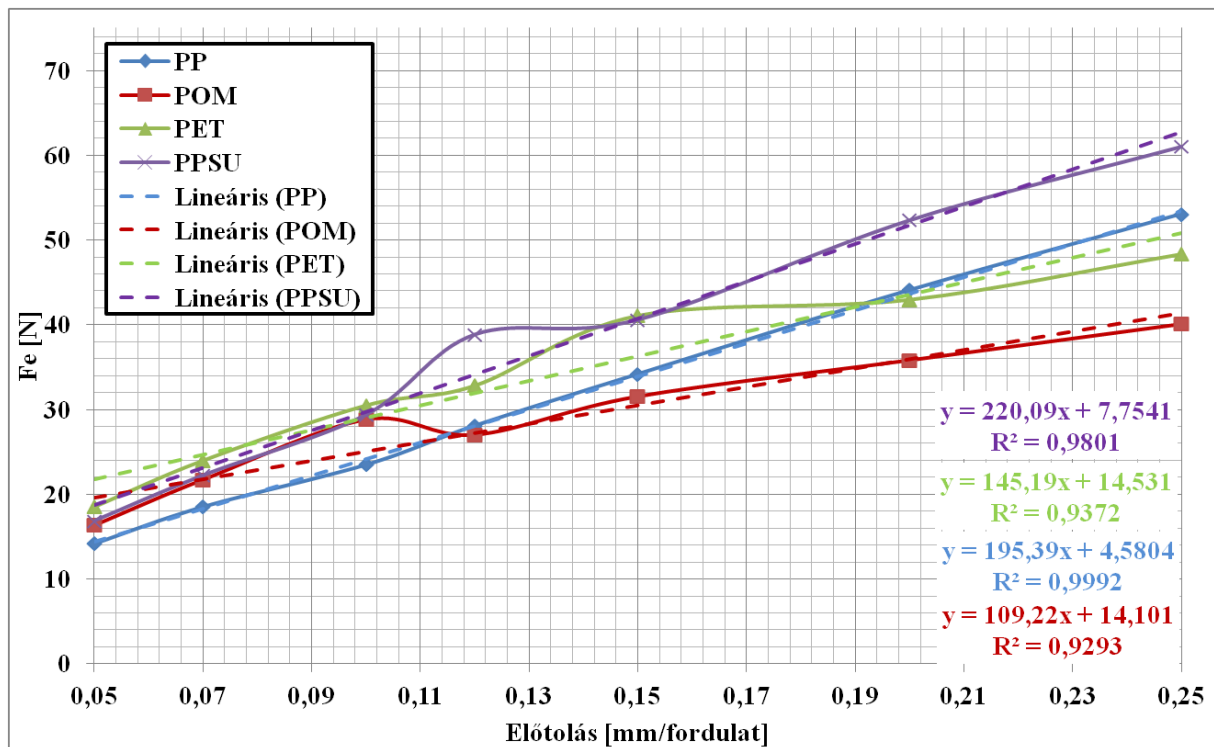
IV.12. táblázat. Az optimalizált Bauer-formula alkalmassága

IV.12. A fajlagos forgácsolóerő meghatározása hőre lágyuló műanyagoknál

A 10. pontban összefoglalt, a forgácsolóerőt leginkább befolyásoló tényezőket elemezve megállapítható, hogy az előtolás, illetve a fogásvétel határozza meg leginkább az erő értékét. Korábban a (II.1.) képletben felírtam a forgácsolóerő általános képletét, ahol szintén a fogásvétel, valamint az előtolás szerepel a forgácsolóerővel lineáris összefüggéssel, valamint a konstans taggal megszorozva, ami a fajlagos forgácsolóerő, egy mérések alapján megállapított anyagjellemző. A következőkben megvizsgálom, hogy a lineáris összefüggés mennyire igaz műanyagok esetén, és a forgácsolóerő általános képletét alakítom át hőre lágyuló műanyagokra.

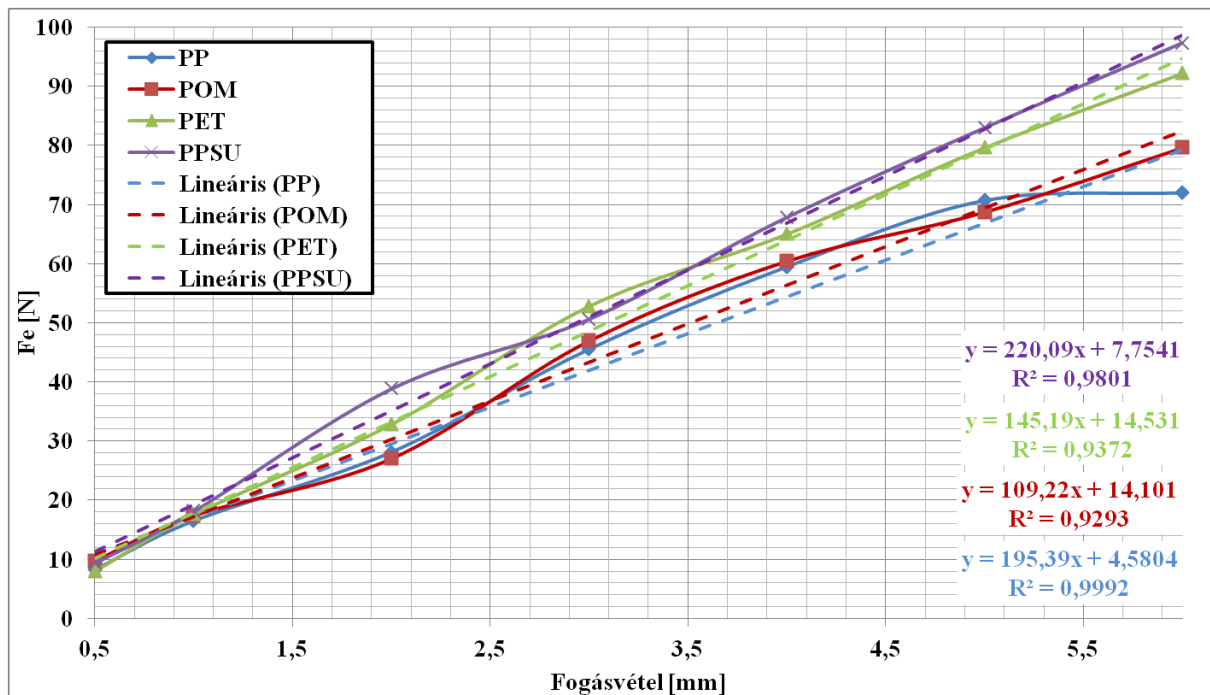
Végül minden vizsgált műanyagra megállapítok egy elfogadható pontosságú fajlagos forgácsolóerőt. A IV.56. ábrán látható grafikonokból jól látszik, hogy az előtolás és a forgácsolóerő között valóban lineáris az összefüggés, arra egy, a (IV.10.) képletben szereplő függvény rendkívül jó korrelációval illeszthető.

$$F_e = \alpha \cdot (a \cdot f) + \beta \quad (IV.10.)$$



IV.56. ábra. A forgácsolóerő és az előtolás összefüggése

A IV. 57. ábrán megfigyelhető a forgácsolóerő függése a fogásvételtől. Az előtolásnál is alkalmazott lineáris összefüggéssel itt is jól leírható a forgácsolóerő. A mérési pontokra illesztett lineáris függvény 1-hez nagyon közeli, jó korrelációt ad.



IV.57. ábra. A forgácsoló erő és a fogásvétel összefüggése

Mivel mindkét paraméternél lineáris a kapcsolat, ezét a következőkben a kettő szorzatával foglalkozom tovább, mint bemeneti paraméter, amivel a forgácsolóerő elfogadható pontossággal megállapítható. A felületi érdességhez hasonlóan jelen fejezetben is a PP próbatestekhez tartozó mérési adatsoron keresztül mutatom be az egyenlet felírásának lépéseit. A keresett forgácsolóerő eredőjére a (IV.10)-ben látható alakban keresek egyenletet. A két együtthatóra a következő egyenletek írhatók fel, ahol a fogásvétel és az előtolás szorzatát x_i -vel, az eredő forgácsoló erőt pedig y_i -vel jelölöm:

$$\alpha = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (IV.11.)$$

$$\beta = \bar{y} - \alpha \cdot \bar{x} \quad (IV.12.)$$

A számításhoz használt adatokat tartalmazza a IV.13. táblázat. A táblázatból kiszámítható a mind az α , mind a β értéke PP-re vonatkoztatva. A képletbe visszahelyettesítve számítható ki az alábbi két érték:

$$\alpha=103,37$$

$$\beta=3,94$$

Előtolás [mm/fordulat]	Fogásvétel [mm]	$y_i = F_e$ [N]	$x_i = a \cdot f$ [mm ² /ford.]	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$
0,05	2	14,22	0,1	-0,219	-22,649	4,950	0,048
0,07	2	18,56	0,14	-0,179	-18,312	3,270	0,032
0,1	2	23,52	0,2	-0,119	-13,352	1,583	0,014
0,12	2	28,11	0,24	-0,079	-8,757	0,688	0,006
0,15	2	34,20	0,3	-0,019	-2,668	0,050	0,000
0,2	2	44,09	0,4	0,081	7,218	0,588	0,007
0,25	2	53,05	0,5	0,181	16,178	2,935	0,033
0,12	0,5	8,26	0,06	-0,259	-28,612	7,398	0,067
0,12	1	16,49	0,12	-0,199	-20,379	4,047	0,039
0,12	2	28,11	0,24	-0,079	-8,757	0,688	0,006
0,12	3	45,52	0,36	0,041	8,653	0,358	0,002
0,12	4	59,44	0,48	0,161	22,575	3,644	0,026
0,12	5	70,64	0,6	0,281	33,772	9,504	0,079
0,12	6	71,96	0,72	0,401	35,090	14,086	0,161
Átlag		36,868	0,319				
Összeg						53,79	0,5204

IV.13. táblázat. A forgácsoló erő képletéhez használt adatok

A (IV.11) és (IV.12) képletekből kapott értékeket (IV.10)-be helyettesítve kapom meg a (IV.13) összefüggést, amiből kiszámolható a forgácsoló erő értéke PP esetén.

$$F_{e,PP} = 103,37 \cdot a \cdot f + 3,94 \quad (IV.13.)$$

Fontos azonban megjegyezni, hogy a konstans taggal bővített egyenlet még nem hasonlít a (II.1)-ben látható alakra. Zérus előtolás, vagy fogásvétel esetén is ad erő értéket, ami elméletileg nem lehetséges. Ezért a következő esetben nem a legjobban illeszkedő lineáris, hanem egy, az origón átmenő lineáris egyenest keresek a (II.1)-hez hasonló alakú, (IV.14.) alakban.

$$F_e = \kappa_c \cdot a \cdot f \quad (IV.14.)$$

A kapott szorzó tényezőt, amely egyenértékű lesz a fajlagos forgácsolóerővel jelen esetben κ_c -vel jelölöm. A (IV.14.) egyenlet együtthatójára a következő egyenlet írható fel, ahol a fogásvétel és az előtolás szorzatát az előzőekhez hasonlóan x_i -vel, az eredő forgácsolóerőt pedig y_i -vel jelölöm:

$$\kappa_c = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum x_i^2} \quad (IV. 15.)$$

A számításhoz szükséges adatokat a IV.14. táblázat tartalmazza:

Előtolás [mm/fordulat]	Fogásvétel [mm]	$y_i = F_e$ [N]	$x_i = a \cdot f$ [mm ² /ford.]	$x_i \cdot y_i$	x_i^2
0,05	2	14,22	0,1	1,422	0,010
0,07	2	18,56	0,14	2,598	0,020
0,1	2	23,52	0,2	4,703	0,040
0,12	2	28,11	0,24	6,747	0,058
0,15	2	34,20	0,3	10,260	0,090
0,2	2	44,09	0,4	17,634	0,160
0,25	2	53,05	0,5	26,523	0,250
0,12	0,5	8,26	0,06	0,495	0,004
0,12	1	16,49	0,12	1,979	0,014
0,12	2	28,11	0,24	6,747	0,058
0,12	3	45,52	0,36	16,387	0,130
0,12	4	59,44	0,48	28,533	0,230
0,12	5	70,64	0,6	42,384	0,360
0,12	6	71,96	0,72	51,810	0,518
Átlag		36,868	0,319		
Összeg				218,221	1,941

IV.14. táblázat. A forgácsoló erő egyszerűsített képletéhez használt adatok

A IV.14. táblázat adataiból (IV.15.)-be helyettesítve kiszámítható κ_c , ami PP esetén a következő értékű:

$$\kappa_c = 112,42$$

Amiből PP-re felírható a következő (IV.16.) egyenlet:

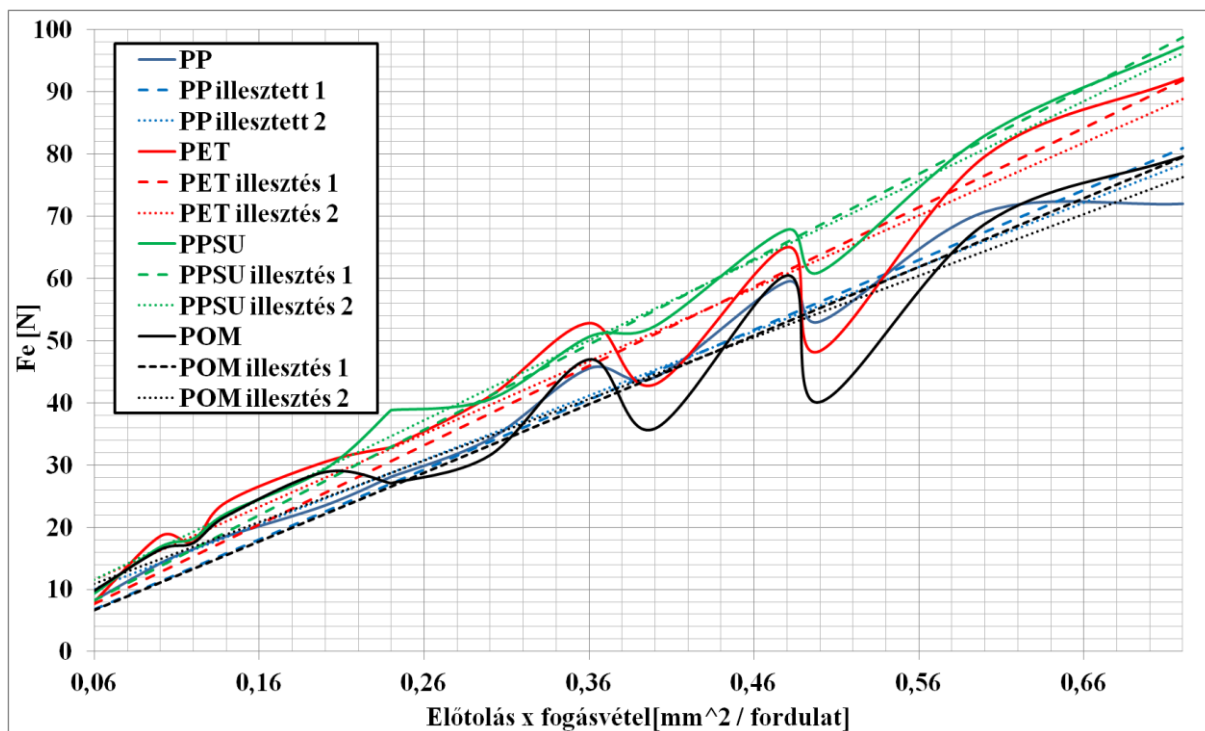
$$F_{e,PP} = 112,42 \cdot a \cdot f \quad (IV. 16.)$$

A kapott adatok alapján kiszámítható és ábrázolható mindkét alakban felírt függvény, valamint a valóságban mért értékek, összehasonlítás céljából. A PP-re vonatkozó adatok szerepelnek a IV.15. táblázatban.

Előtolás [mm/fordulat]	Fogás [mm]	F eredő [N]	Előtolás·fogásvétel [mm ² /fordulat]	F illesztés 1 ($F = \kappa_c \cdot a \cdot f$)	F illesztés 2 ($F = \alpha \cdot a \cdot f + \beta$)
0,05	2	14,22	0,1	11,24	14,277
0,07	2	18,56	0,14	15,736	18,4118
0,1	2	23,56	0,2	22,48	24,614
0,12	2	28,11	0,24	26,976	28,7488
0,15	2	34,20	0,3	33,72	34,951
0,2	2	44,09	0,4	44,96	45,288
0,25	2	53,0	0,5	56,2	55,625
0,12	0,5	8,26	0,06	6,744	10,1422
0,12	1	16,49	0,12	13,488	16,3444
0,12	2	28,11	0,24	26,976	28,7488
0,12	3	45,52	0,36	40,464	41,1532
0,12	4	59,44	0,48	53,952	53,5576
0,12	5	70,64	0,6	67,44	65,962
0,12	6	71,96	0,72	80,928	78,3664
Tapasztalati korrelációs index négyzet				0,967	0,977

IV.15. táblázat. A PP-re illesztett függvények értékei

Hogy teljesebb képet kapjak, a PP-n kívül felhasználjuk azokat az agyagokat is, ahol változó fogásvétellel és előtolással végeztem méréseket. A grafikus megjelenítés mellett azonban fontos, hogy az általam illesztett függvény pontosságát egy számszerű adattal, a felületi érdességnél is használt tapasztalati korrelációs indexszel is jellemezzem. A számítás módja megegyezik a felületi érdességnél bemutatott módszerrel, így ezt külön nem részletezem. A kapott eredményeket a IV.16. táblázatba gyűjtöttem össze. A grafikonokat a IV.58. ábrán jelenítettem meg, ahol az „illesztett 1” az egyszerűbb, (IV.14.)-ban felírt alakú, míg az „illesztett 2” grafikonok a (IV.10) –ben felírt konstanssal bővített közelítést jelentik. Az ábrát tekintve a függvény pár kiugráson kívül jól illeszkedik, amit a IV.16 táblázatban szereplő magas (1-hez közeli) tapasztalati korrelációs index négyzetek is alátámasztanak. A lokális szélsőértékek annak köszönhetőek, hogy a független változó egy közvetett, számított érték, két mennyiség szorzata. A IV.56. és IV.57. ábrában is megjelenő kisebb kiugrások még hangsúlyosabban jelennek meg. Fontos megállapítás, hogy a (IV.14)-ben felírt egyszerű lineáris kapcsolattal is kellő pontossággal állapítható meg a forgácsolóerő értéke a négy vizsgált anyag esetén.



IV.58. ábra. Az illesztett függvények és a mért adatok forgácsoló erő esetén

Anyag	Illesztés 1		Illesztés 2		
	κ_c [N/mm ²]	R ²	α [N/mm ²]	β [N]	R ²
PP	112,4	0,967	103,37	3,94	0,977
PET	127,6	0,937	117,06	4,58	0,947
PPSU	137,1	0,982	128,26	3,86	0,988
POM	110,4	0,9	99,01	4,98	0,917

IV.16. táblázat. A függvényillesztés kiterjesztése más anyagokra

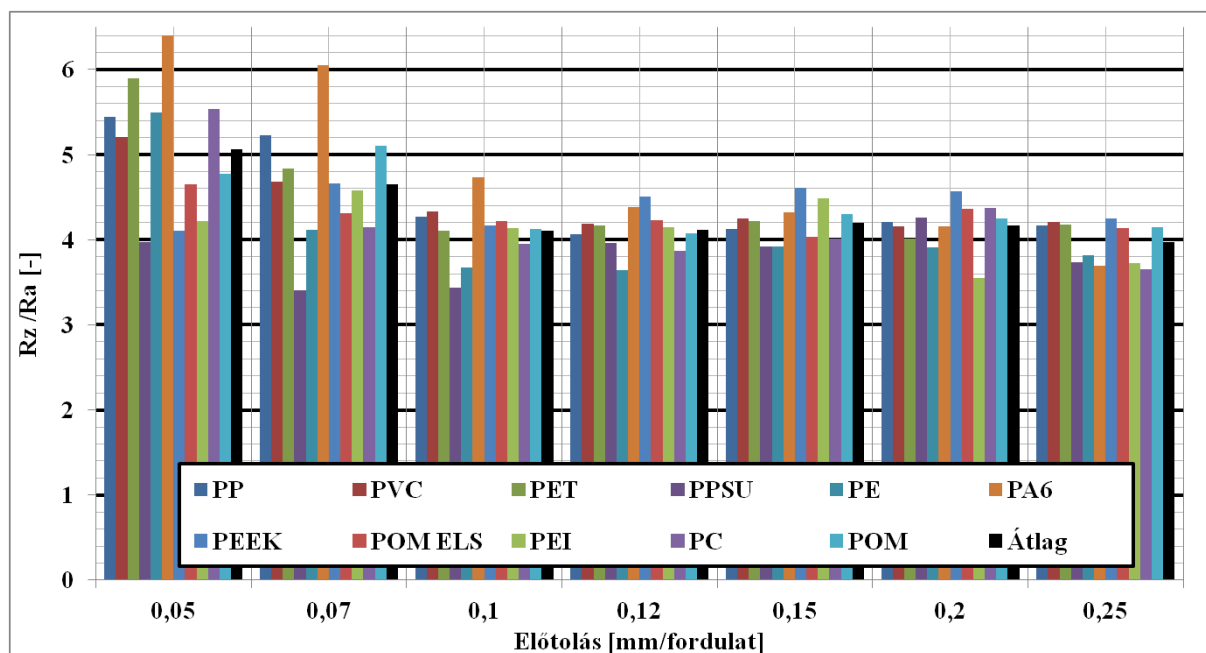
Az IV.16. táblázatban szereplő anyagoknál rendelkezésre álltak mind különböző fogásvétellel, mind különböző előtolással végzett mérések, így ezeknél pontosabb függvény képezhető. Az előtolással kapcsolatos vizsgálatoknál azonban többféle próbatestet használtam, ezek értékeit a IV.17. táblázat tartalmazza. Fontos azonban megjegyezni, hogy itt a fogásvétel állandó ($a=2\text{mm}$), így a kapott eredményeket csak az anyagok összehasonlításaként jelenítem meg. A táblázat adataiból jól látszik, hogy az anyagok nagy részénél jól leírható a forgácsolóerő értéke lineáris közelítéssel, még az egyszerűbb (IV.14.)-ben foglalt alakban is. Egyes anyagoknál, mint Pl. a PEI vagy PC; az egyszerűbb alak nem, de a konstanssal kiegészített formula már jóval pontosabb értéket ad. Kivételként említhető meg a PEEK, ahol az illesztett lineárisnál az R² értéke egy rendkívül alacsony szám, így kijelenthető, hogy erre az anyagra nem, **de a többi anyagra sikerrel állapítottam meg a forgácsolóerőt megfelelő pontossággal leíró függvényt és fajlagos forgácsoló erő értékeket.**

Anyag	Illesztés 1		Illesztés 2		
	κ_c [N/mm ²]	R ²	α [N/mm ²]	β [N]	R ²
PVC	52	0,947	19,64	10,81	0,999
PE	52,5	0,997	43,87	2,87	0,999
PA6	149,1	0,945	123,06	8,68	0,996
PEEK	Nem értelmezhető, R ² =0,14				
POM ELS	87,9	0,79	70,32	5,87	0,814
PEI	157,5	0,556	98,78	19,6	0,799
PC	117,8	0,572	77,65	13,4	0,832

IV.17. táblázat. Az előtolással kapcsolatos mérésekből megállapított fajlagos forgácsoló erők

IV.13. Az Ra és Rz paraméterek közötti összefüggések

A II.1.3 pontban, a felületi érdesség definiálásával foglalkozó fejezetben említésre került Palásti-Kovács és társainak [37] kutatása (ld. korábban). Elemezték az Ra és Rz közötti arányszám függését a forgácsolási technológiától, ahol 5,36 és 9,2 közötti számokat állapítottak meg. Ebben a pontban megvizsgálom, hogy a hőre lágyuló műanyagok esztergálásakor ez a szám mekkora értékű lehet, illetve mennyire függ az egyes forgácsolási jellemzőktől. Különböző előtolásokkal végzett forgácsolási próbák felületi érdesség eredményeinek kiértékelését mutatja a IV.59. ábra.

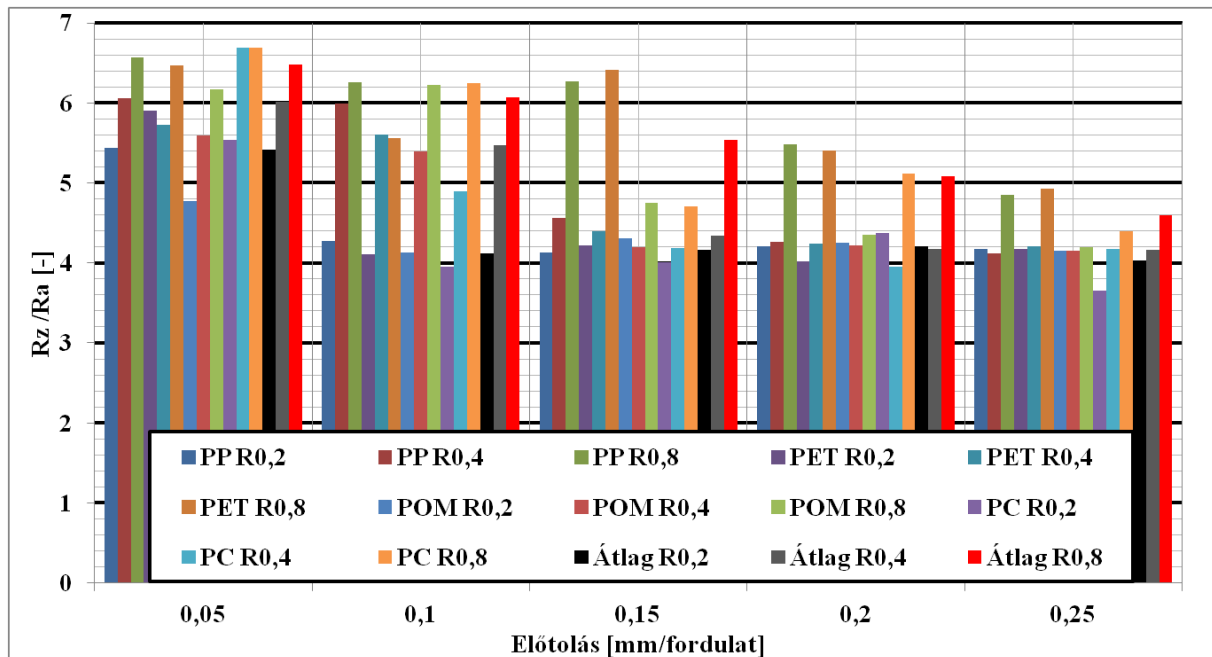


IV.59. ábra. Az Rz és Ra aránya különböző előtolások esetén

Az ábrát megvizsgálva megállapítható, hogy az Rz és Ra aránya a korábban tapasztaltakhoz hasonlóan itt is nagyban függ a műanyag típusától, és ez a különbség főleg kisebb előtolásoknál nevezetű jelentősnek. Jól látszik, 0,05 – 0,07 mm/fordulatos előtolásnál rendkívül nagy szórás tapasztalható ez egyes műanyagoknál megállapított hányadosnál. A felírható arányszám kisebb előtolásoknál jóval nagyobb, mint magasabb előtolásoknál, 0,1 mm/fordulat felett már szinte beáll egy állandó értékre. Az anyagoként tapasztalható eltérés továbbra is megmarad, de jóval kisebb szórással. A legkisebb előtolásnál 5,1, majd 4,7 írható fel az Rz/Ra hányadosra. Ennél nagyobb előtolásnál 4,1-es értéket állapítható meg átlagként.

A felületi érdességet leginkább befolyásoló másik forgácsolási jellemző a lapka csúcsrádiusza volt, melynek hatását az Rz/Ra arányszámra mutatja be a IV.60. ábra. Jól látszik a korábban is megfigyelt hatás, hogy az alacsonyabb előtolásnál a Rz/Ra hányados magasabb, de külön meg kell említeni, hogy nagyobb csúcsrádiusú lapkával is növelhető ez a hányados. A 0,4 mm-es csúcsrádiusú lapkával is magasabb, de a 0,8 mm-es csúcsrádiusú lapkával határozottan magasabb a két érdességi paraméter közötti arányszám.

A legkisebb vizsgált, 0,05 mm/fordulatos előtolást nem nézve $r_\epsilon = 0,2\text{mm}$ esetén $Rz/Ra=4,1$ $r_\epsilon = 0,4\text{mm}$ esetén $Rz/Ra=4,5$ míg $r_\epsilon = 0,8\text{mm}$ esetén $Rz/Ra=5,3$ írható fel. A tapasztalati képletek közül az $Rz = 4,1 \times Ra$ alkalmazható legnagyobb pontossággal. Ha az előtolás nagyon kicsi (0,1 mm/fordulatonál kisebb), vagy ha az alkalmazott lapka csúcsrádiusza 0,2 mm-nél nagyobb, akkor az átváltást nagyobb arányszámmal kell számítani.



IV.60. ábra. Az Rz és Ra aránya különböző csúcsrádiusú lapkák esetén

A többi vizsgált paraméter esetén nem jelentkezik egyértelmű korreláció, pl. fogásvétel és forgácsolási sebesség esetén is végig egy 4,1 körüli átlagos érték írható fel. A hűtőkenőfolyadék, valamint az élelhelyezési szögnek is mérsékelt hatása van. A kopás hatására a felírt hányados kismértékben növekszik ugyan, de ez a két szélsőérték között is az arányszám 0,2-vel való növekedését eredményezi.

IV.14. A hőkezelési paraméterek vizsgálata

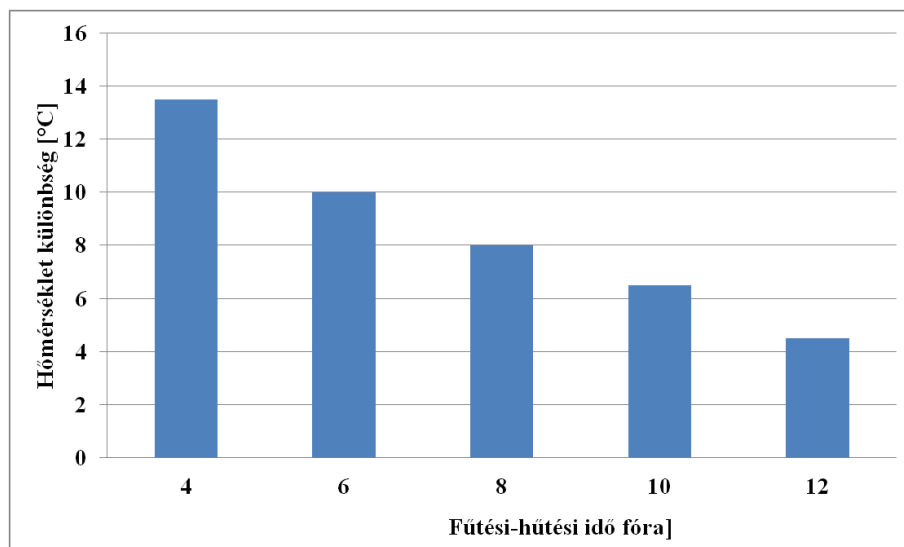
A hőkezelések vizsgálata során a korábban bemutatott módon, a valóságoshoz nagyban hasonló mérési módszert alkalmaztam. A próbatest külső hőmérséklete, azaz a hőkezelő kemence belső hőmérséklete és a munkadarab belsejében mérhető hőmérséklet közötti különbséget vizsgálom. A cél, hogy ezt a lehető legalacsonyabbra szorítsam. A két hőmérséklet közötti különbséget vizsgálom a munkadarab vastagsága, és a fűtési/hűtési sebesség függvényében is. A mintavételezési idő 10 másodperc, az egyes grafikonok ezért „lépcsős” formájúak.

A vizsgálatok első felében a falvastagság hatásaival foglalkozom, azaz a falvastagságot növelve hogyan változik a test egy külső pontja (maximális hőmérséklet) és a test legbelső pontja (minimális hőmérséklet) közötti eltérés értéke. A próbatest anyaga POM, 6 óra felfűtés, 2 óra hőntartás, 6 óra lehűtés programot alkalmaztam, ahol az elérendő hőmérséklet 155°C volt. A IV.62. ábra a különböző falvastagságú próbatestek belső pontjának hőmérsékletét mutatja be. A vastagabb próbatestek lassabban melegsznek fel, a hőkezelési hőmérsékletet, vagy az annál pár °C -al alacsonyabb hőmérsékletet később érik el. Fontos megjegyezni, hogy a falvastagság növelésével a belső pont hőmérséklete egyre jobban eltér a beállított maximális hőmérséklettől. A hűtési szakaszban a próbatest belseje lassabban hűl ki, így lehetséges, hogy a kemencéből kivett próbatestek külső felülete szobahőmérsékletű, belseje azonban több °C -al is melegebb, ami a minél lassabb hűlés szempontjából még előnyös is. A falvastagság növekedésével a próbatest belső pontjának hőmérséklet különbsége a kemence hőmérsékletéhez viszonyítva folyamatosan nő. A hőmérsékletkülönbség maximuma a felfűtési szakasz végén van. A felfűtés nagy részében ez 2-3°C körüli értéken marad, így nagyobb falvastagságú próbatest esetén nem feltétlenül szükséges a teljes felfűtési sebességet lassítani. Elegendő azt a fűtési szakasz végén visszalassítani, hogy a hőmérsékletkülönbség érték csökkenjen. a IV.18. táblázatban számszerűsítve is megjelennek ezek az adatok.

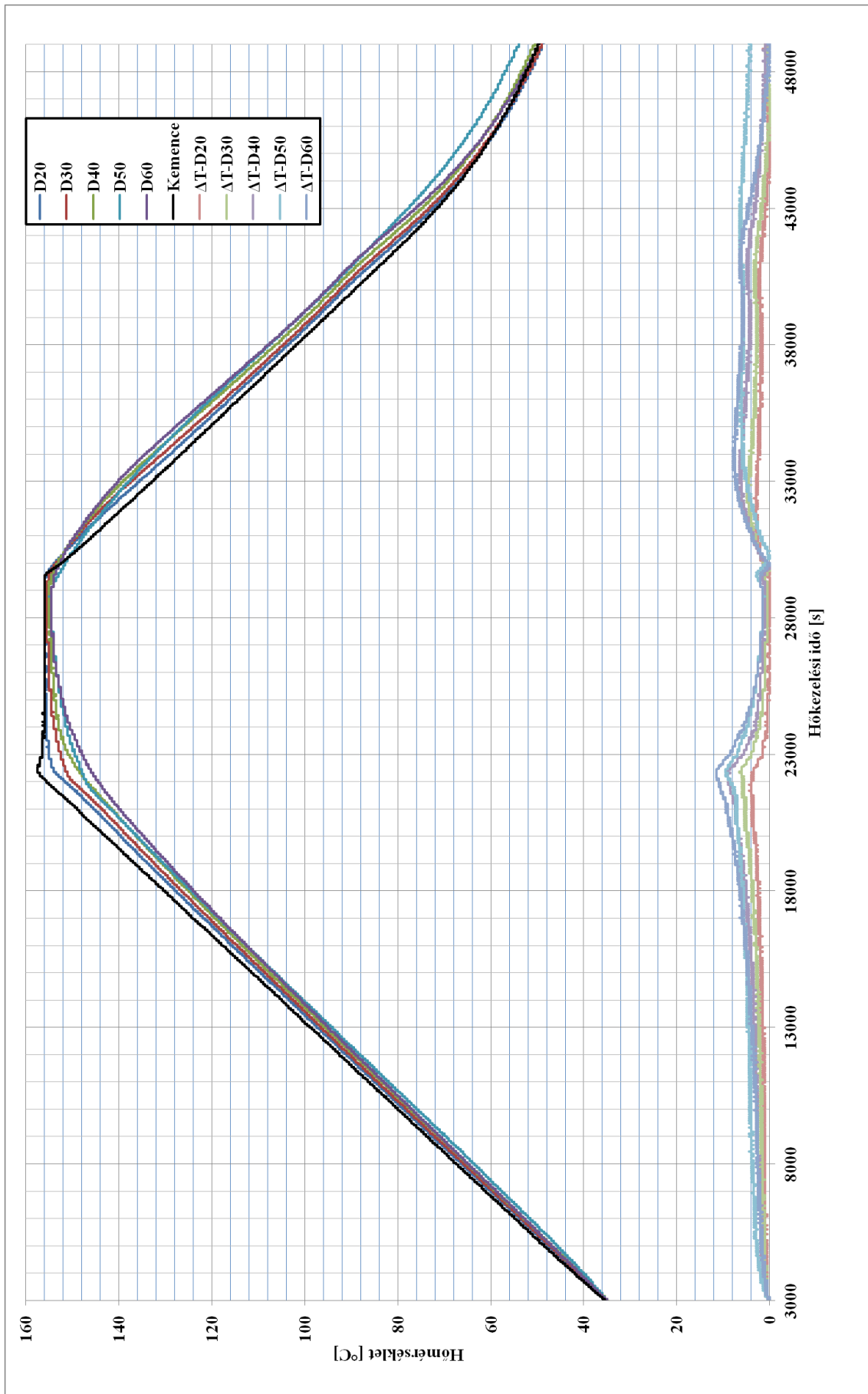
Átmérő [mm]	20	30	40	50	60
$\Delta T_{\max.}$ [°C]	5	6,5	9	9,5	11,5
$T_{\text{belső}}$ [°C]	156	155,5	155	155	154,5
T_{kemence}	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5
Fűtési/hűtési idő [óra]	4	6	8	10	12
$\Delta T_{\max.}$ [°C]	13,5	10	8	6,5	4,5
T_{kemence} [°C]	157,5	157,5	157	157	157
$T_{\text{belső}}$ [°C]	155	155,5	156	155,5	156
Össz. idő [óra]	10	14	18	22	26

IV.18. táblázat. A hőmérséklet különbségek alakulása különböző falvastagságoknál és fűtési/hűtési sebességeknél

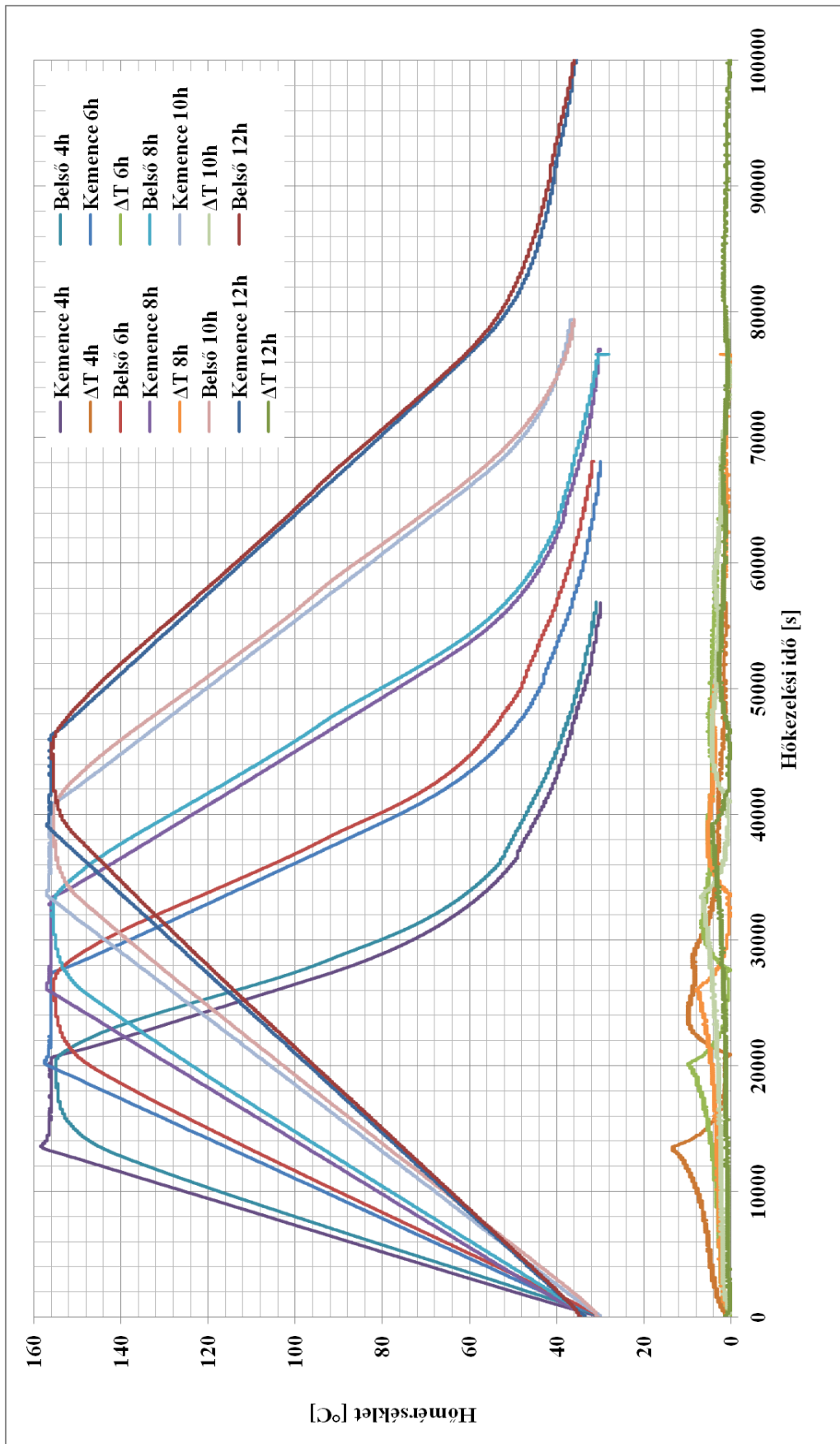
A vizsgálatok második felében a fűtési és hűtési sebesség hatását vizsgáltam. Az alkalmazott próbatest 40 mm-es átmérőjű POM, a maximum hőmérséklet minden esetben azonos, ahogy a 2 órás hőntartás is. A vizsgálatok során a fűtési-hűtési idő növelésével, azaz lassabb felfűtéssel és lehűtéssel a kemence és a darab belseje közötti hőmérséklet különbség csökken, ennek értékeit a IV.18. táblázat tartalmazza. Ahogy korábban tapasztaltam a különbség maximuma a felfűtési szakasz végén mérhető. Kivehető az is, hogy a darab belsejében elérhető maximális hőmérséklet a sebességtől független. A IV.61. ábrán mutatom be a hőmérsékletkülönbség függését a fűtési/hűtési sebességtől, míg a IV.63. ábrán a lefuttatott hőkezelési programokat jelenítettem meg. Összességében tehát elmondható, hogy a hőmérséklet különbség alapvetően a fűtési sebességtől függ, mivel a hőmérséklet különbség maximuma mindig a felfűtés utolsó szakaszában jelentkezett. A folyamat gyorsításánál a hűtési sebességet érdemes növelni. A falvastagság hatásának vizsgálatokor pedig kijelenthető, hogy a felfűtés utolsó szakaszában érdemes a sebességet csökkenteni, hogy a darabban a hőmérséklet eltérés mécséklődjön. Tényleges javaslattal élve, a vizsgált POM műanyag esetén érdemes 8 vagy vastagabb darabok esetén a 10 órás felfűtést választani, de olyan hőkezelési programmal, ahol az említett visszalassítás 125°C felett megtörténik. Ekkor a 125°C-ról 155°C-ra való felfűtéshez 3 óra, azaz 10°C/óra fűtési sebesség beállítása javasolt.



IV.61. ábra. A felfűtési sebesség hatása a hőmérséklet különbségre



IV.62. ábra. Különböző falvastagságú próbatestek hőkezelése



IV.63. ábra. Különböző falvastagságú próbatestek hőkezeltése

V. ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezés bevezetésében megvizsgáltam, hogy valós ipari környezetben melyek azok a problémák, amelyek hőre lágyuló műanyagok esztergálásakor leggyakrabban előfordulnak. Több évnyi adatokat elemezve az észlelt nehézségek két fő csoportba oszthatók; egyrészt az ütemezési, folyamatmenedzsment gondokra, másrészt pedig a forgácsolási folyamat ismeretének hiányából adódó gondokra. Az utóbbi csoporton belül szintén két részre osztottam a tapasztaltakat, egy nagyobb része a felületi érdességgel kapcsolatos hibákra, másik része pedig a deformációs (kihajlás, ovalítás, alakhiba, stb.) gondokra. Főleg a forgácsolóerővel köthető össze, hiszen a munkadarab megszorításához szükséges erő is ennek tudatában határozható meg. Másrészt pedig az alapanyag vetemedésével magyarázhatók. Ennek ismeretében határoztam el, hogy vizsgálom a forgácsolt felületi érdességet és a forgácsolóerőt befolyásoló tényezőket, valamint elemzem, hogy a munkadarab vetemedését mi okozhatja. Az elméleti részben először is leírtam a folyamatot alapjában jellemző forgácsoláselméleti alapokat, főleg esztergálásra szorítva, hiszen ezzel a forgácsolási módszerrel vizsgáltam a fenn említett paramétereket. Ezt követően pedig az aktuális, forgácsolással kapcsolatos kutatásokat, cikkeket elemeztem. Az irodalomkutatás során fény derült arra, hogy rendkívül kevés azon irodalmak mennyisége, ami közvetlenül köthető a hőre lágyuló műanyagok esztergálásához. Legtöbbje fémek forgácsolásával foglalkozik, ami műanyagokra nem ültethető át közvetlenül, azonban a vizsgálati módszerek, kiértékelések jó összehasonlítási alapot adnak. Az elméleti rész egy másik fontos eleme a belső feszültségekkel foglalkozó fejezetek, az alapanyag nem kívánatos deformitásáért főleg ez felel. Itt kerül említésre a hőkezelés, ami műanyagoknál nem a fizikai és mechanikai tulajdonságok (keménység, szívósság, stb.) befolyásolására szolgál, sokkal inkább feszültségcsökkentő szerepe van.

Az alkalmazott módszerek bemutatásánál felsorolt műanyagokat a gyakorlati tapasztalat alapján választottam, ezek a cégnél leggyakrabban előforduló anyagok, de tartalmazzák a leggyakrabban forgácsolt anyagokat. Minden egyes műanyagot, minden egyes paraméter szerint nem vizsgáltam, de az egyes vizsgálatokat mindig többféle műanyagon végeztem el. Ahogy azt az eredmények is mutatták, nem lehet a műanyagokat egyként kezelni, az egyes típusok más-más viselkedést mutatnak. A felületi érdesség mérésére az érintéses módszert választottam, ami ugyan időigényes, de megbízható, gyakori módszer az érdességi paraméter meghatározására. Az átlagos felületi érdesség, valamint az érdesség magasság paramétereket mértem, hiszen ezek a leggyakrabban előforduló, a felületet leíró értékek. Az erőmérés esetén egy piezoelektromos mérőeszközt alkalmaztam. Az irodalomkutatás során, a forgácsolóerővel kapcsolatos kutatások döntő többségében találkoztam ezzel a módszerrel. A hőkezelési mérések esetén egyszerű, hőelemes szenzorral ellátott USB-adatgyűjtőt alkalmaztam, a próbatestek szintén forgácsolással készültek.

A kísérleti részben különböző a forgácsolási paraméterekkel, különböző szerszámozási konfigurációkkal, valamint más, a forgácsolást befolyásoló egyéb jellemzőkkel vizsgáltam a felületi érdesség, valamint a forgácsolóerő alakulását hőre lágyuló műanyagok forgácsolásakor, melyek alapján a következő téziseket állapítom meg:

(1) A forgácsolási paramétereket tekintve kijelenthető, hogy a *fordulatonkénti előtolás hatással van mind a forgácsolóerő, mind a forgácsolt felületi érdesség értékre*, így ennek növelésével mindkét kimeneti érték nő. A *forgácsolási sebességet többféle értéken vizsgálva kismértékű változás* tapasztalható, de egyik változási érték sem domináns. A *fogásvétel növelése a felületi érdességet nem befolyásolja, a forgácsolóerőt azonban a többszörösére növeli*. [85]

(2) A szerszámozási paraméterek közül főleg a csúcsrádiust érdemes megemlíteni, ugyan a forgácsolóerőt nem befolyásolja, *de csúcsrádiusz növelésével a felületi érdesség jelentősen csökken. A forgácsolóerőre minimális, a felületi érdességre főleg csak kis előtolásoknál van hatása a lapka gyártmányának. Az élelhelyezési szög, illetve a csúcshelyezési szög* mind a forgácsolóerőre, mind a felületi érdességre 20%-os hatással bír, így nem *nevezhető döntően nagy befolyásoló tényezőnek*. Gyakorlati szempontból előnyösebb lehet a 95°-os főél elhelyezési szög, mivel így az oldalazás és a lépcsős kialakítás is megoldható. [86]

(3) A műanyagok forgácsolásánál legtöbbször *hűtő emulziót* alkalmaznak. Ezt a *levegőhűtéssel* összehasonlítva megállapítottam, hogy a *két hűtőközeg között nagy különbség nincs* a vizsgált műanyagok esetén. A hűtőemulzió alkalmazása kedvezőbb a jobb forgácselvezetés miatt, mivel műanyagok forgácsolásakor ez is kiemelten fontos. [86]

(4) *A lapka kopásával mind a forgácsolóerő, mind a forgácsolt felületi érdesség változik. A forgácsolóerő* mérése alkalmas kopás monitorozására, mert *a kopással arányosan nő*, és a mérés közvetlenül *forgácsolás közben alkalmazható*, a folyamat megszakítás nélkül. A két domináns kopástípus az élkopás, valamint a forgácsoló él kipattogzása. [84][86]

(5) A mérési tapasztalatokra támaszkodva megállapítottam, hogy a forgácsolt *felületi érdességet az előtolás és a lapka csúcsrádiusza határozza meg*. Ez az összefüggés az előtolással másodfokú kapcsolatot mutat, így a Bauer-formulát választottam és optimaláltam hőre lágyuló műanyagokra. *Megállapítottam az egyes műanyagokra külön-külön jellemző, és minden vizsgált műanyagnál kellő pontossággal alkalmazható formulát* is, amely jó illeszkedést mutat a mérési adatokkal. Ez alól kivétel a PC, ahol a csúcsrádiusz változása eltérő hatást mutat, illetve a PVC, ahol nagyobb csúcsrádiuszú lapka alkalmazása rendkívül rossz, tépett felületet eredményez. [83]

(6) *A forgácsolóerőre legjelentősebb hatása az előtolásnak, illetve a fogásvételnek van*. Ez a forgácsoláselmélet alapján várható, és a mérési eredmények is alátámasztják. A két jellemzőt külön-külön vizsgálva jó korreláció mutatkozik a lineárisan illesztett egyenessel, így *a kettő szorzatára is egy lineáris egyenes illesztettem. A szorzatban még egy, a hőre lágyuló műanyagokra általam megállapított fajlagos forgácsolóerő is szerepel*. Visszaellenőrzéssel igazoltam, hogy *kellő pontosságú összefüggést alkottam meg*. A fajlagos forgácsolóerő PEEK esetében nem határozható meg. [85]

(7) Az egyes forgácsolt felületet leíró paramétereket tapasztalati képletekkel gyakran számolják át egymásba. **Hőre lágyuló műanyagoknál az $Rz = 4,1 \times Ra$ alkalmazható**, de az arányszámot a **kisebb előtolás és a nagyobb csúcsrádiusz is felfelé tolja el.** [83]

(8) **A hőkezelések során a hőmérséklet eltérés maximuma a felfűtési szakasz végén mérhető, nagyobb falvastagságnál egyre nagyobb mértékben.** Ebben szakaszban lassítani kell a felfűtési sebességet. A felfűtési sebesség lassításával a próbatest külső és belső hőmérséklete közötti különbség számottevően csökken.

Összességében sikerült kellő elméleti háttér tükrében megállapítani a forgácsolt felületi érdességet és a forgácsolóerőt leginkább befolyásoló tényezőket különböző műanyagok esetén is. A mérési eredmények alapján a módosított Bauer formulával egy, a hőre lágyuló műanyagok esetén jól alkalmazható képletet alkottam meg a forgácsolt felületi érdesség előrejelzésére. A forgácsolóerő esetén kellően pontos fajlagos értékeket határoztam meg. Hőkezeléseknél bemutattam a műanyagok viselkedését, és megmutattam azt a szakaszt ahol a legnagyobb hőeltérés, ezáltal lehetséges belső feszültség keletkezik. **Az előzetes kutatásokban foglalt célokat sikerült elérnem az értekezés során.**

VI. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Buzási Lajosné: Magyarország műanyagipara 2015-ben. Polimerek 2. évfolyam 7. szám, 2016. július
- [2] Dr. Orbán Sylvia: A műanyagok világpiaci helyzete. Műanyagipari szemle, 6. évfolyam, 3. szám, 2009.
- [3] Czvikovszky – Nagy – Gaál: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006
- [4] Engineering plastics – The Manual. Anyagválasztási segédlet, Ensinger GmbH (<http://www.ensinger-online.com>, letöltve: 2014.12.06.)
- [5] Dr. Kalácska Gábor: Műszaki polimerekről gépészmérnököknek – alapismeret, technológia, tudomány. Quattroplat Kft., Gödöllő, 2017.
- [6] Dr. Bali János: Forgácsolás. Egyetemi tankönyv, Budapest, 1984
- [7] Dr. Bakondi Károly, Dr. Kardos Árpád: A gépgyártás technológiája – I. Forgácsolás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
- [8] Dr. Kovács Lajos szerk. : Műanyag zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [9] Dudás Illés: Gépgyártás-technológia I. – A gépgyártás technológia alapjai. Műszaki Kiadó, Budapest, 2009.
- [10] Dudás Illés: Gépgyártás-technológia II. – Forgácsoláselmélet, a technológiai tervezés alapjai. Műszaki Kiadó, Budapest, 2007.
- [11] Dudás Illés: Gépgyártás-technológia III. – Megmunkáló eljárások és szerszámaik. Fogazott alkatrészek gyártása és szerszámaik. Műszaki Kiadó, Budapest, 2011.
- [12] Etele Csanády, Endre Magoss: Mechanics of wood machining. Lővér-print Nyomdaipari Kft., Sopron, 2011.
- [13] dr. Sitkei György szerk. : A faipari műveletek elmélete. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Kft., Budapest, 1994
- [14] Dr. Füzes László, Dr. Kelemen Andorné: Műszaki műanyagok zsebkönyve. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
- [15] Dr. Antal Miklós: Műanyagok gépészeti alkalmazása. Nehézipari Műszaki Egyetem, Gépelemek Tanszék, 1987, Miskolc.
- [16] Sandvik Coromant Academy: Metal cutting theory training handbook. Digitális jegyzet, 2016.

- [17] Andó Mátyás: Felületi érdesség, jelzőszámok közötti kapcsolatok. Digitális jegyzet, 2010 (Letöltve: 2017.11.08)
- [18] Zhiyang Huang, Shaoije He, Zhuang Kejia, Xiaoming Zhang, Han Ding: An Analysis of Cutting Parameters, Coated Materials and Nose Radii on Residual stresses when Turning Inconel 718. *Procedia CIRP* 46 (2016) 368-371
- [19] Y. Kevin Chou, Hui Song: Tool Nose Radius Effects on Finish Hard Turning. *Journal of Material Processing Technology* 148 (2004) 259-268
- [20] P. Huang, W. B. Lee: Cutting Force Prediction for Ultra-precision Diamond Turning by Considering the Effect of tool edge radius. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 109 (2016) 1-7
- [21] Tugrul Özel, Tsu Kong Hsu, Erol Zeren: Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25 (2004) 262-269
- [22] Xiaobin Cui, Jingxia Guo, Jianxin Zheng: Optimization of geometry parameters for ceramic cutting tools in intermittent turning of hardened steel. *Materials and Design* 92 (2016) 424-437.
- [23] Bing Wang, Zhanqiang Liu, Qinghua Song, Yi wan, Zhenyu Shi: Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy. *Journal of Cleaner Production* 129 (2016) 292-304.
- [24] Thomas Baizeau, Sébastien Campocasso, Guillaume Fromentin, Frédéric Rossi, Gérard Poulachon: Effect of rake angle on strain field during orthogonal cutting of hardened steel with c-BN tools. *Procedia CIRP* 31 (2015) 166-171
- [25] Lin Jieqiong, Han Jinguo, Zhuo Xiaoqin, Hao Zhaopeng, Lu Mingming: Study on predictive model of cutting force and geometry parameters for oblique elliptical vibration cutting. *International Journal of Mechanical Sciences* 117 (2016) 43-52
- [26] Prekash Rao C.R., Bhagyashekar M.S., Narendravinswanath: Effect of Machining Parameters on the surface Roughness while turning particulate composites. *Procedia Engineering* 97 (2014) 421-431
- [27] A Mahamani: Influence of process parameters on cutting force and surface roughness during turning of AA2219 –TiB₂/ZrB₂ in-situ metal matrix composites. *Procedia Material Science* 6 (2014) 1178-1186
- [28] Junyun Chen, Qingliang Zhao: A model for predicting surface roughness in single-point diamond turning. *Measurement* 69 (2015) 20-30.

- [29] Bin Niu, Youliang Su, Rui Yang, Zhenyuan Jia: Micro-macro.mechanical model and material removal mechanism of machining carbon fiber reinforced polymer. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 111 (2016) 43-54
- [30] Renos Argyrou, Geoffrey A. Thompson, Seok-Hwan Cho, David W. Berzins: Edge chipping resistance and flexural strength of polymer infiltrated ceramic network and resin nanoceramic restorative materials. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 116 (2016) 397-403
- [31] H.Wang, S.To, C.Y. Chan: Investigation ont he influence of tool-tip vibration on surface roughness and its representetive measurement in ultra precision diamond turning. *International Journal os Machine & Manufacture* 69 (2013) 20-29.
- [32] Dr. C. J. Rao, Dr. D. Nageswara Rao, P. Srihari: Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. *Procedia Engineering* 64 (2013) 1405-1415.
- [33] Anupam Agrawal, Saurav Goel, Waleed Bin Rashid, Mark Price: Prediction of surface roughness during hard turning of Aisi 4340 steel (69 HRC). *Applied Soft Computing* 30 (2015) 279-286.
- [34] Hamdi Aouici, Mohamed Athmane Yallese, Kamel Chaoui, Tarek Mabrouki, Jean-Francois Rigal: Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement* 45 (2012) 344-353.
- [35] Richárd Horváth:, Ágota Drágelyi-Kiss: Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization. *Measurement* 65 (2015) 181-192
- [36] Meenu Gupta, Surinder Kumar: Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18 (2015) 70-81.
- [37] Béla Palásti-Kovács, Sándor Sipos, Szabolcs Bíró: The mysteries of the surface. First part: The characteristic features of the microgeometry of the machined surface. *Acta Polytechnica Hungarica* 11 (2014) 5-24.
- [38] Issam Hanafi, Abdellatif Khamlichi, Francisco Mata Cabrera, Pedro J. Nunez López, Abdallah Jabbouri: Fuzzy rula based predictive model for cutting force in turning of reinforced PEEK compostie. *Measurement* 45 (2012) 1424-1435.
- [39] Xun Chen, Kai Cheng, Chao Wang: Design of a smart turning tool with application to in-process cutting force measurement in ultraprecision and micro cutting. *Manufacturing Letters* 2 (2014)112-117.
- [40] Catalin Fetecau, Felica Stan: Study of cutting force and surfce roughness int he turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool. *Measurement* 45 (2012) 1367-1379.

- [41] H. H. Shahabi, M.M. Ratnam: Simulation and measurement of surface roughness via grey scale image of tool in finish turning. *Precision engineering* 43 (2016) 146-153.
- [42] Aymen Ben Soussia, Ali Mkaddem, Mohamed El Mansori: Effect of coating type on dry cutting of glass/ epoxy composite. *Surface & Coatings Technology* 2015 (2013) 413-420
- [43] S.A Khan, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, C. Sage, P. Harden, M.Fleming, A. White, R.M'Saubi: Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling. *Procedia CIRP* 1 (2012) 283-288
- [44] Guoqing Zhang, Suet To, Shaojian Zhang: Evaluation for tool flank wear and its influences on surface roughness in ultra-precision raster fly cutting. *International Journal of Mechanical Sciences* 118 (2016) 125-134.
- [45] José C. Camargo, Dany Sanchez Dominguez, Emmanuel O. Ezugwu, Álisson R. Machado: Wear model in turning of hardened steel with PCBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 47 (2014) 61-70.
- [46] M.S.H. Bhuiyan, I. A. Choudhury, M. Dahari: monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning. *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2014) 476-487.
- [47] R. Suresh, S. Basavarajappa: Effect of Process Parameters on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of Hardened Steel with Coated Ceramic Tool. *Procedia Materials Science* 5 (2014) 1450-1459.
- [48] Ali Mkaddem, Aymen Ben Soussia, Mohamed El Mansori: Wear resistance of CVD and PVD multilayer coating when dry cutting fiber reinforced polymers (FRP). *Wear* 302 (2013) 946-954
- [49] Simon Gaugel, Prithvi Sripathy, Andreas Haeger, Dieter Mainhard, Timo Bernthaler, Fabian Lissekm Miachael Kaufeld, Volker Knoblauch, Gerhard Schneider: A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP) Composite structures 155 (2016) 173-183.
- [50] D. Philip Selvaraj, P. Chandramohan, M.Mohanraj: Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in dry turning process using Taguchi method. *Measurement* 49 (2014) 205-215.
- [51] Muhammad Rizal, Jaharah A. Ghani, mohd Zaki Nuawi, Che Hassan Che Haron: Online tool wear prediction system in the turning process using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Applied Soft Computing* 13 (2013) 1960-1968.
- [52] S. Dutta, S.K. Pal, S. Mukhopadhyay, R. Sen: Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 212-232.
- [53] P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia: Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology* 17 (2001) 355-365.

- [54] P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia: Residual stress. Part 2 – Nature and origins. *Materials Science and Technology* 17 (2001) 366-375.
- [55] Junfei Liang, Wenkai Zhong, Lei Ying, Wei Yang, Junbiao Peng, Yong Cao: The effect of solvent vapor annealing on the performance of blue polymer light-emitting diodes. *Organic electronics* 27 (2015) 1-6.
- [56] Petr Jurik, Petr Slepicka, Zdenka Kolská, Václav Svorcik: Change of surface properties of gold nano-layers deposited on polyethersulfone film due to annealing. *Materials Letters* 165 (2016) 33-36.
- [57] Kristina Gusakova, Jean-Marc Saiter, Olga Grigoryeva, Fabrice Gouanve, Alexander Fainleib, Olga Starostenko, Daniel Grande: Annealing behavior and thermal stability of nanoporous polymer films based on high-performance Cyanate Ester Resins. *Polymer Degradation and Stability* 120 (2015) 402-409.
- [58] Xiabo Shang, Hojeong Yu, Wanuk Choi, Eun Kwang Lee, Joon Hak Oh: Effects of microwave-assisted annealing on the morphology and electrical performance of semiconducting polymer thin films. *Organic Electronics* 30 (2016) 207-212.
- [59] Ville Myllari, Tero-Petri Ruoko, Jyrki Vuorinen, Helge Lemmetyinen: Characterisation of thermally aged polyetheretherketone fibres – mechanical, thermal, rheological and chemical property changes. *Polymer Degradation and Stability* 120 (2015) 419-426.
- [60] Arshpreet Singh, Aupam Agrawal: Investigation of surface residual stress distribution in deformation machining process for aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 225 (2015) 195-202.
- [61] J. Poduska, J. Kucera, P. Hutar, M. Sevcik, J. Krivánek, J. Sadílek, L. Náhlik: Residual stress distribution in extruded polypropylene pipes. *Polymer Testing* 40 (2014) 88-98.
- [62] A. Giri, C. Pandey, M.M. Mahapatra, K. Sharma, P.K. Singh: On the estimation of error in measuring the residual stress by strain gauge rosette. *Measurement* 65 (2015) 41-49.
- [63] César Macías, Octavio Meza, Elías Pérez: Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with application in the injection molding process. *Engineering Failure Analysis* 57 (2015) 490-498.
- [64] A.H. Mahmoudi, A. Saei: Influence of asymmetrical cuts in measuring residual stresses using contour method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 134 (2015) 1-10.
- [65] A.S. Maxwell, A. Turnbull: Measurement of Residual Stress in Plastics. *Polymer Testing* 22 (2003) 231-233.
- [66] Patrik Sarga, Frantisek Menda: Appraisal of the drilling speed influence on the evaluated residual stress values. *Procedia Engineering* 96 (2014) 454-457.
- [67] Rahman Seifi, Davood Salimi-Majd: Effects of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method. *Mechanics of Materials* 53 (2012) 72-79.

- [68] Amélie K. Mainjot, Achref Najjar, Boris D. Jakubowicz-Kohen, Michael J. Sadoun: Influence of thermal expansion mismatch on residual stress profile in veneering ceramic layered on zirconia. Measurement by hole-drilling. *Dental Materials* 31 (2015) 1142-1149.
- [69] A.H. Mahmoudi, C.e. Truman, D.J. Smith, M.J. Pavier: The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress. *International Journal of Mechanical Sciences* 53 (2011) 978-988.
- [70] W. Woo, G.B. An, E.J. Kingston, A.T. DeWald, D.J. Smith, M. R. Hill: Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study. *Acta Materialia* 61 (2013) 3564-3574.
- [71] A. Skouras, A. Paradowska, M.J. Peel, P.E.J. Flewitt, M.J. Pavier: Residual stress measurements in ferritic steel/In625 superalloy dissimilar metal weldment using neutron diffraction and deep-hole drilling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 101 (2013) 143-153.
- [72] V. Buljak, G. Cocchetti, A. Cornaggia, G. Maier: Assessment of residual stresses and mechanical characterization of materials by „hole drilling” and indentation tests combined and by inverse analysis. *Mechanics Research Communications* 68 (2015) 18-24.
- [73] http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3400001.htm
(Letöltve: 2013.03.12.)
- [74] Ákontz Ernő- Dr. Józsa Sándor: Direkt módszerek műanyag csövek, kötőelemek, és kötések belső feszültségállapotának előállítás- és alkalmazástechnikai elemzésére, Tanulmány, Plast Consulting Bt., Budapest, 1993
- [75] <http://www.ensinger-online.com/en/technical-information/machining/annealing/>
(Letöltve: 2013.03.24.)
- [76] <https://www.makeitfrom.com/> (Letöltve: 2017.12.06)
- [77] <http://www.cnc.hu/2010/10/lezeres-feluleti-erdesseg-meres/> (Letöltve 2017.12.12)
- [78] A kép forrása: <http://www.copperburton.com/machined-components/> (Letöltve: 2017.08.06)
- [79] Dr. Kodácsy János, Dr. Pintér József: Forgácsolás és szerszámai, Széchenyi István Egyetem digitális jegyzet (2011)
- [80] Dr. Halmai Attila: Szenzor- és aktuátortechnika, Edutus Főiskola digitális jegyzet (2012)
- [81] Denica Nikolova: Charakterisierung und Modifizierung der Grenzflächen im Polymer-Metall-Verbund. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades, Halle 2005
- [82] Claus Bischof, Wulff Possart: Adhäsion –Theoretische und experimentelle Grundlagen. Akademie-Verlag, Berlin, 1983

[83] János Farkas, Etele Csanády, Levente Csóka: Optimisation of the Bauer Equation Using the Least Squares Method for Thermoplastics Turning. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering* 8 (2018). 21-36.

[84] János Farkas, Etele Csanády, Levente Csóka: Effects of Tool Wear on Surface Roughness and Cutting Force in Thermoplastics Turning. *International Journal of Materials Forming and Machining Processes* 5 (2018) 1-11.

[85] Farkas János, Csanády Etele, Csóka Levente: A forgácsolóerőt és a felületi érdességet befolyásoló tényezők hőre lágyuló műanyagok esztergálásakor I.: A forgácsolási paraméterek hatása. *Műanyagipari szemle XIV* (2017) 78-88.

[86] Farkas János, Csanády Etele, Csóka Levente: A forgácsolóerőt és a felületi érdességet befolyásoló tényezők hőre lágyuló műanyagok esztergálásakor II.: A szerszámgeometria és a hűtő/kenőfolyadék hatása. *Műanyagipari szemle XIV* (2017) 92-104.

VII. MELLÉKLETEK

A. melléklet. A lefuttatott CNC program

Külső átmerő esztergálás forgácsolóerő méréshez ($f=0,1$ mm/fordulat és $v_c=250$ m/perc)

%

:6001(FORGACSOLO MERES)

G99

G54

G18

M46

G28U0

G0T0808

G0 X37.1 Z10.0

G50S4000

G96 S250 M3

M8

G1Z-30.0F0.1

X50.0

M5

M9

G28U0

G0T0

M0

M99

%%

B. melléklet. A felhasznált, rendszerezett forgácsolási adatok

Sz.	Anyag	Esztergált átmérő	Vágó - sebeség	Előtolás	Lapka	Fogas	H V	Fx	Fy	Fz	Fx szórás	Fy szórás	Fz szórás	Ra átlag	Rz átlag	Ra szórás	Rz szórás	F eredő	Rz/Ra
A01	PP	48,5	250	0,05	A	2	X	1,628	14,101	0,838	0,364	0,414	0,328	0,638	3,468	0,028	0,205	14,219	5,439
A02	PP	48,5	250	0,07	A	2	X	2,575	18,244	2,201	0,287	0,298	0,259	1,056	5,518	0,019	0,031	18,556	5,225
A03	PP	48,5	250	0,1	A	2	X	3,019	23,163	2,716	0,214	0,339	0,193	2,090	8,933	0,014	0,087	23,516	4,274
A04	PP	48,5	250	0,12	A	2	X	4,367	27,519	3,726	0,219	0,249	0,170	2,753	11,200	0,010	0,141	28,111	4,068
A05	PP	48,5	250	0,15	A	2	X	4,509	33,475	5,362	0,220	0,284	0,154	4,143	17,100	0,023	0,082	34,200	4,127
A06	PP	48,5	250	0,2	A	2	X	6,545	42,922	7,643	0,171	0,320	0,181	7,439	31,300	0,021	0,294	44,086	4,208
A07	PP	48,5	250	0,25	A	2	X	8,086	51,474	9,945	0,203	0,335	0,201	12,073	50,350	0,181	1,314	53,046	4,171
A08	PP	48,5	100	0,12	A	2	X	4,199	28,099	2,492	0,311	0,275	0,159	2,804	12,225	0,014	0,148	28,520	4,360
A09	PP	48,5	150	0,12	A	2	X	4,124	28,290	3,105	0,250	0,307	0,166	2,829	11,900	0,015	0,082	28,757	4,207
A10	PP	48,5	200	0,12	A	2	X	3,453	27,785	3,939	0,250	0,251	0,167	2,842	11,750	0,018	0,180	28,274	4,135
A11	PP	48,5	300	0,12	A	2	X	4,590	27,900	4,162	0,356	0,271	0,170	2,820	11,475	0,017	0,083	28,579	4,069
A12	PP	48,5	350	0,12	A	2	X	3,962	27,691	4,403	0,211	0,227	0,148	2,765	11,233	0,007	0,205	28,318	4,063
B01	PVC	47,5	250	0,05	A	2	X	1,922	13,618	1,156	0,191	0,493	0,201	0,542	2,823	0,005	0,186	13,801	5,207
B02	PVC	47,5	250	0,07	A	2	X	1,699	13,256	1,500	0,230	0,304	0,156	0,908	4,247	0,001	0,186	13,448	4,679
B03	PVC	47,5	250	0,1	A	2	X	1,957	13,686	1,461	0,211	0,377	0,178	1,731	7,500	0,007	0,037	13,902	4,334
B04	PVC	47,5	250	0,12	A	2	X	2,255	14,772	1,855	0,194	0,474	0,192	2,597	10,867	0,006	0,170	15,058	4,184
B05	PVC	47,5	250	0,15	A	2	X	2,485	16,299	2,084	0,197	0,371	0,184	4,075	17,333	0,010	0,236	16,619	4,253
B06	PVC	47,5	250	0,2	A	2	X	3,138	18,362	2,402	0,225	0,416	0,167	7,482	31,067	0,053	0,330	18,783	4,152
B07	PVC	47,5	250	0,25	A	2	X	3,773	20,475	2,412	0,247	0,656	0,201	11,973	50,375	0,232	0,698	20,959	4,208
B08	PVC	47,5	100	0,12	A	2	X	2,217	18,625	2,459	0,243	0,580	0,218	2,498	10,525	0,033	0,295	18,917	4,213
B09	PVC	47,5	150	0,12	A	2	X	2,334	16,538	1,835	0,217	0,477	0,170	2,470	10,330	0,009	0,158	16,802	4,171
B10	PVC	47,5	200	0,12	A	2	X	2,187	15,319	1,600	0,195	0,337	0,179	2,478	10,333	0,006	0,170	15,557	4,171
B11	PVC	47,5	300	0,12	A	2	X	1,783	14,445	1,406	0,194	0,379	0,161	2,487	10,467	0,007	0,125	14,622	4,209
B12	PVC	47,5	350	0,12	A	2	X	1,796	13,763	1,655	0,233	0,232	0,159	2,483	10,633	0,009	0,205	13,978	4,282
D01	PET	37	250	0,05	A	2	X	2,389	18,328	1,458	0,184	0,187	0,179	0,494	2,915	0,006	0,111	18,540	5,898
D02	PET	37	250	0,07	A	2	X	3,24	23,6	-	0,184	0,238	0,148	0,884	4,277	0,003	0,017	24,0	4,84

								4	34	2,63								00	0
								-	-	-									
D03	PET	37	250	0,1	A	2	X	4,26	29,8	4,23	0,187	0,281	0,164	1,849	7,593	0,008	0,048	30,4	4,10
								3	99	2								96	7
D04	PET	37	250	0,12	A	2	X	4,52	32,2	4,49	0,174	0,331	0,177	2,554	10,63	0,004	0,094	32,8	4,16
								7	02	7					3			28	4
D05	PET	37	250	0,15	A	2	X	5,45	40,0	7,13	0,204	0,312	0,187	4,075	17,17	0,024	0,148	41,0	4,21
								2	70	3					5			63	5
D06	PET	37	250	0,2	A	2	X	5,99	41,8	7,44	0,192	0,476	0,216	7,060	28,36	0,009	0,125	42,9	4,01
								7	76	2					7			53	8
D07	PET	37	250	0,25	A	2	X	6,81	47,0	8,58	0,209	1,501	0,454	11,21	46,82	0,072	0,545	48,3	4,17
								7	57	5					3			17	6
D08	PET	37	100	0,12	A	2	X	5,15	38,6	3,90	0,163	0,264	0,155	2,601	11,23	0,002	0,125	39,2	4,31
								8	89	5					3			26	9
D09	PET	37	150	0,12	A	2	X	4,97	35,8	4,64	0,204	0,567	0,214	2,547	10,90	0,007	0,082	36,4	4,28
								8	44	5					0			85	0
D10	PET	37	200	0,12	A	2	X	4,47	30,8	3,79	0,161	0,750	0,234	2,543	10,66	0,012	0,047	31,4	4,19
								7	84	1					7			36	5
D11	PET	37	300	0,12	A	2	X	4,84	33,5	5,33	0,299	0,648	0,285	2,563	10,66	0,007	0,047	34,2	4,16
								0	30	5					7			95	2
D12	PET	37	350	0,12	A	2	X	4,93	30,6	4,67	0,275	0,720	0,457	2,570	10,80	0,019	0,082	31,3	4,20
								3	23	7					0			68	2
E01	PPSU	35	250	0,05	A	2	X	2,64	16,6	0,18	0,235	0,173	0,157	1,048	4,158	0,042	0,137	16,8	3,96
								4	26	9								36	8
E02	PPSU	35	250	0,07	A	2	X	3,07	21,9	1,77	0,168	0,192	0,146	1,868	6,357	0,018	0,041	22,2	3,40
								0	18	9								03	4
E03	PPSU	35	250	0,1	A	2	X	3,53	28,9	3,11	0,171	0,195	0,154	2,937	10,08	0,012	0,143	29,3	3,43
								7	86	7					8			66	5
E04	PPSU	35	250	0,12	A	2	X	5,66	38,0	5,16	0,309	0,241	0,191	3,605	14,27	0,026	0,295	38,8	3,96
								6	76	0					5			39	0
E05	PPSU	35	250	0,15	A	2	X	5,78	39,8	5,17	0,132	0,205	0,178	5,576	21,86	0,016	0,047	40,5	3,92
								6	28	8					7			77	1
E06	PPSU	35	250	0,2	A	2	X	7,60	51,3	6,92	0,227	0,561	0,312	10,30	43,83	0,051	0,573	52,3	4,25
								7	08	2					0			29	6
E07	PPSU	35	250	0,25	A	2	X	10,2	59,5	8,67	0,331	1,062	0,438	18,66	69,80	0,330	1,306	61,0	3,74
								75	13	8					3			13	0
E08	PPSU	35	100	0,12	A	2	X	5,57	38,9	0,29	0,178	0,250	0,205	3,951	14,03	0,018	0,047	39,3	3,55
								8	41	3					3			40	2
E09	PPSU	35	150	0,12	A	2	X	3,47	36,1	1,97	0,204	0,272	0,172	3,810	13,36	0,008	0,047	36,3	3,50
								5	06	9					7			27	9
E10	PPSU	35	200	0,12	A	2	X	4,82	35,0	3,43	0,186	0,295	0,192	3,709	13,30	0,014	0,082	35,5	3,58
								4	67	8					0			64	6
E11	PPSU	35	300	0,12	A	2	X	4,22	32,3	4,21	0,397	0,710	0,320	3,642	13,00	0,005	0,082	32,8	3,56
								6	21	7					0			68	9
E12	PPSU	35	350	0,12	A	2	X	4,47	32,5	5,31	0,498	0,776	0,398	3,665	13,16	0,004	0,047	33,3	3,59
								2	88	0					7			19	3
F01	PE	32	250	0,05	A	2	X	1,10	7,04	0,18	0,234	0,372	0,212	0,711	3,905	0,020	0,067	7,13	5,49
								6	5	6								4	4
F02	PE	32	250	0,07	A	2	X	1,68	8,99	1,00	0,261	0,264	0,240	1,603	6,600	0,006	0,361	9,20	4,11
								1	4	9								5	7
F03	PE	32	250	0,1	A	2	X	1,84	11,2	0,82	0,234	0,464	0,202	2,795	10,25	0,093	0,315	11,4	3,66
								4	91	5					5			70	9
F04	PE	32	250	0,12	A	2	X	2,46	13,1	1,21	0,256	0,430	0,192	3,845	14,00	0,012	0,082	13,3	3,64
								1	07	9					0			91	1
F05	PE	32	250	0,15	A	2	X	2,27	15,9	1,57	0,260	0,365	0,196	5,849	22,93	0,007	0,125	16,1	3,92
								8	42	8					3			81	1
F06	PE	32	250	0,2	A	2	X	3,44	20,1	1,78	0,266	0,790	0,214	10,36	40,56	0,092	0,125	20,5	3,91
								6	78	8					3			48	4
F07	PE	32	250	0,25	A	2	X	4,72	24,1	1,75	0,227	0,292	0,172	15,96	61,00	0,058	0,455	24,6	3,82
								6	58	1					3			78	1

										1									
F08	PE	32	100	0,12	A	2	X	1,987	12,940	0,998	0,184	0,312	0,185	3,889	14,667	0,013	0,170	13,129	3,771
F09	PE	32	150	0,12	A	2	X	1,941	13,623	1,378	0,172	0,211	0,206	3,888	14,433	0,021	0,094	13,829	3,713
F10	PE	32	200	0,12	A	2	X	2,154	13,003	0,958	0,201	0,313	0,192	3,938	14,625	0,010	0,334	13,215	3,714
F11	PE	32	300	0,12	A	2	X	2,082	12,512	1,098	0,619	0,565	0,389	3,808	13,967	0,016	0,047	12,731	3,668
F12	PE	32	350	0,12	A	2	X	2,412	12,932	1,103	0,260	0,796	0,277	3,698	13,900	0,032	0,122	13,202	3,759
G01	PA6	32,5	250	0,05	A	2	X	2,825	20,103	0,774	0,239	0,258	0,225	0,495	3,168	0,012	0,047	20,315	6,396
G02	PA6	32,5	250	0,07	A	2	X	3,360	24,973	1,323	0,241	0,312	0,191	0,786	4,750	0,006	0,076	25,232	6,047
G03	PA6	32,5	250	0,1	A	2	X	4,744	33,124	3,321	0,233	0,283	0,192	1,511	7,153	0,413	1,348	33,626	4,734
G04	PA6	32,5	250	0,12	A	2	X	5,499	37,995	4,411	0,212	0,874	0,256	2,557	11,200	0,026	0,274	38,643	4,380
G05	PA6	32,5	250	0,15	A	2	X	6,182	45,404	6,252	0,243	0,344	0,182	3,961	17,100	0,005	0,294	46,248	4,317
G06	PA6	32,5	250	0,2	A	2	X	8,538	58,430	8,618	0,192	0,443	0,222	7,792	32,400	0,060	0,728	59,676	4,158
G07	PA6	32,5	250	0,25	A	2	X	10,589	66,926	9,378	0,214	0,682	0,236	11,820	43,700	0,050	0,829	68,405	3,697
G08	PA6	32,5	100	0,12	A	2	X	5,173	39,525	1,949	0,164	0,272	0,165	2,587	12,333	0,011	0,205	39,909	4,767
G09	PA6	32,5	150	0,12	A	2	X	5,563	39,139	2,555	0,215	0,303	0,149	2,490	11,800	0,023	0,294	39,615	4,738
G10	PA6	32,5	200	0,12	A	2	X	5,559	38,729	2,969	0,204	0,497	0,190	2,454	11,100	0,010	0,082	39,238	4,524
G11	PA6	32,5	300	0,12	A	2	X	5,544	38,118	4,599	0,531	0,746	0,432	2,472	10,800	0,028	0,216	38,793	4,368
G12	PA6	32,5	350	0,12	A	2	X	5,093	35,264	4,412	0,379	0,642	0,236	2,533	10,467	0,009	0,047	35,902	4,132
H01	PEEK	29	250	0,05	A	2	X	3,220	20,348	1,372	0,431	0,612	0,338	0,909	3,730	0,002	0,307	20,647	4,102
H02	PEEK	29	250	0,07	A	2	X	4,264	26,576	2,856	0,610	0,420	0,331	1,180	5,500	0,025	0,123	27,067	4,660
H03	PEEK	29	250	0,1	A	2	X	4,946	36,544	5,800	0,386	0,594	0,310	1,989	8,297	0,021	0,170	37,330	4,172
H04	PEEK	29	250	0,12	A	2	X	7,674	49,155	8,159	0,870	3,909	1,247	2,660	12,000	0,007	0,141	50,415	4,512
H05	PEEK	29	250	0,15	A	2	X	8,313	52,490	9,066	0,558	0,783	0,398	4,211	19,400	0,008	0,082	53,912	4,607
H06	PEEK	29	250	0,2	A	2	X	6,026	32,971	2,875	0,430	1,253	0,422	8,235	37,600	0,104	0,490	33,640	4,566
H07	PEEK	29	250	0,25	A	2	X	6,921	36,863	2,312	0,470	1,291	0,408	13,820	58,800	0,159	0,356	37,578	4,255
H08	PEEK	29	100	0,12	A	2	X	5,951	49,148	3,109	0,205	0,401	0,223	3,287	13,800	0,008	0,082	49,604	4,199
H09	PEEK	29	150	0,12	A	2	X	6,175	46,749	4,889	0,173	0,454	0,294	2,497	12,500	0,009	0,082	47,408	5,006
H10	PEEK	29	200	0,12	A	2	X	6,741	45,873	6,415	0,216	0,230	0,144	2,627	11,833	0,008	0,047	46,808	4,504
H11	PEEK	29	300	0,12	A	2	X	6,379	42,209	7,283	0,513	0,479	0,302	2,559	11,500	0,012	0,082	43,305	4,493

H12	PEEK	29	350	0,12	A	2	X	5,70 2	42,0 73	8,73 7	0,128	0,252	0,208	2,590	11,40 0	0,004	0,082	43,3 47	4,40 2
I01	POM ELS	32,5	250	0,05	A	2	X	1,61 0	11,6 59	1,00 4	0,183	0,204	0,163	0,619	2,880	0,008	0,093	11,8 13	4,65 5
I02	POM ELS	32,5	250	0,07	A	2	X	3,16 0	21,3 93	3,45 2	0,165	0,205	0,150	0,981	4,230	0,004	0,045	21,8 99	4,31 2
I03	POM ELS	32,5	250	0,1	A	2	X	2,43 6	15,6 57	1,70 1	0,160	0,211	0,158	1,892	7,990	0,004	0,008	15,9 36	4,22 3
I04	POM ELS	32,5	250	0,12	A	2	X	2,49 5	17,3 78	1,98 0	0,158	0,214	0,153	2,602	11,00 0	0,013	0,082	17,6 68	4,22 8
I05	POM ELS	32,5	250	0,15	A	2	X	5,23 2	35,6 57	7,36 9	0,154	0,326	0,192	4,036	16,26 7	0,023	0,047	36,7 85	4,03 0
I06	POM ELS	32,5	250	0,2	A	2	X	3,83 8	21,0 95	2,59 8	0,167	0,283	0,135	7,481	32,63 3	0,063	0,125	21,5 98	4,36 2
I07	POM ELS	32,5	250	0,25	A	2	X	6,72 4	45,9 60	10,2 52	0,255	0,719	0,232	11,40 7	47,23 3	0,063	0,450	47,5 67	4,14 1
I08	POM ELS	32,5	100	0,12	A	2	X	3,04 9	20,0 82	1,36 7	0,236	0,226	0,182	2,671	11,30 0	0,018	0,141	20,3 58	4,23 1
I09	POM ELS	32,5	150	0,12	A	2	X	1,88 5	16,8 05	1,26 1	0,194	0,248	0,159	2,649	11,40 0	0,006	0,082	16,9 57	4,30 4
I10	POM ELS	32,5	200	0,12	A	2	X	2,48 7	15,5 61	1,29 5	0,191	0,284	0,169	2,623	11,30 0	0,007	0,082	15,8 12	4,30 7
I11	POM ELS	32,5	300	0,12	A	2	X	1,80 0	12,8 20	1,51 2	0,356	0,507	0,241	2,619	13,80 0	0,050	1,525	13,0 34	5,26 9
I12	POM ELS	32,5	350	0,12	A	2	X	2,32 4	16,7 19	2,18 2	0,562	0,625	0,406	2,591	11,03 3	0,018	0,047	17,0 21	4,25 8
J01	PEI	38	250	0,05	A	2	X	4,03 0	23,3 36	0,32 2	0,189	0,279	0,173	1,119	4,717	0,133	0,031	23,6 83	4,21 4
J02	PEI	38	250	0,07	A	2	X	4,22 4	29,3 28	2,35 3	0,402	0,288	0,181	1,473	6,738	0,013	0,185	29,7 24	4,57 5
J03	PEI	38	250	0,1	A	2	X	5,44 6	39,4 44	5,02 3	0,361	0,662	0,249	2,492	10,30 0	0,012	0,082	40,1 34	4,13 4
J04	PEI	38	250	0,12	A	2	X	6,52 0	45,1 84	7,50 1	0,312	0,570	0,417	3,389	14,06 7	0,018	0,125	46,2 64	4,15 1
J05	PEI	38	250	0,15	A	2	X	8,10 2	54,7 33	9,90 7	0,170	0,237	0,182	5,345	24,00 0	0,017	0,324	56,2 09	4,49 1
J06	PEI	38	250	0,2	A	2	X	10,7 74	69,5 29	13,4 34	0,246	0,329	0,225	13,66 0	48,45 0	0,339	1,879	71,6 29	3,54 7
J07	PEI	38	250	0,25	A	2	X	9,78 1	53,9 77	6,60 1	0,250	0,946	0,338	19,39 5	72,20 0	0,061	0,653	55,2 52	3,72 3
J08	PEI	38	100	0,12	A	2	X	5,54 0	50,8 30	1,47 7	0,238	0,296	0,161	3,810	14,86 7	0,015	0,047	51,1 52	3,90 2
J09	PEI	38	150	0,12	A	2	X	6,69 5	47,5 03	5,96 9	0,209	0,342	0,193	3,456	14,46 7	0,033	0,125	48,3 43	4,18 6
J10	PEI	38	200	0,12	A	2	X	7,16 7	46,1 50	6,36 1	0,180	0,349	0,167	3,415	14,20 0	0,015	0,245	47,1 34	4,15 8
J11	PEI	38	300	0,12	A	2	X	5,92 1	44,9 17	7,74 2	0,200	0,842	0,337	3,288	13,45 0	0,023	0,296	45,9 62	4,09 0
J12	PEI	38	350	0,12	A	2	X	6,48 7	46,0 03	8,40 4	0,134	0,268	0,310	3,293	13,77 5	0,010	0,192	47,2 12	4,18 3
K01	PC	47,5	250	0,05	A	2	X	2,49 9	17,5 30	0,32 4	0,190	0,226	0,157	0,626	3,463	0,018	0,038	17,7 10	5,53 2
K02	PC	47,5	250	0,07	A	2	X	3,00 4	21,8 44	1,11 7	0,182	0,189	0,141	1,189	4,925	0,009	0,094	22,0 78	4,14 4
K03	PC	47,5	250	0,1	A	2	X	4,00 9	28,4 96	3,21 4	0,189	0,277	0,174	2,366	9,347	0,007	0,031	28,9 55	3,95 0
K04	PC	47,5	250	0,12	A	2	X	4,64 6	33,9 42	3,91	0,163	0,220	0,143	3,456	13,36 7	0,073	0,189	34,4 81	3,86 8

										1									
K05	PC	47,5	250	0,15	A	2	X	6,13 5	39,8 84	5,20 9	0,205	0,232	0,143	5,774	23,15 0	0,044	0,377	40,6 88	4,01 0
K06	PC	47,5	250	0,2	A	2	X	7,13 4	50,8 68	6,66 2	0,152	0,306	0,189	12,12 0	53,00 0	0,099	0,787	51,7 96	4,37 3
K07	PC	47,5	250	0,25	A	2	X	7,24 0	43,3 59	3,42 0	0,284	1,130	0,346	20,33 3	74,20 0	0,230	0,849	44,0 92	3,64 9
K08	PC	47,5	100	0,12	A	2	X	4,34 1	38,2 95	0,27 8	0,167	0,276	0,185	3,758	14,50 0	0,259	0,082	38,5 41	3,85 9
K09	PC	47,5	150	0,12	A	2	X	4,23 5	35,1 62	1,80 6	0,159	0,366	0,171	3,686	13,66 7	0,012	0,094	35,4 63	3,70 8
K10	PC	47,5	200	0,12	A	2	X	5,02 0	34,1 59	2,69 4	0,196	0,297	0,175	2,615	13,73 3	1,419	0,309	34,6 31	5,25 1
K11	PC	47,5	300	0,12	A	2	X	4,76 6	33,1 24	4,55 2	0,160	0,293	0,172	3,496	13,40 0	0,007	0,216	33,7 73	3,83 3
K12	PC	47,5	350	0,12	A	2	X	4,66 2	32,4 92	4,95 9	0,179	0,275	0,154	3,474	13,26 7	0,028	0,094	33,1 97	3,81 9
L01	POM	52,5	250	0,05	A	2	X	1,65 2	16,1 86	1,57 8	0,172	0,309	0,168	0,626	2,985	0,008	0,043	16,3 47	4,77 2
L02	POM	52,5	250	0,07	A	2	X	3,47 8	21,2 82	2,63 5	0,260	0,345	0,186	0,938	4,790	0,007	0,016	21,7 25	5,10 7
L03	POM	52,5	250	0,1	A	2	X	3,90 3	28,1 52	4,83 8	0,342	0,382	0,183	2,022	8,350	0,005	0,126	28,8 30	4,12 9
L04	POM	52,5	250	0,12	A	2	X	3,28 0	26,4 72	4,34 0	0,189	0,485	0,193	2,787	11,36 7	0,012	0,047	27,0 26	4,07 8
L05	POM	52,5	250	0,15	A	2	X	4,61 0	30,7 27	5,45 2	0,202	0,520	0,193	4,153	17,86 7	0,015	0,094	31,5 46	4,30 2
L06	POM	52,5	250	0,2	A	2	X	5,70 0	34,8 45	6,03 0	0,183	0,485	0,210	7,518	31,92 5	0,047	0,349	35,8 19	4,24 7
L07	POM	52,5	250	0,25	A	2	X	6,19 8	38,9 41	7,21 1	0,277	1,018	0,340	11,96 8	49,62 5	0,066	0,602	40,0 85	4,14 7
L08	POM	52,5	100	0,12	A	2	X	4,38 9	34,8 91	4,61 4	0,285	0,230	0,160	2,660	11,30 0	0,011	0,082	35,4 67	4,24 8
L09	POM	52,5	150	0,12	A	2	X	3,83 6	33,5 01	5,01 9	0,162	0,334	0,218	2,722	11,50 0	0,025	0,141	34,0 91	4,22 5
L10	POM	52,5	200	0,12	A	2	X	4,40 1	33,2 29	5,49 5	0,210	0,474	0,192	2,756	11,30 0	0,004	0,216	33,9 66	4,10 1
L11	POM	52,5	300	0,12	A	2	X	3,79 0	29,2 91	5,58 8	0,215	0,611	0,216	2,772	11,40 0	0,017	0,245	30,0 60	4,11 3
L12	POM	52,5	350	0,12	A	2	X	3,49 8	26,8 18	4,89 0	0,253	0,452	0,230	2,758	11,26 7	0,010	0,047	27,4 84	4,08 5
A21	PP	59,5	250	0,12	A	1	X	2,40 1	16,2 33	1,61 8	0,162	0,274	0,175	2,714	11,33 3	0,009	0,125	16,4 89	4,17 6
A22	PP	55,5	250	0,12	A	3	X	6,85 4	44,3 73	7,49 4	0,158	0,360	0,172	2,707	11,36 7	0,006	0,125	45,5 21	4,19 8
A23	PP	53,5	250	0,12	A	4	X	6,30 5	58,1 19	10,7 63	1,019	0,701	0,513	2,699	11,63 3	0,005	0,047	59,4 43	4,31 0
A24	PP	51,5	250	0,12	A	5	X	6,96 0	69,2 60	12,0 25	14,21 7	16,72 7	8,359					70,6 40	
A25	PP		250	0,12	A	6	X	6,15 8	71,0 26	9,76 7	33,83 0	27,77 4	17,47 4					71,9 58	
A26	PP		250	0,12	A	7	X											0,00 0	
A27	PP	60,5	250	0,12	A	0,5	X	0,62 8	8,20 3	0,69 8	0,181	0,279	0,170	2,590	10,70 0	0,015	0,082	8,25 6	4,13 2
D21	PET	47,5	250	0,12	A	1	X	2,73 0	17,3 02	1,50 6	0,187	0,538	0,167	2,499	10,53 3	0,010	0,047	17,5 81	4,21 6
D22	PET	46,5	250	0,12	A	3	X	7,09 5	51,9 28	6,42	0,215	0,737	0,189	2,508	10,73 3	0,010	0,047	52,8 02	4,28 0

										6									
D23	PET	43	250	0,12	A	4	X	7,26 2	64,1 63	7,57 1	0,224	0,437	0,225	2,514	10,80 0	0,002	0,141	65,0 15	4,29 5
D24	PET	41	250	0,12	A	5	X	6,36 2	78,7 57	9,76 8	0,346	0,557	0,258	2,532	10,83 3	0,009	0,047	79,6 15	4,27 8
D25	PET	39	250	0,12	A	6	X	5,68 7	91,2 17	11,9 21	0,338	0,746	0,218	2,519	10,90 0	0,007	0,100	92,1 69	4,32 8
D26	PET	37	250	0,12	A	7	X	5,54 5	66,9 22	5,87 1	26,58 3	16,09 6	13,49 5					67,4 07	
D27	PET	49,5	250	0,12	A	0,5	X	0,41 2	7,96 8	0,55 4	0,271	1,423	0,188	2,407	10,33 3	0,008	0,047	7,99 8	4,29 3
E21	PPSU	49,5	250	0,12	A	1	X	1,83 8	18,0 27	1,31 7	0,256	0,230	0,160	3,418	12,13 3	0,005	0,386	18,1 68	3,55 0
E22	PPSU	45,5	250	0,12	A	3	X	6,11 8	49,9 17	5,64 6	0,223	0,440	0,183	3,592	12,43 3	0,006	0,094	50,6 07	3,46 2
E23	PPSU	43,5	250	0,12	A	4	X	5,50 9	66,9 39	9,34 3	0,182	1,376	0,621	3,751	13,96 7	0,024	0,047	67,8 12	3,72 4
E24	PPSU	41,5	250	0,12	A	5	X	7,43 0	81,6 84	12,2 55	3,048	2,598	1,480	3,781	16,80 0	0,062	0,216	82,9 32	4,44 3
E25	PPSU	39,5	250	0,12	A	6	X	6,97 3	95,8 27	15,1 02	0,273	5,443	1,127					97,2 60	
E26	PPSU		250	0,12	A	7	X											0,00 0	
E27	PPSU	50,5	250	0,12	A	0,5	X	0,03 8	9,35 7	0,44 9	0,260	0,258	0,164	3,036	12,06 7	0,075	0,330	9,36 8	3,97 5
L21	POM	59,5	250	0,12	A	1	X	2,51 5	16,9 84	2,73 3	0,213	0,470	0,189	2,767	11,23 3	0,016	0,047	17,3 86	4,06 0
L22	POM	55,5	250	0,12	A	3	X	6,46 0	45,5 97	9,10 4	0,166	0,422	0,199	2,753	11,40 0	0,012	0,082	46,9 44	4,14 1
L23	POM	53,5	250	0,12	A	4	X	6,95 1	58,8 18	12,0 65	1,288	1,108	0,665	2,753	11,30 0	0,006	0,082	60,4 44	4,10 5
L24	POM	51,5	250	0,12	A	5	X	6,87 8	67,0 64	13,4 00	0,188	0,706	0,292	2,778	11,33 3	0,030	0,189	68,7 35	4,08 0
L25	POM	49,5	250	0,12	A	6	X	8,55 1	77,2 89	17,0 54	33,29 1	17,16 1	17,10 9					79,6 08	
L26	POM		250	0,12	A	7	X											0,00 0	
L27	POM	60,5	250	0,12	A	0,5	X	1,23 8	9,60 2	0,99 3	0,306	0,337	0,165	2,740	11,33 3	0,009	0,125	9,73 2	4,13 6
A31	PP	48,5	250	0,05	C		X	2,22 3	14,9 94	0,36 3	0,222	0,227	0,182	0,357	2,615	0,126	0,096	15,1 62	7,33 0
A32	PP	48,5	250	0,1	C		X	3,25 7	24,0 53	3,19 3	0,289	0,261	0,169	0,694	4,155	0,015	0,072	24,4 81	5,99 1
A33	PP	48,5	250	0,15	C		X	3,73 2	33,9 14	5,88 0	0,186	0,223	0,163	1,773	8,085	0,013	0,224	34,6 22	4,56 1
A34	PP	48,5	250	0,2	C		X	5,35 0	43,3 29	7,62 3	0,174	0,393	0,222	3,224	13,72 5	0,011	0,109	44,3 18	4,25 8
A35	PP	48,5	250	0,25	C		X	5,84 1	51,8 55	9,60 0	0,241	0,363	0,160	5,200	21,40 0	0,023	0,212	53,0 59	4,11 6
A36	PP	48,5	250	0,05	D		X	0,16 9	15,8 93	0,76 9	0,191	0,209	0,212	0,434	2,850	0,010	0,112	15,9 13	6,57 1
A37	PP	48,5	250	0,1	D		X	2,57 1	25,8 28	1,18 3	0,172	0,258	0,174	0,509	3,185	0,016	0,122	25,9 83	6,25 7
A38	PP	48,5	250	0,15	D		X	2,45 6	36,8 01	4,41 4	0,206	0,298	0,184	0,857	5,373	0,013	0,096	37,1 46	6,27 3
A39	PP	48,5	250	0,2	D		X	3,84 5	46,3 74	6,82 6	0,152	0,224	0,152	1,510	8,278	0,042	0,109	47,0 31	5,48 2
A40	PP	48,5	250	0,25	D		X	5,09 8	56,8 65	9,10	0,179	0,332	0,175	2,524	12,25 0	0,044	0,150	57,8 15	4,85 4

									8											
B31	PVC	47	250	0,05	C		X	0,95 6	13,7 62	1,41 2	0,181	0,444	0,190	0,351	2,200	0,004	0,145	13,8 67	6,26 2	
B32	PVC	47	250	0,1	C		X	1,35 1	13,8 36	2,07 1	0,149	0,377	0,192	0,905	7,863	0,146	1,537	14,0 55	8,69 2	
B33	PVC	47	250	0,15	C		X	1,67 6	14,2 82	2,06 6	0,204	0,400	0,175	2,464	17,73 3	0,248	1,452	14,5 28	7,19 7	
B34	PVC	47	250	0,2	C		X	2,59 0	18,4 84	2,75 5	0,193	0,614	0,182	5,125	32,90 0	0,633	6,400	18,8 67	6,42 0	
B35	PVC	47	250	0,25	C		X	4,34 9	22,3 10	3,14 2	0,250	0,810	0,198	6,014	35,70 0	0,000	0,000	22,9 46	5,93 6	
B36	PVC	47	250	0,05	D		X	0,49 0	16,6 47	0,37 3	0,273	0,371	0,190	0,439	2,470	0,005	0,085	16,6 58	5,63 1	
B37	PVC	47	250	0,1	D		X	0,46 8	16,9 74	0,51 1	0,374	0,794	0,224	0,454	2,590	0,011	0,065	16,9 88	5,70 1	
B38	PVC	47	250	0,15	D		X	1,07 6	16,7 79	0,89 4	0,227	0,758	0,230	1,643	13,23 3	0,191	1,156	16,8 37	8,05 3	
B39	PVC	47	250	0,2	D		X	1,24 2	17,8 60	1,96 0	0,292	1,020	0,283	7,953	43,40 0	0,000	0,000	18,0 11	5,45 7	
B40	PVC	47	250	0,25	D		X	1,91 5	18,6 85	1,65 9	0,321	1,150	0,341					18,8 56		
D31	PET	46,5	250	0,05	C		X	1,46 1	18,3 84	0,03 7	0,230	0,803	0,165	0,409	2,345	0,006	0,039	18,4 42	5,73 0	
D32	PET	46,5	250	0,1	C		X	3,05 4	30,6 11	3,25 4	0,236	0,841	0,162	0,666	3,733	0,004	0,012	30,9 34	5,60 3	
D33	PET	46,5	250	0,15	C		X	4,67 2	43,5 65	6,07 8	0,233	1,656	0,267	1,722	7,573	0,027	0,095	44,2 34	4,39 9	
D34	PET	46,5	250	0,2	C		X	5,68 2	46,2 78	6,22 6	0,280	1,422	0,521	3,199	13,56 7	0,022	0,047	47,0 39	4,24 1	
D35	PET	46,5	250	0,25	C		X	5,70 5	45,2 58	6,83 6	0,378	2,377	0,428	5,128	21,56 7	0,014	0,170	46,1 25	4,20 6	
D36	PET	46,5	250	0,05	D		X	0,36 2	20,4 19	2,06 3	0,206	0,482	0,181	0,382	2,473	0,037	0,102	20,5 26	6,47 3	
D37	PET	46,5	250	0,1	D		X	0,74 9	36,0 33	1,38 4	0,366	0,639	0,173	0,564	3,133	0,012	0,061	36,0 67	5,55 9	
D38	PET	46,5	250	0,15	D		X	2,70 5	45,5 38	3,27 7	0,229	1,508	0,191	0,816	5,235	0,016	0,132	45,7 36	6,41 3	
D39	PET	46,5	250	0,2	D		X	4,09 1	55,4 00	4,83 5	0,250	1,409	0,211	2,369	7,933	1,267	0,073	55,7 61	3,34 9	
D40	PET	46,5	250	0,25	D		X	4,48 0	55,9 08	5,59 9	0,412	2,016	0,338	2,561	12,62 5	0,029	0,228	56,3 65	4,92 9	
L31	POM	57,5	250	0,05	C		X	1,57 7	16,2 77	2,51 9	0,163	0,248	0,159	0,342	1,913	0,003	0,058	16,5 46	5,58 8	
L32	POM	57,5	250	0,1	C		X	2,68 6	26,2 17	4,42 8	0,172	0,296	0,196	0,647	3,487	0,003	0,040	26,7 24	5,39 2	
L33	POM	57,5	250	0,15	C		X	3,85 1	29,6 76	5,42 0	0,172	0,394	0,209	1,841	7,727	0,010	0,024	30,4 11	4,19 7	
L34	POM	57,5	250	0,2	C		X	5,22 5	33,9 06	6,24 4	0,185	0,555	0,169	3,280	13,85 0	0,033	0,439	34,8 70	4,22 3	
L35	POM	57,5	250	0,25	C		X	5,66 0	39,7 61	7,49 7	0,238	0,954	0,247	5,171	21,47 5	0,020	0,130	40,8 56	4,15 3	
L36	POM	57,5	250	0,05	D		X	0,18 1	14,5 91	0,83 5	0,439	0,300	0,191	0,263	1,620	0,015	0,051	14,6 16	6,17 1	
L37	POM	57,5	250	0,1	D		X	2,99 0	28,0 59	3,99 2	0,253	0,370	0,199	0,378	2,353	0,001	0,024	28,4 99	6,22 6	
L38	POM	57,5	250	0,15	D		X	3,34 6	37,6 77	5,99 3	0,217	0,840	0,226	0,929	4,415	0,009	0,081	38,2 97	4,75 2	

L39	POM	57,5	250	0,2	D		X	5,39 3	42,6 05	6,50 0	0,235	0,606	0,191	1,595	6,938	0,014	0,103	43,4 35	4,35 1
L40	POM	57,5	250	0,25	D		X	5,28 6	46,2 98	7,13 7	0,293	0,704	0,202	2,596	10,90 0	0,018	0,082	47,1 42	4,19 8
K31	PC	47	250	0,05	C		X	1,24 0	16,8 93	0,30 2	0,171	0,200	0,175	0,538	3,598	0,019	0,162	16,9 41	6,68 7
K32	PC	47	250	0,1	C		X	3,55 1	28,1 52	3,19 9	0,151	0,283	0,151	0,888	4,348	0,011	0,123	28,5 54	4,89 7
K33	PC	47	250	0,15	C		X	5,43 9	39,2 02	5,37 8	0,168	0,364	0,161	2,128	8,910	0,005	0,144	39,9 41	4,18 7
K34	PC	47	250	0,2	C		X	5,66 9	49,7 97	7,42 8	0,165	0,359	0,223	3,729	14,75 0	0,009	0,050	50,6 66	3,95 6
K35	PC	47	250	0,25	C		X	5,70 6	44,4 92	6,16 0	0,335	1,763	0,359	6,253	26,07 5	0,052	0,043	45,2 77	4,17 0
K36	PC	47	250	0,05	D		X	0,06 5	19,7 79	1,48 6	0,158	0,208	0,173	0,557	3,725	0,011	0,115	19,8 34	6,69 4
K37	PC	47	250	0,1	D		X	1,29 5	31,0 21	1,70 3	0,156	0,239	0,154	0,735	4,588	0,019	0,132	31,0 95	6,24 1
K38	PC	47	250	0,15	D		X	3,82 4	43,4 41	4,19 8	0,168	0,221	0,173	1,417	6,673	0,027	0,173	43,8 10	4,70 9
K39	PC	47	250	0,2	D		X	3,42 4	54,5 71	7,04 0	0,164	0,265	0,151	2,021	10,35 0	0,049	0,150	55,1 30	5,12 1
K40	PC	47	250	0,25	D		X	6,02 9	62,2 51	8,76 9	0,172	0,272	0,160	3,068	13,50 0	0,005	0,187	63,1 54	4,40 1
D61	PET	37	250	0,05	F		X	3,07 4	18,8 41	0,47 1	0,183	0,215	0,177	0,554	3,278	0,006	0,123	19,0 96	5,92 1
D62	PET	37	250	0,1	F		X	3,78 2	29,6 79	2,80 1	0,321	0,602	0,302	1,627	7,693	0,006	0,081	30,0 50	4,72 9
D63	PET	37	250	0,15	F		X	5,76 1	36,5 51	4,13 6	0,215	0,348	0,193	4,082	18,60 0	0,016	0,283	37,2 32	4,55 7
D64	PET	37	100	0,12	F		X	4,89 4	37,1 69	3,17 6	0,176	0,242	0,157	2,240	10,95 0	0,024	0,269	37,6 24	4,88 8
D65	PET	37	300	0,12	F		X	4,25 8	33,6 99	4,33 5	0,423	0,378	0,274	2,390	11,82 5	0,068	1,130	34,2 42	4,94 8
D66	PET	37	250	0,05	E		X	2,11 6	18,4 19	2,31 6	0,562	5,239	0,688	0,665	3,557	0,004	0,148	18,6 84	5,35 1
D67	PET	37	250	0,1	E		X	3,26 4	31,5 27	1,27 3	0,158	0,212	0,156	1,590	7,223	0,010	0,034	31,7 21	4,54 4
D68	PET	37	250	0,15	E		X	4,40 1	37,5 79	1,49 7	0,167	0,363	0,162	3,880	17,20 0	0,015	0,163	37,8 65	4,43 3
D69	PET	37	100	0,12	E		X	4,03 1	39,3 37	0,30 5	0,163	0,378	0,244	2,407	12,03 3	0,019	0,262	39,5 44	5,00 0
D70	PET	37	300	0,12	E		X	4,18 6	32,2 10	0,40 2	0,323	0,785	0,322	2,352	10,63 3	0,009	0,170	32,4 84	4,52 1
G61	PA6	32,5	250	0,05	F		X	2,48 4	19,3 74	0,96 8	0,256	0,471	0,210	0,670	4,698	0,005	0,142	19,5 56	7,00 9
G62	PA6	32,5	250	0,1	F		X	4,58 7	30,0 88	3,17 9	0,210	0,558	0,201	1,792	8,593	0,011	0,188	30,6 01	4,79 4
G63	PA6	32,5	250	0,15	F		X	6,88 0	47,5 93	6,87 5	0,189	0,679	0,215	4,362	18,83 3	0,016	0,125	48,5 76	4,31 8
G64	PA6	32,5	100	0,12	F		X	4,36 9	35,1 97	2,53 4	0,179	0,522	0,186	2,666	13,07 5	0,111	0,164	35,5 57	4,90 5
G65	PA6	32,5	300	0,12	F		X	5,41 7	33,5 63	5,82 7	0,605	0,607	0,347	2,625	11,46 7	0,020	0,125	34,4 93	4,36 9
G66	PA6	32,5	250	0,05	E		X	2,08 7	19,8 46	0,69 7	0,872	8,182	0,381	0,595	3,913	0,011	0,102	19,9 67	6,58 1
G67	PA6	32,5	250	0,1	E		X	3,46 1	28,2 23	2,57 3	0,232	0,675	0,197	1,687	8,433	0,005	0,195	28,5 50	4,99 9
G68	PA6	32,5	250	0,15	E		X	5,03 6	42,9 77	5,74 4	0,226	0,216	0,182	4,250	17,30 0	0,008	0,356	43,6 51	4,07 1
G69	PA6	32,5	100	0,12	E		X	3,86	35,6	-	0,168	0,976	0,146	2,606	13,06	0,014	0,249	36,0	5,01

								3	90	2,998					7			23	3
G70	PA6	32,5	300	0,12	E		X	3,894	35,521	4,485	0,519	1,149	0,407	2,591	11,975	0,014	0,130	36,014	4,622
I61	POM ELS	37	250	0,05	F		X	1,631	14,298	1,119	0,232	0,211	0,165	0,394	2,057	0,003	0,026	14,434	5,224
I62	POM ELS	37	250	0,1	F		X	1,227	15,017	1,546	0,179	0,225	0,172	1,749	7,153	0,010	0,025	15,146	4,091
I63	POM ELS	37	250	0,15	F		X	2,165	16,440	2,212	0,190	0,207	0,180	4,386	20,833	0,086	0,189	16,729	4,750
I64	POM ELS	37	100	0,12	F		X	3,319	16,434	1,288	0,180	0,224	0,165	2,617	10,775	0,027	0,148	16,815	4,118
I65	POM ELS	37	300	0,12	F		X	2,024	15,424	1,791	0,259	0,382	0,221	2,544	10,533	0,011	0,094	15,659	4,141
I66	POM ELS	37	250	0,05	E		X	0,757	15,138	0,309	0,380	0,244	0,187	0,273	1,833	0,008	0,039	15,160	6,716
I67	POM ELS	37	250	0,1	E		X	1,959	16,055	0,815	0,183	0,267	0,164	1,806	7,387	0,010	0,066	16,194	4,090
I68	POM ELS	37	250	0,15	E		X	2,639	17,629	1,572	0,158	0,258	0,154	4,311	19,100	0,028	0,000	17,895	4,430
I69	POM ELS	37	100	0,12	E		X	2,305	21,111	0,949	0,349	0,537	0,165	2,833	12,067	0,009	0,094	21,258	4,260
I70	POM ELS	37	300	0,12	E		X	3,028	17,600	1,821	0,273	0,400	0,220	2,750	12,233	0,014	0,094	18,108	4,448
G71	PA6	32,5	200	0,05	A	2	X	2,289	18,981	0,269	0,243	0,234	0,173	0,998	4,980	0,005	0,051	19,121	4,988
G72	PA6	32,5	200	0,1	A	2	X	5,308	33,403	3,241	0,160	0,213	0,168	1,889	9,603	0,005	0,197	33,977	5,083
G73	PA6	32,5	200	0,15	A	2	X	5,008	45,157	5,338	0,216	0,563	0,201	3,864	17,233	0,003	0,047	45,746	4,460
G74	PA6	28,5	200	0,1	A	4	X	7,135	62,769	6,200	0,171	0,401	0,159	1,877	9,703	0,011	0,192	63,477	5,170
G75	PA6	24,5	200	0,1	A	6	X	6,991	94,608	12,270	0,292	0,649	0,290	1,914	9,777	0,017	0,315	95,656	5,107
G76	PA6	32,5	300	0,1	A	2	X	4,080	32,096	3,165	0,606	1,166	0,465	1,899	9,277	0,007	0,094	32,509	4,886
K71	PA6 GF30	38	200	0,05	A	2	X	2,855	2,855	2,855	2,855	2,855	2,855	1,162	9,413	0,018	0,420	4,945	8,101
K72	PA6 GF30	38	200	0,1	A	2	X	4,608	38,451	3,005	0,208	0,260	0,188	1,913	12,033	0,024	0,287	38,843	6,290
K73	PA6 GF30	38	200	0,15	A	2	X	7,350	54,231	6,987	0,192	0,346	0,213	3,716	20,667	0,059	0,464	55,171	5,562
K74	PA6 GF30	33	200	0,1	A	4	X	7,076	73,000	6,999	27,801	17,960	14,169					73,675	
K75	PA6 GF30	29	200	0,1	A	6	X	6,628	56,494	3,595	3,279	4,066	2,248	4,775	28,867	0,125	2,295	56,995	6,045
K76	PA6 GF30	38	300	0,1	A	2	X	4,271	38,613	2,433	0,284	0,518	0,249	1,953	11,900	0,039	0,589	38,925	6,092
D81	PET	37	200	0,05	A	2	L	1,558	16,896	2,072	0,309	0,199	0,154	0,661	3,488	0,005	0,177	17,094	5,280
D82	PET	37	200	0,1	A	2	L	3,259	28,475	4,688	0,207	0,600	0,206	0,950	5,708	0,019	0,354	29,041	6,011
D83	PET	37	200	0,15	A	2	L	5,262	37,179	7,360	0,222	0,618	0,210	3,353	14,725	0,008	0,083	38,264	4,392
D84	PET	37	200	0,05	A	2	X	2,533	17,825	1,061	0,315	0,181	0,167	0,635	3,260	0,001	0,050	18,035	5,137
D85	PET	37	200	0,1	A	2	X	3,146	29,600	4,173	0,195	0,486	0,182	0,953	6,287	0,021	0,309	30,057	6,599
D86	PET	37	200	0,15	A	2	X	4,931	38,091	6,34	0,183	0,520	0,186	3,359	14,433	0,009	0,047	38,930	4,297

										9									
D87	PET	33	200	0,1	A	3	L	5,478	43,735	7,525	0,326	0,382	0,328	0,968	5,968	0,025	0,448	44,714	6,166
D88	PET	35	200	0,1	A	4	L	5,834	52,877	8,934	22,926	10,588	11,274					53,943	
D89	PET	35	200	0,1	A	3	X	5,354	42,373	5,641	0,266	0,452	0,206	0,981	6,150	0,008	0,107	43,080	6,269
D90	PET	33	200	0,1	A	4	X	5,298	59,088	9,247	1,274	0,999	0,723	1,158	7,335	0,016	0,070	60,042	6,333
I81	POM ELS	37	200	0,05	A	2	L	2,083	11,153	1,284	0,241	0,244	0,171	0,845	3,695	0,083	0,245	11,418	4,375
I82	POM ELS	37	200	0,1	A	2	L	1,165	13,313	2,310	0,186	0,244	0,178	0,831	5,100	0,009	0,121	13,562	6,141
I83	POM ELS	37	200	0,15	A	2	L	2,340	16,340	2,455	0,171	0,292	0,143	3,332	14,933	0,017	0,262	16,688	4,482
I84	POM ELS	37	200	0,05	A	2	X	1,098	13,335	1,228	0,167	0,301	0,171	0,821	3,670	0,018	0,121	13,436	4,472
I85	POM ELS	37	200	0,1	A	2	X	1,804	14,946	1,852	0,204	0,259	0,182	0,823	4,727	0,007	0,052	15,168	5,741
I86	POM ELS	37	200	0,15	A	2	X	3,032	17,514	1,616	0,173	0,286	0,162	3,256	14,440	0,017	0,000	17,848	4,423
I87	POM ELS	33	200	0,1	A	3	L	2,529	17,315	3,275	0,326	0,302	0,176	0,872	5,527	0,007	0,082	17,802	6,335
I88	POM ELS	35	200	0,1	A	4	L	1,530	22,702	3,242	0,209	0,342	0,188	0,874	5,477	0,011	0,095	22,983	6,264
I89	POM ELS	35	200	0,1	A	3	X	3,002	19,535	2,131	0,248	0,312	0,174	0,886	5,307	0,007	0,172	19,879	5,992
I90	POM ELS	33	200	0,1	A	4	X	2,219	25,328	3,345	0,210	0,334	0,191	0,889	5,443	0,009	0,144	25,644	6,125
A1	PP	41	250	0,05	A	2	X	1,491	14,733	1,416	0,137	0,208	0,178	0,406	2,838	0,006	0,202	14,876	6,989
A2	PP	41	250	0,1	A	2	X	3,083	24,543	4,075	0,155	0,200	0,127	1,726	7,300	0,005	0,036	25,069	4,229
A3	PP	41	250	0,15	A	2	X	4,798	34,689	6,363	0,127	0,260	0,144	4,142	16,467	0,007	0,047	35,593	3,976
A4	PP	39	250	0,1	A	3	X	4,630	36,458	5,954	0,152	0,221	0,140	1,671	7,417	0,007	0,063	37,230	4,438
A5	PP	37	250	0,1	A	4	X	5,398	48,699	7,816	0,178	0,246	0,120	1,701	8,040	0,015	0,175	49,617	4,726
A6	PP	41	250	0,05	A-BAL	2	X	0,941	14,657	1,089	0,151	0,202	0,155	0,416	2,598	0,016	0,132	14,728	6,244
A7	PP	41	250	0,1	A-BAL	2	X	1,244	25,338	3,477	0,153	0,218	0,145	1,727	7,453	0,007	0,090	25,606	4,317
A8	PP	41	250	0,15	A-BAL	2	X	1,878	35,210	5,511	0,159	0,280	0,178	3,838	15,325	0,084	0,130	35,689	3,993
A9	PP	39	250	0,1	A-BAL	3	X	1,774	36,817	5,290	0,138	0,227	0,156	1,745	7,477	0,015	0,052	37,237	4,284
A10	PP	37	250	0,1	A-BAL	4	X	1,558	48,269	7,254	0,246	0,616	0,198	1,733	7,597	0,009	0,191	48,835	4,384
A11	PP	41	250	0,05	B	2	X	0,225	19,101	3,506	0,161	0,236	0,184	0,355	2,478	0,011	0,060	19,422	6,974
A12	PP	41	250	0,1	B	2	X	3,825	29,455	2,544	0,170	0,247	0,151	1,591	6,407	0,003	0,066	29,811	4,026
A13	PP	41	250	0,15	B	2	X	7,633	39,824	2,106	0,180	0,320	0,174	3,738	14,500	0,015	0,082	40,604	3,879
A14	PP	39	250	0,1	B	3	X	5,583	44,417	1,713	0,156	0,179	0,152	1,583	6,403	0,005	0,177	44,799	4,044
A15	PP	37	250	0,1	B	4	X	6,752	58,874	0,911	0,148	0,213	0,133	1,580	6,110	0,003	0,050	59,267	3,867
A16	PP	41	250	0,05	B-BAL	2	X	1,492	15,604	0,059	0,152	0,201	0,156	0,361	2,330	0,008	0,078	15,675	6,460

A17	PP	41	250	0,1	B-BAL	2	X	4,32 6	26,3 61	1,13 1	0,255	0,288	0,165	1,584	6,647	0,008	0,037	26,7 37	4,19 6
A18	PP	41	250	0,15	B-BAL	2	X	6,58 5	36,4 29	2,90 8	0,145	0,255	0,162	3,606	14,26 7	0,014	0,047	37,1 33	3,95 6
A19	PP	39	250	0,1	B-BAL	3	X	5,53 1	39,0 54	2,64 3	0,164	0,276	0,142	1,526	6,323	0,005	0,033	39,5 32	4,14 4
A20	PP	37	250	0,1	B-BAL	4	X	6,44 0	51,8 67	4,05 3	0,169	0,294	0,147	1,570	6,253	0,008	0,082	52,4 23	3,98 4
D1	PET	37	250	0,05	A	2	X	1,94 8	18,2 55	1,47 5	0,142	0,165	0,143	0,485	2,678	0,006	0,068	18,4 18	5,51 8
D2	PET	37	250	0,1	A	2	X	3,31 4	26,4 08	3,09 5	0,156	0,323	0,146	1,667	7,687	0,000	0,033	26,7 94	4,61 1
D3	PET	37	250	0,15	A	2	X	4,29 5	33,3 34	4,73 2	0,291	1,550	0,445	3,964	16,27 5	0,030	0,109	33,9 41	4,10 6
D4	PET	35	250	0,1	A	3	X	4,83 6	37,1 47	4,34 3	0,161	0,247	0,179	1,661	7,543	0,001	0,042	37,7 12	4,54 2
D5	PET	33	250	0,1	A	4	X	6,28 3	55,3 66	7,67 1	0,148	0,325	0,145	1,654	7,640	0,001	0,024	56,2 47	4,61 8
D6	PET	37	250	0,05	A-BAL	2	X	0,24 5	17,8 28	0,92 2	0,136	0,195	0,143	0,338	2,347	0,004	0,131	17,8 54	6,93 6
D7	PET	37	250	0,1	A-BAL	2	X	0,53 8	26,1 26	2,52 2	0,126	0,310	0,146	1,728	7,193	0,004	0,058	26,2 53	4,16 3
D8	PET	37	250	0,15	A-BAL	2	X	0,95 6	36,1 33	4,54 7	0,134	0,199	0,144	3,607	15,20 0	0,023	0,163	36,4 30	4,21 4
D9	PET	35	250	0,1	A-BAL	3	X	0,86 5	44,1 93	5,72 5	0,160	0,196	0,169	1,707	7,270	0,011	0,102	44,5 71	4,25 9
D10	PET	33	250	0,1	A-BAL	4	X	0,12 4	52,7 07	6,15 3	0,139	0,449	0,194	1,689	7,363	0,018	0,346	53,0 65	4,35 9
D11	PET	37	250	0,05	B	2	X	1,77 8	20,1 33	2,00 6	0,191	0,218	0,139	0,493	2,690	0,004	0,075	20,3 11	5,46 0
D12	PET	37	250	0,1	B	2	X	4,59 8	31,3 30	2,28 3	0,178	0,291	0,151	1,569	6,683	0,000	0,082	31,7 48	4,25 9
D13	PET	37	250	0,15	B	2	X	6,69 0	39,3 67	2,09 0	0,284	0,910	0,152	16,15 2	15,73 3	17,132	0,047	39,9 86	0,97 4
D14	PET	35	250	0,1	B	3	X	5,71 3	45,3 33	1,54 5	0,205	0,411	0,138	1,577	6,810	0,006	0,062	45,7 17	4,31 7
D15	PET	33	250	0,1	B	4	X	9,17 1	66,9 34	0,07 6	0,350	0,609	0,161	1,555	6,990	0,008	0,107	67,5 59	4,49 6
D16	PET	37	250	0,05	B-BAL	2	X	1,57 8	18,2 77	0,41 8	0,157	0,181	0,159	0,280	1,980	0,005	0,065	18,3 50	7,07 1
D17	PET	37	250	0,1	B-BAL	2	X	3,04 5	27,7 96	0,38 1	0,161	0,268	0,157	1,597	6,563	0,007	0,021	27,9 65	4,10 9
D18	PET	37	250	0,15	B-BAL	2	X	5,74 3	37,7 61	1,43 0	0,154	0,258	0,167	3,612	15,13 3	0,011	0,094	38,2 22	4,19 0
D19	PET	35	250	0,1	B-BAL	3	X	5,74 8	46,9 86	2,19 0	0,194	0,220	0,191	1,565	6,823	0,004	0,107	47,3 87	4,36 1
D20	PET	33	250	0,1	B-BAL	4	X	5,38 9	56,8 92	2,39 6	0,167	0,290	0,182	1,593	6,697	0,012	0,069	57,1 97	4,20 5
E1	PPSU	35	250	0,05	A	2	X	1,93 6	17,6 38	0,36 8	0,121	0,231	0,154	0,757	4,007	0,012	0,069	17,7 48	5,29 5
E2	PPSU	35	250	0,1	A	2	X	3,58 5	29,5 03	2,78 6	0,161	0,167	0,138	2,340	7,010	0,145	3,639	29,8 51	2,99 5
E3	PPSU	35	250	0,15	A	2	X	5,25 3	40,7 97	5,15 8	0,148	0,220	0,162	5,759	21,16 7	0,005	0,094	41,4 56	3,67 6
E4	PPSU	33	250	0,1	A	3	X	5,56 6	43,7 18	4,44 9	0,133	0,253	0,133	2,514	9,443	0,001	0,024	44,2 95	3,75 7
E5	PPSU	31	250	0,1	A	4	X	5,94 9	57,6 03	6,37 3	0,146	0,342	0,150	4,815	9,317	3,339	0,123	58,2 59	1,93 5
E6	PPSU	35	250	0,05	A-BAL	2	X												
E7	PPSU	35	250	0,1	A-	2	X												

					BAL														
E8	PPSU	35	250	0,15	A-BAL	2	X												
E9	PPSU	33	250	0,1	A-BAL	3	X												
E10	PPSU	31	250	0,1	A-BAL	4	X												
E11	PPSU	35	250	0,05	B	2	X	0,69 0	21,1 78	2,70 4	0,184	0,189	0,165	0,473	2,247	0,010	0,048	21,3 61	4,75 0
E12	PPSU	35	250	0,1	B	2	X	4,09 2	34,0 80	2,90 4	0,185	0,184	0,164	1,633	7,393	0,007	0,012	34,4 48	4,52 7
E13	PPSU	35	250	0,15	B	2	X	7,40 9	46,5 55	2,88 1	0,133	0,174	0,171	4,002	16,63 3	0,012	0,262	47,2 29	4,15 6
E14	PPSU	33	250	0,1	B	3	X	5,32 8	51,7 49	2,40 7	0,127	0,315	0,142	2,283	10,80 0	0,000	0,000	52,0 78	4,73 1
E15	PPSU	31	250	0,1	B	4	X	6,64 0	68,4 45	1,93 8	0,198	0,338	0,176	1,887	9,280	0,000	0,000	68,7 93	4,91 8
E16	PPSU	35	250	0,05	B-BAL	2	X												
E17	PPSU	35	250	0,1	B-BAL	2	X												
E18	PPSU	35	250	0,15	B-BAL	2	X												
E19	PPSU	33	250	0,1	B-BAL	3	X												
E20	PPSU	31	250	0,1	B-BAL	4	X												
L1	POM	29	250	0,05	A	2	X												
L2	POM	29	250	0,1	A	2	X												
L3	POM	29	250	0,15	A	2	X												
L4	POM	27	250	0,1	A	3	X												
L5	POM	25	250	0,1	A	4	X												
L6	POM	29	250	0,05	A-BAL	2	X	0,56 2	16,0 94	1,56 8	0,129	0,171	0,155	0,306	1,920	0,003	0,008	16,1 80	6,27 5
L7	POM	29	250	0,1	A-BAL	2	X	0,77 3	28,3 96	4,13 4	0,135	0,168	0,193	1,773	7,163	0,014	0,025	28,7 06	4,04 1
L8	POM	29	250	0,15	A-BAL	2	X	1,46 0	41,0 88	6,87 8	0,125	0,240	0,158	3,747	15,43 3	0,017	0,094	41,6 86	4,11 9
L9	POM	27	250	0,1	A-BAL	3	X	1,11 6	43,7 88	6,69 2	0,120	0,199	0,148	1,782	7,167	0,004	0,062	44,3 10	4,02 2
L10	POM	25	250	0,1	A-BAL	4	X	0,81 0	50,6 02	8,06 4	16,13 2	9,139	7,738					51,2 47	
L11	POM	29	250	0,05	B	2	X												
L12	POM	29	250	0,1	B	2	X												
L13	POM	29	250	0,15	B	2	X												
L14	POM	27	250	0,1	B	3	X												
L15	POM	25	250	0,1	B	4	X												
L16	POM	29	250	0,05	B-BAL	2	X	2,02 5	17,6 47	0,16 8	0,160	0,171	0,148	0,392	2,163	0,008	0,012	17,7 64	5,51 4
L17	POM	29	250	0,1	B-BAL	2	X	2,15 0	17,0 88	0,16 7	0,146	0,187	0,154	0,369	2,163	0,021	0,083	17,2 24	5,85 7
L18	POM	29	250	0,15	B-BAL	2	X	7,58 8	41,8 37	2,33 6	0,144	0,221	0,138	3,677	14,73 3	0,013	0,094	42,5 83	4,00 7
L19	POM	27	250	0,1	B-BAL	3	X	7,04 1	44,3 54	3,07 7	0,152	0,206	0,170	1,639	6,920	0,003	0,043	45,0 15	4,22 1
L20	POM	25	250	0,1	B-BAL	4	X	8,73 4	59,3 71	4,89 5	0,223	0,501	0,153	1,641	6,993	0,004	0,140	60,2 10	4,26 2
KA 1	PP	48	250	0,05	A1	2	X	1,92 6	14,3 46	0,89 3	0,178	0,202	0,162	0,786	3,760	0,010	0,048	14,5 02	4,78 2
KA 2	PP	48	250	0,1	A1	2	X	3,46 7	23,8 41	3,43 5	0,167	0,239	0,204	1,624	7,865	0,014	0,091	24,3 35	4,84 3
KA 3	PP	48	250	0,15	A1	2	X	4,57 4	33,0 52	5,79 9	0,165	0,287	0,160	3,615	16,25 0	0,145	0,206	33,8 67	4,49 6

KA 4	PP	46	250	0,1	A1	3	X	4,98 8	34,8 53	4,73 3	0,172	0,318	0,150	1,582	7,627	0,010	0,127	35,5 25	4,82 0
KA 5	PP	44	250	0,1	A1	4	X	5,27 5	46,4 30	6,39 1	0,145	0,395	0,170	1,618	7,865	0,006	0,119	47,1 64	4,86 2
KA 6	PP	48	250	0,05	A2	2	X	1,58 0	15,2 89	2,57 9	0,166	0,271	0,174	0,528	3,080	0,005	0,073	15,5 86	5,83 3
KA 7	PP	48	250	0,1	A2	2	X	2,64 2	25,4 37	2,16 2	0,175	0,243	0,166	1,884	8,760	0,007	0,089	25,6 65	4,65 0
KA 8	PP	48	250	0,15	A2	2	X	4,27 4	33,7 45	4,60 6	0,184	0,264	0,173	4,633	18,16 7	0,029	0,205	34,3 25	3,92 1
KA 9	PP	46	250	0,1	A2	3	X	4,41 7	37,1 90	3,41 1	0,180	0,262	0,181	1,900	8,718	0,013	0,066	37,6 06	4,58 9
KA 10	PP	44	250	0,1	A2	4	X	4,91 4	48,6 94	3,86 7	0,163	0,327	0,152	1,904	8,637	0,003	0,088	49,0 93	4,53 7
KA 11	PP	48	250	0,05	A3	2	X	1,65 4	15,2 88	2,82 6	0,184	0,257	0,177	0,544	3,208	0,007	0,117	15,6 35	5,89 3
KA 12	PP	48	250	0,1	A3	2	X	2,80 1	24,5 19	1,84 9	0,184	0,213	0,186	1,747	7,853	0,012	0,066	24,7 48	4,49 4
KA 13	PP	48	250	0,15	A3	2	X	4,18 7	34,2 98	4,98 7	0,181	0,245	0,147	4,143	17,43 3	0,013	0,047	34,9 11	4,20 8
KA 14	PP	46	250	0,1	A3	3	X	5,23 1	36,0 36	2,59 4	0,155	0,256	0,168	1,760	7,940	0,012	0,028	36,5 06	4,51 1
KA 15	PP	44	250	0,1	A3	4	X	4,95 3	49,7 07	3,66 0	0,657	0,651	0,370	1,784	8,333	0,002	0,114	50,0 87	4,67 2
KA 16	PP	48	250	0,05	A4	2	X	1,88 8	16,9 14	5,56 9	0,182	0,212	0,187	0,572	3,387	0,004	0,025	17,9 07	5,91 7
KA 17	PP	48	250	0,1	A4	2	X	2,99 0	26,2 14	0,87 4	0,150	0,232	0,164	1,816	8,500	0,010	0,099	26,3 98	4,68 0
KA 18	PP	48	250	0,15	A4	2	X	4,35 2	35,5 43	2,61 5	0,169	0,233	0,152	4,259	18,20 0	0,015	0,082	35,9 03	4,27 4
KA 19	PP	46	250	0,1	A4	3	X	5,38 9	38,4 33	1,00 3	0,146	0,610	0,189	1,801	8,460	0,004	0,099	38,8 22	4,69 7
KA 20	PP	44	250	0,1	A4	4	X	5,56 9	51,5 69	0,45 8	0,855	0,441	0,482	1,846	8,807	0,002	0,094	51,8 71	4,77 0
KD 1	PET	47	250	0,05	A1	2	X	2,69 5	19,6 86	0,20 1	0,181	0,543	0,158	0,608	3,300	0,007	0,067	19,8 71	5,42 5
KD 2	PET	47	250	0,1	A1	2	X	4,28 1	31,3 25	3,08 0	0,148	0,687	0,180	1,513	6,987	0,005	0,111	31,7 66	4,61 8
KD 3	PET	47	250	0,15	A1	2	X	5,40 6	40,6 71	5,29 5	0,177	0,489	0,162	3,633	16,07 5	0,030	0,083	41,3 69	4,42 4
KD 4	PET	45	250	0,1	A1	3	X	6,07 4	45,4 71	3,96 9	0,164	0,363	0,165	1,542	7,155	0,010	0,043	46,0 46	4,64 0
KD 5	PET	43	250	0,1	A1	4	X	5,91 2	52,3 11	4,34 9	0,156	0,413	0,181	1,542	7,183	0,003	0,074	52,8 24	4,65 8
KD 6	PET	47	250	0,05	A2	2	X	1,71 3	19,8 08	4,68 1	0,191	0,431	0,172	0,621	3,248	0,006	0,038	20,4 25	5,22 9
KD 7	PET	47	250	0,1	A2	2	X	3,86 6	34,7 64	1,70 2	0,207	0,488	0,171	1,834	8,205	0,016	0,177	35,0 20	4,47 4
KD 8	PET	47	250	0,15	A2	2	X	5,41 4	44,7 86	2,36 7	0,169	0,627	0,177	4,313	16,97 5	0,025	0,130	45,1 74	3,93 6
KD 9	PET	45	250	0,1	A2	3	X	5,73 2	47,5 26	2,17 7	0,179	0,430	0,195	1,805	7,920	0,021	0,146	47,9 20	4,38 9
KD 10	PET	43	250	0,1	A2	4	X	5,66 2	57,1 69	6,47 4	0,155	0,243	0,177	1,878	8,510	0,007	0,191	57,8 12	4,53 1
KD 11	PET	47	250	0,05	A3	2	X	2,32 4	21,6 05	5,41 4	0,170	0,486	0,198	0,724	3,625	0,003	0,056	22,3 94	5,00 9
KD 12	PET	47	250	0,1	A3	2	X	4,16 9	35,6 80	1,07 2	0,198	0,379	0,162	1,705	7,573	0,011	0,047	35,9 39	4,44 1
KD 13	PET	47	250	0,15	A3	2	X	4,46 9	38,0 39	1,73 9	0,226	0,591	0,213	3,929	16,50 0	0,009	0,141	38,3 40	4,19 9
KD 14	PET	45	250	0,1	A3	3	X	5,23 1	36,0 37	2,59 5	0,153	0,256	0,168	1,704	7,567	0,018	0,094	36,5 07	4,44 1
KD 15	PET	43	250	0,1	A3	4	X	6,57 3	66,4 08	2,73 0	0,190	0,359	0,377	1,713	7,628	0,012	0,105	66,7 88	4,45 4
KD 16	PET	47	250	0,05	A4	2	X	1,88 8	16,9 14	5,56 9	0,182	0,211	0,187	1,127	5,968	0,007	0,078	17,9 07	5,29 4

KD 17	PET	47	250	0,1	A4	2	X	4,11 3	37,2 12	5,33 7	0,205	0,620	0,211	1,704	7,753	0,014	0,140	37,8 17	4,55 0
KD 18	PET	47	250	0,15	A4	2	X	4,73 6	42,4 89	1,54 6	0,167	0,583	0,183	4,042	17,56 7	0,028	0,047	42,7 81	4,34 6
KD 19	PET	45	250	0,1	A4	3	X	6,13 1	50,2 22	6,98 5	0,161	0,404	0,200	1,702	7,770	0,008	0,261	51,0 75	4,56 5
KD 20	PET	43	250	0,1	A4	4	X	7,18 2	69,7 27	7,83 7	0,172	0,613	0,218	1,650	8,013	0,010	0,026	70,5 32	4,85 8