



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Polimertechnika Tanszék

## TDK dolgozat

# Elektro-szállépzési eljárás optimálása poliakrilnitril nanoszálak előállítására

"A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta."

**Készítette:**

Kovács Tamás István  
(AXR6ZG)

**Konzulensek:**

Molnár Kolos  
doktorandusz

Dr. Mészáros László  
egyetemi adjunktus

2012

## Tartalom

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3. A technológiai paraméterek hatása a szál tulajdonságaira.....                                                 | 7  |
| 2.4. A nanoszálak struktúrák felhasználási területei.....                                                          | 8  |
| 2.5. A technológia fejlődési irányai.....                                                                          | 10 |
| 2.6. A manapság alkalmazott nanoszál gyártási technológiák bemutatása .....                                        | 10 |
| 2.6.1. A sok párhuzamos kapillárist alkalmazó gyártási technológia .....                                           | 10 |
| 2.6.2. A Nanospider technológia.....                                                                               | 12 |
| 2.6.3. Szabályozott elektrosztatikus szálképzés.....                                                               | 15 |
| 2.6.4. Elektrosztatikus szálképzés polimer oldattal töltött tálból.....                                            | 16 |
| 2.7. Irodalomkutatás összefoglalása .....                                                                          | 18 |
| 2.8. Célkitűzés.....                                                                                               | 18 |
| 3. Az új nanoszálképzésre alkalmas fej tervezése és kivitelezése.....                                              | 18 |
| 3.1 Előzmények.....                                                                                                | 18 |
| 3.2. A Polimertechnika Tanszéken tervezett nanoszál előállítási technológia és annak problémáinak bemutatása ..... | 19 |
| 3.3. A technológia alkalmazása során felmerült problémák részletezése.....                                         | 20 |
| 3.4. A tervezés során figyelembe vett szempontok.....                                                              | 23 |
| 4. A szálképző fejek vizsgálata üzem közben.....                                                                   | 27 |
| 4.1. A polimer szálképző fej üzem közben.....                                                                      | 27 |
| 4.2. A fémből készült szálképző fej üzem közben .....                                                              | 29 |
| 5. A különböző gyártási eljárással készült nanoszálak vizsgálata .....                                             | 30 |
| 6. Összefoglalás.....                                                                                              | 32 |
| 7. További fejlesztési lehetőségek a területen.....                                                                | 32 |
| 8. Köszönetnyilvánítás.....                                                                                        | 33 |
| Irodalomjegyzék:.....                                                                                              | 34 |

## **1. Bevezetés**

A modern kompozit szerkezetek kialakításánál, a mechanikai tulajdonságok javítása régóta tudományos kihívást jelent. A megfelelő szilárdsági tulajdonságok elérésének érdekében számos szintetikus szálát fejlesztettek ki. A nagyteljesítményű polimer kompozitok erősítőanyagaként igen gyakran szénszálakat alkalmaznak. A szilárdsági tulajdonságok javulása azonban elérhető az erősítőszálak átmérőjének csökkentésével is, ami egészen a nanométeres tartományig kiterjeszthető. Az egyre vékonyodó szálakkal nem csak az anyagban rejlő szilárdsági tulajdonságok aknázhatók ki, hanem egyéb, különleges anyagtulajdonságok is szerepet kapnak, pl. biokompatibilitás, légáteresztő képesség. Teljesen más, nem szerkezeti anyagok irányába történő fejlesztések is egyre gyorsabb ütemben zajlanak. Ennek hatására az egész világon nagy igény mutatkozik a nanoszálak iránt. Ezt csak egyre hatékonyabb és termelékenyebb technológiák bevezetésével lehet gazdaságosan kielégíteni. Ezért lett a nanotechnológia egy kiemelten támogatott kutatási terület napjainkban.

## **2. Irodalomkutatás**

A TDK dolgozatom jelen fejezete definiálja a nanotechnológiát, részletezi az elektrosztatikus szálképzés technológiáját és a nanoszálak struktúrák leggyakoribb felhasználási területeit. Továbbá bemutatja a manapság szabadalmaztatott és iparilag alkalmazott nanoszál gyártási technológiákat.

### **2.1. A nanotechnológia általános bemutatása**

Sok különböző meghatározás létezik a nanotechnológiára, mint fogalomra, amelyek közül az egyik El-Naschie meghatározása: olyan fizikával, kémiával és biológiával kapcsolatos technológia, amelynek folyamatai a méter százmilliomod részének tartományában játszódnak le. Másképp mondva a nanotechnológia olyan kis eszközök, gépek és rendszerek készítésének a művészete, melyek újszerű tulajdonságokkal rendelkeznek [1].

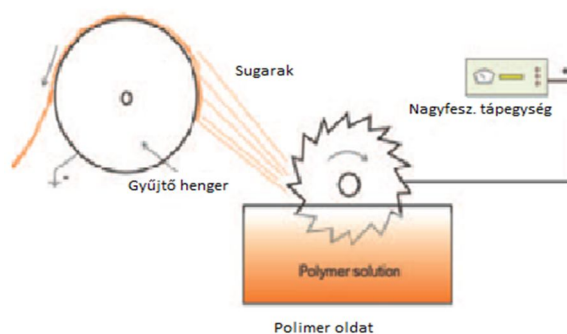
Az atomok mérete durván ångström (Å) méretű, például egy H atom 1 Å, míg egy C atom 2 Å átmérőjű. 1 Å a nanométer tizede. Ebben a mérettartományban kvantum-szerű jelenségek játszódnak le. Tehát mondhatjuk azt, hogy a nanotechnológia a kvantum fizikai és klasszikus fizikai jelenségek határmezsgyéjén mozog. A klasszikus fizika írja

le a szabad szemmel látható tárgyak mozgását. Ezek a mechanizmusok determinisztikus törvényeket követnek, amelyeket nagy pontossággal tudunk leírni. Ezzel ellentétben a kvantum fizikai jelenségek, amelyek az elektronok, neutronok, protonok viselkedését, mozgását modellezik, teljes mértékben valószínűségi jellegűek. Ez azt jelenti, hogy nem ismerjük az elektron pontos mozgását, csak a különböző pontokban a megtalálási valószínűségüket. A Heisenberg féle határozatlansági reláció szerint elvileg sem lehetséges az elemi részecskék mérhető változóinak, pl. sebesség vagy a hely meghatározása pontosan egy időpillanatban [1].

A nanotechnológia kapcsolódik mind a determinisztikus klasszikus mechanizmusokhoz, mind a kaotikus kvantum-mechanizmusokhoz. Kell, hogy legyen egy olyan törvény, ami kapcsolatot teremtsen a két rendszer között. A most vizsgált mérettartományban van a határ a két rendszer között, de ez nem egy hirtelen ugrásszerű változás, hanem egyfajta átmenet, ahol egyik rendszer sem kizárólagos. A nanoskálán néhány új tulajdonság jelenik meg, melyek eredete sok esetben nem teljesen ismert [1].

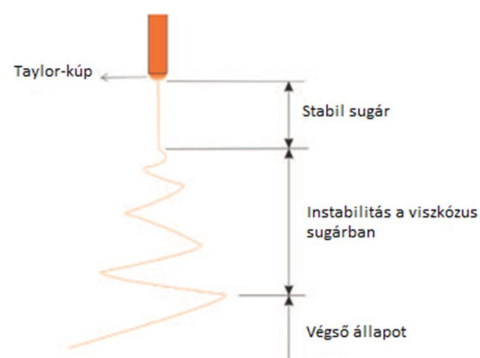
## **2.2. Az elektrosztatikus szálképzés (electrospinning) leírása**

Több különböző módszer segítségével készíthetünk nanoszálakat. Néhány példa: hagyományos szálhúzáshoz hasonlatosan, gyárthatunk nanoszálakat úgy, hogy néhány mikronos nyílású mikropipettán át húzzuk; vagy például szén nanocsövek, nanoszál tömbök és elektromosan vezető polimer struktúrák szintézisével; továbbá használhatunk fázisszétválasztásos módszert nanoporózus nanoszálak készítéséhez. Most a TDK munkám címében is szereplő elektrosztatikus szálképzést mutatom be részletesebben. Az elektrosztatikus szálképzés a legolcsóbb és leginkább előremutató módja a nano-alapanyagok gyártásának. A módszer használata 1934-ig nyúlik vissza, Formhals [2] szabadalmaztatott egy tapasztalati úton összeállított gépet (1. ábra), amely segítségével polimer szálakat készítettek elektrosztatikus erő felhasználásával.



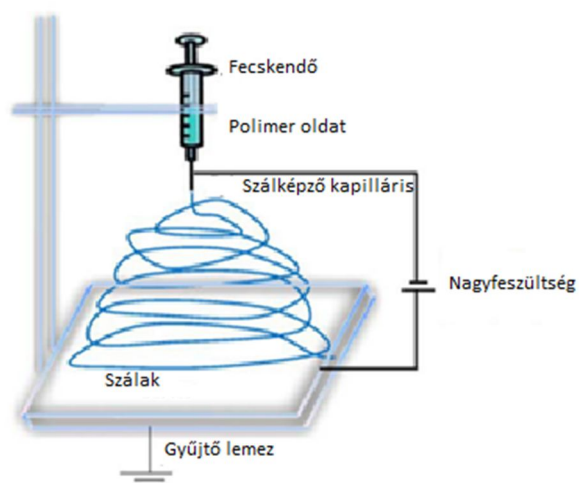
**1. ábra Formhals által szabadalmaztatott gép [2]**

Az elektrosztatikus szálképzés során, amely egy újszerű, szuperfinom szálak gyártására alkalmas módszer, nagyfeszültségű elektromos tér segítségével képeznek szálakat polimer oldatból vagy ömledékből. Az így készült szálaknak jóval kisebb az átmérőjük és nagyobb a fajlagos felületük, mint a hagyományos technikával készített szálaknak [4]. Viskózus polimer oldat vagy ömledék egy szálképző fejre kerül, mely legegyszerűbb esetben egy tű. Itt az anyag csepp alakot vesz fel. Az elektromos mező hatására a csepp egy ún. Taylor kúpot formáz, majd egy anyagsugarat képezve kerül a földelt elektródára. A Taylor kúp az elektromos térerősség és a felületi feszültség egyensúlya miatt alakul ki [3]. Egy kritikus elektromos feszültség értéket meghaladva egy töltött sugár lép ki a földelt elektróda felé. A mozgása (2. ábra) egy rövid stabil szakasz után oszcilláló lesz és az inga mozgásához hasonlóan halad tovább. A mozgást három erő hatása alakítja, melyek az elektrosztatikus erő, a viszkózus erő és a tehetetlenségi erő [1].

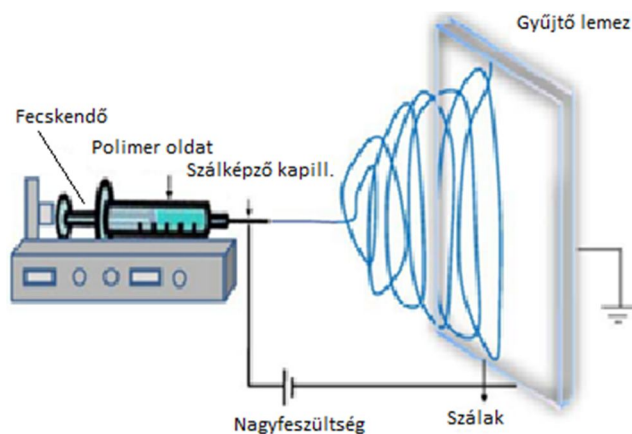


**2. ábra A szálképzés során a polimer útja a két elektróda között, a különböző szakaszok feltüntetésével [1]**

Néhány 10 kV-os potenciálkülönbség hatására megy végbe a szálképzési folyamat. A folyamat elméleti alapja az, hogy az azonos töltésű részecskék között létrejövő taszító erő erősebb, mint a folyadékban a felületi feszültség. Alapvetően lehet horizontális (3. ábra) vagy vertikális (4. ábra) elrendezésű a szálképző berendezés, továbbá kifejlesztésre kerültek olyan összetett rendszerek, melyekkel kontrollált módon lehet speciális nanoszerkezeteket készíteni [4].



3. ábra A vertikális szálképzés elvi vázlata [5]



4. ábra A horizontális szálképzés elvi vázlata [5]

Az elektrosztatikus szálképzés rendszerint szobahőmérsékleten, normál légköri nyomáson zajlik. A rendszer alapvetően 3 fő egységből áll: a nagyfeszültségű tápegység, szálképző fej és a földelt gyűjtőlemez. Először a polimer oldatot bevezetik

egy kapilláris csőbe. Az oldatot megtartja a felületi feszültsége a kapilláris végén, mely egyben az egyik elektróda is. A töltések a folyadék felszínén helyezkednek el, és mikor a feszültség elér egy kritikus értéket, akkor az azonos töltésű részecskék taszítása miatt a Coulomb erők felülkerekednek a felületi feszültségen, és a Taylor-kúp hegyéről töltött polimer oldat távozik. Amíg nem éri el a gyűjtő lemezt, addig az oldószer elpárolog és marad a polimer (a mondatot átírnám). Széles körben használhatunk polimereket nanoszálak előállítására, lehetnek természetesek és szintetikusak is. Az előállításához az oldószer elpárolgása miatt jól szellőző kamra szükséges.

A gyűjtő elektróda kialakítása legegyszerűbb esetben egy földelt lemez. Léteznek mozgó elektródák is. Ezek jellemzően hengeres kialakításúak. Lehet egy forgó orsó, amit kiegészíthetnek még más elektródákkal is, így egy külső elektromos térrel is tudják befolyásolni a szálak elrendeződését. Lehet egy éles peremmel rendelkező forgó korong is az elektróda. Így a szálak orientáltan rakódnak le. Ritkább esetben keretre tekercselik a szálakat [4].

### **2.3. A technológiai paraméterek hatása a szál tulajdonságaira**

Az elektrosztatikus szálképzés folyamatát befolyásoló paramétereket a következő három csoportba soroljuk: az oldat paraméterei, a feldolgozás paraméterei, illetve a külső tényezők.

Az oldat paraméterei lehetnek a viszkozitás, a vezetőképesség, a molekulatömeg, a felületi feszültség. A feldolgozás paraméterei az alkalmazott feszültség, az elektródák távolsága és a polimer oldat tömegárama. Ezek mind nagymértékben befolyásolhatják a szál morfológiai tulajdonságait, így ezek változtatásával tudjuk beállítani a kívánt tulajdonságokat. Ezen kívül figyelmet kell fordítani a külső tényezőkre is, mint például a páratartalom, vagy a környezeti hőmérséklet, ugyanis ezek is szerepet játszanak a morfológia kialakulásában [5].

A különböző hatásokat röviden táblázatos formában vázolom(1. táblázat):

| <b>Paraméterek</b>              | <b>Hatásuk a szál morfológiára</b>                                                                                                 |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Oldat paraméterei</b>        |                                                                                                                                    |
| Viszkozitás                     | Alacsony viszkozitás hatására gyöngyök keletkeznek, a növekvő viszkozitás csökkenti gyöngyök kialakulását és növeli a szálátmérőt. |
| Polimer koncentráció            | A koncentráció növelésével nő a szál átmérő                                                                                        |
| Molekula tömeg                  | A növekvő molekulatömeg hatására a gyöngyök és a cseppek száma csökken.                                                            |
| Vezetőképesség                  | A vezetőképesség javulásával csökken a szálátmérő                                                                                  |
| Felületi feszültség             | Nincs hatással a morfológiai szerkezetre, de a nagy felületi feszültség instabilitást okoz a sugárban                              |
| <b>Feldolgozási paraméterek</b> |                                                                                                                                    |
| Alkalmazott feszültség          | A növekvő feszültséggel csökken a szálátmérő                                                                                       |
| Az elektródák közötti távolság  | A túl kis és túl nagy elektróda távolság hatására is gyöngyök alakulnak ki.                                                        |
| Az oldat tömegárama             | A csökkenő tömegáram csökkenti a szálátmérőt, a túl nagy térfogatáram hatására gyöngyök alakulnak ki.                              |
| <b>Külső tényezők</b>           |                                                                                                                                    |
| Páratartalom                    | A magas páratartalom körkörös pórusokat eredményez a szálon                                                                        |
| Hőmérséklet                     | A növekvő hőmérséklet csökkenti a szálátmérőt.                                                                                     |

1. táblázat A technológiai paraméterek hatása a szálra [5]

#### 2.4. A nanoszálak struktúrák felhasználási területei

A nanoszálak kedvező tulajdonságait próbálják kihasználni, melyek a nagy felület a térfogathoz képest, a porózusság és a jó mechanikai tulajdonságok, melyek széles határokon belül pontosan beállíthatóak. Jellemzően nem szerkezeti kompozit anyagok erősítőszálaként használják. Ezen a területen kevés tapasztalat és irodalmi adat áll rendelkezésre. Leginkább az orvosi alkalmazások az elterjedtek. Használják az orvosbiológiában, a sebgyógyítás területén, szövetvázaknak, a hatóanyagok megfelelő helyre történő eljuttatására a szervezetben, bizonyos enzimek blokkolására, ezenkívül készítenek kis átmérőjű értoldal implantátumokat is. Más műszaki területeken is

használnak nanoszál as anyagokat. Jó szűrők készíthetők belőlük, használják védelmi és biztonsági területen, energiatárolásban és - termelésben, valamint környezetmérnöki területeken is[4].

A nanoszálak azért alkalmasak szövetvázaknak, mert nagy a felületük, biokompatibilis anyagokból készíthetők, porózusak. Szinte mindenfajta szövet növeszthető rajtuk, pl. csont, ideg, szív és érfal szövetek. A sejtek jól meg tudnak tapadni a felületen [4].

A sebgyógyításra azért alkalmas, mert nem engedi át magán a baktériumokat, így azok nem juthatnak be a sebbe, a vizet és az oxigént viszont átereszt. Funkcionális tapadás is elérhető, így a kötőszövet csak az ép bőrhez tapad, ezáltal a későbbi eltávolítása fájdalommentes. Nem utolsó sorban olcsón előállítható [4].

A szűrők gyártásánál a két legfontosabb tényező a szűrés hatásfoka és a minél kisebb áramlási veszteség. A szűrés hatásfoka nagymértékben függ a szálak finomságától. Az elektrosztatikus szálképzéssel gyártott szűrők segítségével 0,5  $\mu\text{m}$ -nél kisebb részecskék is felfoghatóak. Ezek a fajta szűrők is feltölthetők elektromosan, így sztatikusan vonzzák magukhoz a részecskéket. Sőt a szálakat bevonhatjuk különböző reagensekkel, aminek hatására csak bizonyos típusú molekulákat jeleznek vagy szűrnék ki. Ezen az elven alapulva készülnek katonai öltözékek és textíliák, melyek a levegőt és az izzadságot átengedik, viszont a harcászati gázokat nem [4].

Az elektronikában jellemzően elektromosan vezető anyagból készült nanoszál struktúrákat alkalmaznak. Jól ismert tény, hogy az elektrokémiai reakciók mértéke arányos az elektródák felületével. Így készíthetők nagy hatásfokú akkumulátorok. Sőt használhatjuk az elektrosztatikus és elektromágneses zavarok elleni árnyékolásokhoz is [4].

Egy speciális eljárással készíthetünk különböző anyagokból, például fémekből nanocsöveket. Az eljárás során először hőérzékeny polimerből készítenek valamiféle nanoszál struktúrát, majd valamilyen felület bevonó eljárással, pl.: fizikai vagy kémiai gőzfázisú rétegleválasztás (PVD vagy CVD). Egy nagyon vékony fém réteget alakítanak ki a szálaikon. Következő lépésben hőkezelik olyan hőmérsékleten, ahol a polimer maganyag lebomlik, és megmarad a fém nanocső. Ezáltal elektromosan vezető vagy nagy hőállósággal rendelkező anyagból is létrehozhatnak nanoszálakat [6].

## **2.5. A technológia fejlődési irányai**

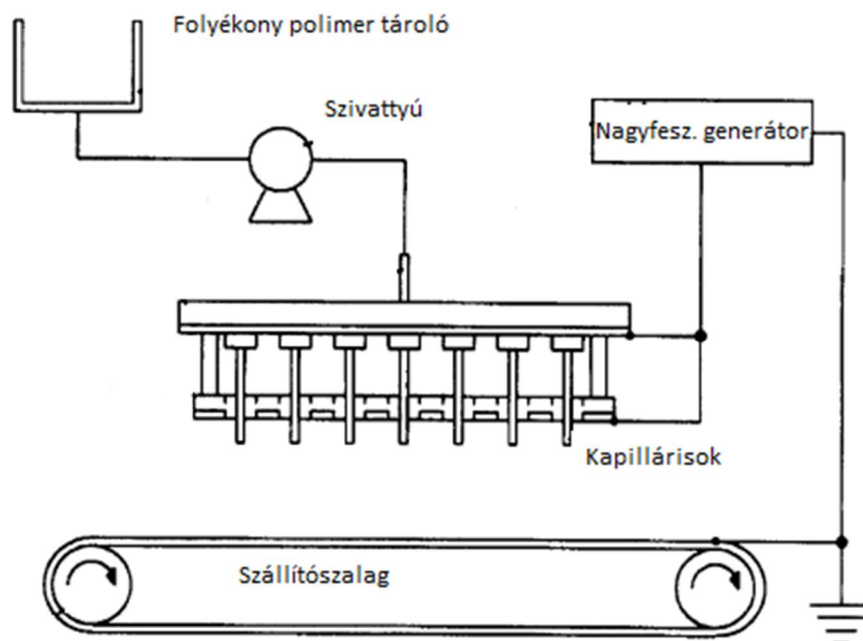
A fejlődésnek egy fontos iránya lehet, hogy minél homogénebb struktúrát lehessen létrehozni. Lényeges olyan technológia alkalmazása, hogy a szálak átmérője minél kisebb szórást mutasson, ne legyenek a szálhossz mentén kialakult gyöngyök, megvastagodások vagy elvékonyodások. A szálak hossza is lehetőleg tervezett hosszúsághoz közel essen. Az összegyűjtött szálak lehetőleg ne képezzenek aggregátumokat, mint a szén nanocsövek esetében.

Másik lehetőség a termelékenység növelése, ezzel ipari méretekben is gazdaságosan kivitelezhető gyártási technológiák kifejlesztése. Ezáltal egyre szélesebb területeken, tömegtermékekben is elterjedhetne a nanoszálak alkalmazása.

## **2.6. A manapság alkalmazott nanoszál gyártási technológiák bemutatása**

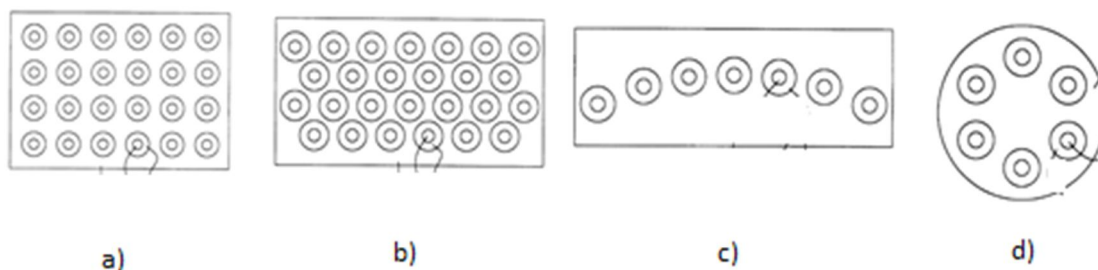
### **2.6.1. A sok párhuzamos kapillárist alkalmazó gyártási technológia**

Ez a gyártási eljárás nagyban hasonlít a legegyszerűbb elektrosztatikus szálképzésre (5. ábra). A fő különbség az, hogy itt nem egy, hanem több kapillárist használnak. Egy vagy több féle folyadék állapotú polimert nyomás alá helyeznek, majd a nagyfeszültségű tápegységre kapcsolt tűkön keresztül átvezetik. A szálképzés után a nanoszálakat az ellentétes töltésű futószalagon gyűjtik, melyet meghatározott sebességgel mozgatnak [7].



**5. ábra A sok párhuzamos kapillárist használó elektrosztatikus szálképzési módszer technológiájának sematikus ábrázolása [7]**

Különbőféleképpen lehet a szálképző tüket elrendezni (6. ábra). A vezető alaplapon lehetnek egy körív mentén bizonyos távolságonként kapillárisok. Lehetnek sorban egymás mellett, a sorok egy fél periódussal eltolva. Lehetnek négyzetesen sorokban és oszlopokban, továbbá egymás mellé elhelyezett telepekben, ahol a telepen belül egy kör mentén található több kapilláris. A különböző elrendezés módok lehetővé teszik különféle tű sűrűség kialakítását, illetve ki lehet úgy alakítani a struktúrát, hogy szálképzés közben minél kevésbé zavarják egymást a kapillárisok és ne alakuljanak ki instabilitások [7].



**6. ábra A kapillárisok elhelyezkedésének lehetőségei a) négyzetesen sorokban oszlopokban, b) sorokban egymás mellett egy fél periódussal eltolva, c) egy körív mentén, d) kör mentén elhelyezve telepekben [7]**

### 2.6.2. A Nanospider technológia

Ezt a technológiát a Libereci Műszaki Egyetemen fejlesztették ki, és az Elmarco s.r.o. cég végzi a forgalmazását. Segítségével kifejezetten ipari méretekben lehet viszonylag olcsón és egyszerűen nanoszálak szerkezeteket előállítani. Az eljárás kiküszöböli a soktűs eljárás hátrányait. Ott ugyanis nehézkes a tűsorok tisztítása, a szálképző sugarak elhelyezkedése a tűk elhelyezkedésétől függ, nem tud kialakulni egy önrendező rendszer, így a gyártás folyamán instabilitások léphetnek fel. A hagyományostól eltérően itt nem használnak tűt. Helyette egy polimer oldatba mártott forgó dobót használnak a szálképzésre (7. ábra). Többféle forgó elektródát kifejlesztettek, de az egyszerű henger alakú bizonyult a legtermelékenyebbnek (8. ábra).



7. ábra A Nanospider működés közben, jól láthatóak a szálak és a szálképzéshez használt forgódob



8. ábra A különböző kialakítású forgó hengerek

Rájöttek, hogy vékony folyadék film segítségével is ki tudnak alakítani szálképző sugarakat, ha a feszültség elér egy kritikus értéket. Ezek száma és eloszlása matematikailag is jól leírható. Lukaš és társai bebizonyították, hogy a folyamat az Euler egyenletek módosított változataival modellezhető (1) [8]:

$$\nabla \left( \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + p \right) = 0 \quad (1)$$

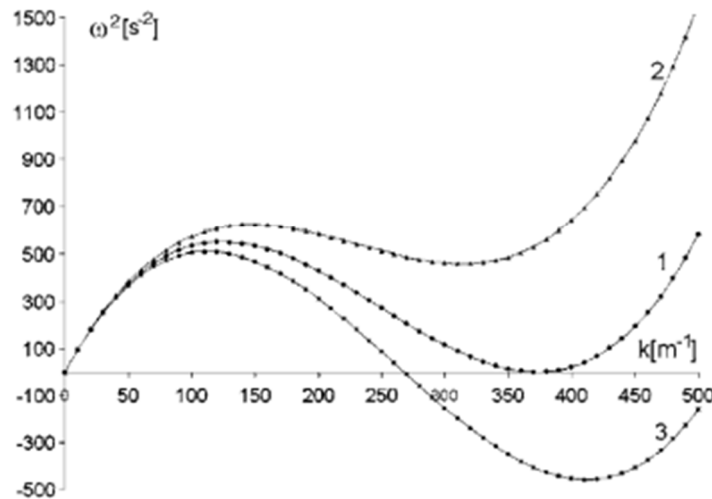
ahol  $\Phi$  a skaláris sebesség potenciál,  $p$  a hidrosztatikai nyomás,  $\rho$  a folyadék sűrűsége.

Visszavezették az eloszlástörvényt a hullámokra a következő formában (2):

$$\omega^2 = (\rho g + \gamma k^2 - \varepsilon E_0^2 k) \frac{k}{\rho} \quad (2)$$

Ahol:  $E_0$  az elektromos térerősség nagysága,  $\gamma$  pedig a felületi feszültség.

A körfrekvencia  $\omega$  és a hullámszám  $k$  kapcsolata az (9. ábra) látható. A paraméter az elektromos térerősség. Amikor az elektromos térerősség elér egy kritikus értéket ( $E_c$ , i-es görbe), akkor  $\omega^2$  negatív lesz, így  $\omega$  értéke imaginárius értéket vesz fel, ezért a folyadék felszíni hullámainak amplitúdója exponenciálisan nő (3), ami pedig instabilitáshoz vezet [8].



9. ábra A kapcsolat a körfrekvencia és a hullámszám között. Az elektromos térerősség a paraméter, mely a görbe számával növekszik [8]

$$\xi = Ae^{qt} \exp(ikx) \quad (3)$$

A kritikus térerősség (4) a következőképpen fejezhető ki

$$E_c = \sqrt[4]{\frac{4\gamma\rho g}{\varepsilon^2}} \quad (4)$$

Ebből az egyenletből kifejezték a kritikus térköz értéket (5), ami megmutatja az átlagos távolságot az egyes sugarak között, így a paraméterek változtatásával a térköz módosulása számítható (6) (10. ábra)(11. ábra).

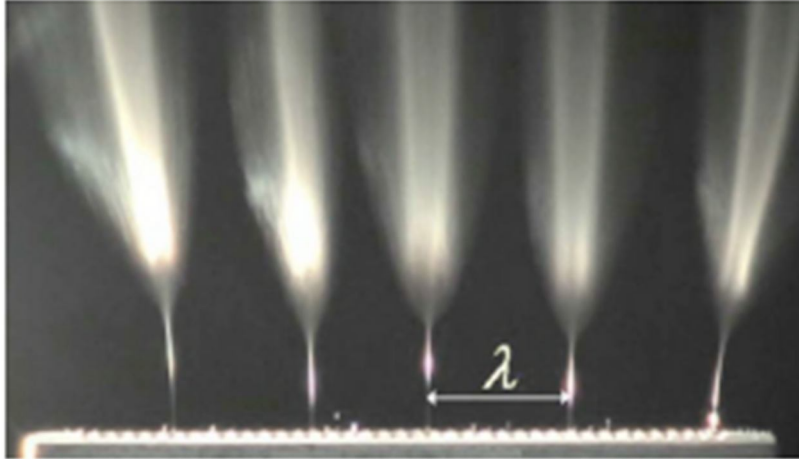
$$\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} = 2\pi a \quad (5)$$

és

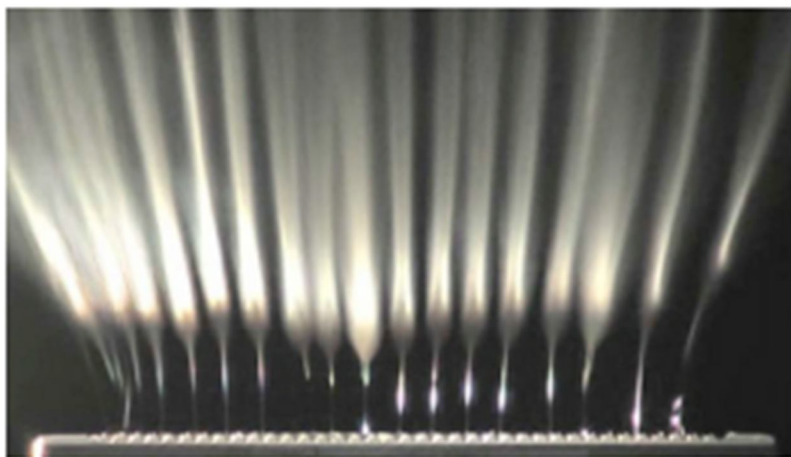
$$\lambda = \frac{12\pi\gamma}{2\varepsilon E_0^2 + \sqrt{(2\varepsilon E_0^2)^2 - 12\gamma\rho g}} \quad (6)$$

a  $a$  kapilláris hossza (7)

$$a = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (7)$$



**10. ábra** A ismert paraméterek mellett  $\lambda$  távolságonként alakulnak ki sugarak a szálképző henger mentén [8]

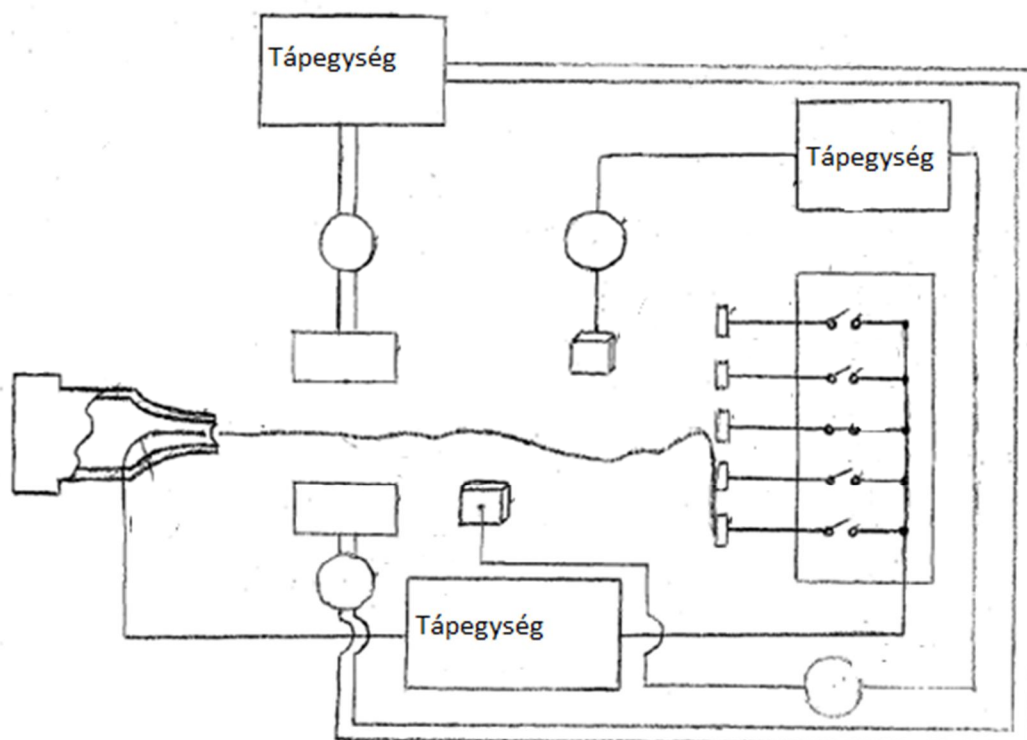


**11. ábra** Ha a paramétereket módosítjuk, akkor a  $\lambda$  értékek is változnak, de a szabályosság továbbra is megfigyelhető [8]

### **2.6.3. Szabályozott elektrosztatikus szálképzés**

A gyártási folyamat nagyban hasonlít a hagyományos elektrosztatikus szálképzésre (12. ábra). A fő különbség abból adódik, hogy itt a gyűjtőlemezből található több darab. Ezek mindegyike külön-külön földpotenciálra van kapcsolva, de valamilyen kapcsolón keresztül. Ezeket a kapcsolókat kapcsolgatva, de úgy hogy egy mindig zárt állapotban van, tudjuk szabályozni a szálképzés folyamatát. Lehet alakítani a szálak tulajdonságait, orientációját, elrendezését, nyújtását. A kapcsolókat lehet vezérelni számítógéppel vagy valamilyen más controllerrel. Ezek a kapcsolók szinkronizálva vannak az oldalt levő elektromágnesekkel és elektródákkal. Ezek a sugárra merőleges homogén mágneses és elektromos mezőt hoznak létre. Így a sugár szóródását lehet befolyásolni.

Ilyen sok szabályzási lehetőséggel már nem csak egy véletlen eloszlású, vagy egy irányba orientált struktúrát lehet létrehozni. Egyfajta nanoszál szövetet is meg lehet valósítani, melyben a szálak meghatározott rendben állnak, szabályosan keresztezhetik egymást, sőt továbbfejlesztve akár térbeli rendszert is ki lehet alakítani [9].



12. ábra A szabályozott elektrosztatikus szálképzés elvi sémája [9]

#### 2.6.4. Elektrosztatikus szálképzés polimer oldattal töltött tálból

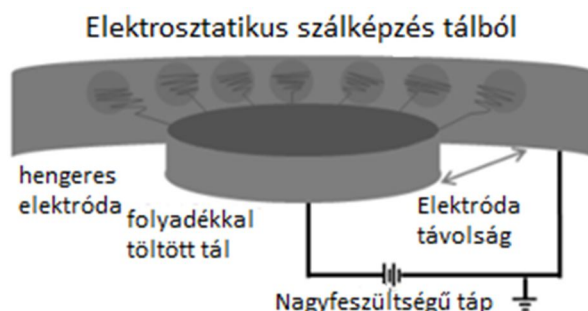
Mivel a szálképzés a hagyományos kapilláris segítségével nagyon lassú folyamat ezért ennek kiküszöbölésére elhagyták a kapillárist (13. ábra). Nagarajan és társai egy tállá egyszerűsítették a szálképző fejet. Ebben a tálban áll az oldott polimer.



13. ábra Szálképzés folyékony polimerrel töltött tálból

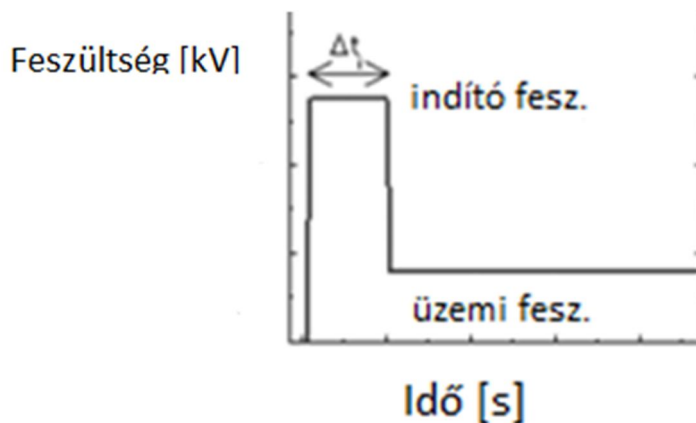
A szálképzéshez használt mechanikus pumpa szerepét felváltja az elektromos mező. Az edény éles pereménél az elektromos tér hatására instabilitások jönnek létre,

majd ezekről a helyekről folyadék sugarak lépnek ki. Hasonlóan a Nanospiderhez, ez esetben is több sugár hagyja el az edényt, melyek spontán módon rendeződnek úgy, hogy a sugarak a lehető legkisebb mértékben hassanak a szomszédjukra. A polimer oldat tulajdonságai és az elektromos tér intenzitása határozza meg a kialakuló sugarak számát és azt, hogy mennyi anyag távozik egy sugár mentén adott időtartam alatt. További változtatás a korábban megszokottakhoz képest, hogy a földelt szálgyűjtő elektróda hengeresen veszi körbe az edényt (14. ábra) [10].



14. ábra A Elektrosztatikus szálképzés folyékony polimerrel töltött tálból technológiájának elvi sémája

A technológiai újítások az elektromos tér időfüggését is érintik. Korábban konstans egyenfeszültség volt használatos. A kutatás szerint érdemes a szálképzés megindítására magasabb feszültséget alkalmazni (15. ábra), amit aztán a csökkenteni lehet egy alacsonyabb értékre úgy, hogy a kialakult sugarak továbbra is fennmaradnak [10].



15. ábra A szálképzés megindításához használt feszültségcsúcs

## **2.7. Irodalomkutatás összefoglalása**

Az irodalmi áttekintés tárgyalja, hogy a nanotechnológia olyan természettudományokkal kapcsolatos technológia, melynek a folyamati a nanométeres tartományban zajlanak. Ilyen mérettartományban már nem alkalmazhatók egyértelműen a klasszikus fizika törvényei, számolnunk kell már kvantumfizikai hatásokkal is, ezáltal új tulajdonságok jelennek meg. A további fejeztek bemutatják, hogy az elektrosztatikus szálképzés során a polimer oldatból, melyet egy kapillárison átvezetünk, miképp képzünk szálakat nagyfeszültségű elektromos tér segítségével, majd pedig hogyan gyűjtjük össze azokat. Következő lépés volt annak a megismerése, hogy az oldat paraméterei, a feldolgozás paraméterei, illetve a külső tényezők, hogy befolyásolják a szálképzés folyamatát. A felhasználási terület nagyon széleskörű, az orvosbiológiai alkalmazásoktól kezdve, az ipari szűrőkön át, a védő ruházatokig sok helyen találkozhatunk nanoszál anyagokkal. Az iparban használt, termelékeny eljárások, a sok párhuzamos kapillárist használó technológia, a Nanospider technológia, a szabályozott elektrosztatikus szálképzés és az tálból történő szálképzési eljárás is bemutatásra kerültek a fejezetben.

## **2.8. Célkitűzés**

A TDK dolgozatom célja, hogy egy olyan új, nanoszál képzésre alkalmas fejet tervezzek és valósítsunk meg, amely a tanszéken eddig alkalmazott fej konstrukciós hibáit kiküszöböli, és megnövelt termelékenység érhető el vele.

## **3. Az új nanoszálképzésre alkalmas fej tervezése és kivitelezése**

Ez a fejezet mutatja be a meglévő nanoszál képző berendezést, annak hibáit, az új fej tervezésének a menetét, a figyelembe vett szempontokat majd pedig a végeredményt.

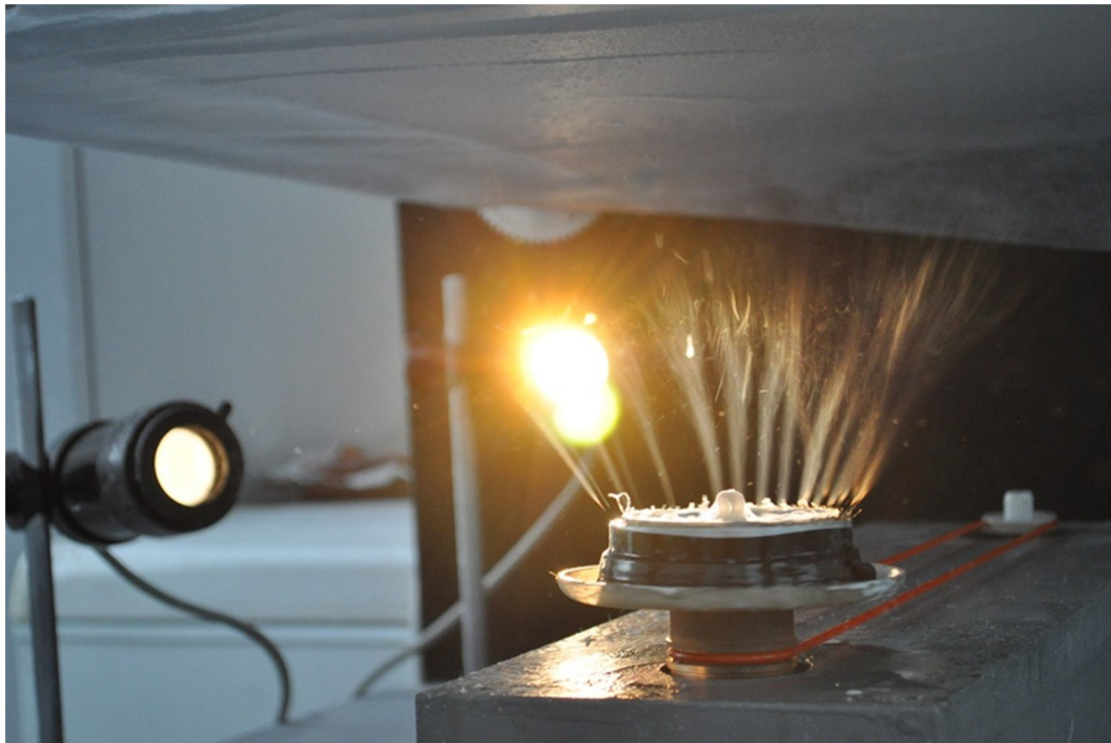
### **3.1 Előzmények**

A tanszéken a nyár folyamán dolgoztam a már kész nanoszál gyártó berendezéssel [11]. A használat során én magam is szembesültem annak hibáival. Próbáltam egyszerű módszerekkel küzdeni ellenük, pl. gyakori tisztítás. Ezek apróbálkozások nem igazán vezettek sikerre. Így Molnár Kolossal, a témavezetőmmel

azt a célt tűztük ki, hogy, hogy tervezni kell egy új, immár fémből készülő fejet, amit le is lehet majd gyártatni.

### **3.2. A Polimertechnika Tanszéken tervezett nanoszál előállítási technológia és annak problémáinak bemutatása**

A BME Polimertechnika Tanszéken elkészült egy új, elektrosztatikus szálképzésre alkalmas berendezés (16. ábra). Felépítése hasonlít a hagyományos, kapillárisal rendelkező készülékekhez. A főbb egységei is megegyeznek. A polimer oldat egy fecskendőbe helyezkedik el, melyet egy precíz adagolóba helyezünk be, így az oldat térfogatárama nagyon jól szabályozható. Az oldat egy szilikon csövön jut el a szálképző fejbe. Itt rejlik az valódi újítás. A szálképző fej egy henger alakú, tölcserhez hasonló kialakítású eszköz, mely forogni képes. Egy alumínium csőtengely két helyen van csapágyazva. A szilikon cső a tengelyen átmenve annak felső részénél végződik. A tölcseres külső rész forog, ennek belső tálcaszerű részébe ömlik ki a polimer oldat, melyet egy szimering választ el a csapágyaktól, melyek ennek ellenére gumi porvédővel vannak ellátva. A fej közepén egy fedő található, melynek átmérője közel megegyezik a tálca rész belső átmérőjével, így kialakul egy vékony rés a kettő között, melyet kitölt a polimer oldat. Mivel a forgó szerkezet ObJet eljárással polimerből készült, így elektromosan nem vezet. Szükség van tehát egy alumínium gyűrűre, mely már elektromosan vezet és érintkezik az oldattal. Ez a rés egyik oldalán helyezkedik el. A nagyfeszültségű tápegység pozitív kivezetése az álló csapágytengelyre csatlakozik, majd a golyókon keresztül jut a külső gyűrűre, ahonnan pedig réz vezetékkel jut az szabadon álló alumínium gyűrűre. A nagyfeszültségű tápegység 0-65 kV között szabályozható, és biztonsági okokból 0,5 mA áramerősségnél leold a biztosító. Az egész fej egy gömbszív segítségével van meghajtva. A szíjtárcsa a fej anyagában van kialakítva. A hajtásról egy szabályozható fordulatszámú egyenáramú motor gondoskodik egy lassító áttételen keresztül. A szálak összegyűjtése egy földelt lemez előtt elhelyezett vékony textílián történik, amit az egyik oldalról letekercselve a másik oldalon forgó dobra tekercselünk a nanoszálakkal együtt. Ezt később le lehet választani róla. A tekercselő dobrot szintén egy egyenáramú motor hajtja egy fogasszív és egy nagymértékű lassító áttételen keresztül. A fordulatszáma szabályozható, a szalag mozgása nagyon lassú. A lemez magassága három anyacsavar segítségével állítható. Szükség volt még egy szobai ventilátorra, ami a levegőt kis sebességgel mozgatja, hogy az oldószer hamar eltávozzon.



**16. ábra A polimerből készült elektrosztatikus szálképző készülék működés közben**

A működése azon alapszik, hogy a kapilláris helyett itt egy folytonos rést használunk, ahonnan a nagy feszültség hatására megindul a szálképzés. Sokkal nagyobb mennyiségű nanoszál állítható elő így, mivel nagyobb a felület, ahol az oldatból szálak indulhatnak, ami ráadásul egyszerre több ponton is megindul. Az egész fej forgása azért szükséges, hogy a kialakult nanaszálak struktúrája minél inkább homogén legyen.

### **3.3. A technológia alkalmazása során felmerült problémák részletezése**

Lehetőségem volt a berendezést többször is használni, így saját magam tudtam tapasztalatokat gyűjteni a működéssel kapcsolatban. Szálkészítés közben észrevettem, hogy a szálképző fej több konstrukciós hibával is rendelkezik. A legnagyobb probléma az volt, hogy a fej nagy része polimerből készült ObJet technológiával. Hiába áll rendelkezésre nagy anyagválaszték a gyorsprototípus készítéshez, a mi esetünkben nem volt megfelelő a választékban, ugyanis oldatos szálképzés során az erős szerves oldószereknek nem tud ellenállni egyik sem. Már az első használat után jól látszódott, hogy a szálképzéshez használt alapanyag károsítja a fejet, oldja azt (17. ábra)(18. ábra).



**17. ábra Polimer fej tönkremenetelének kezdeti fázisa**



**18. ábra A polimer kémiailag nem áll ellen az oldószernek**

Másik jelentős probléma az volt, hogy a fej csapágytengelye szintén egy ObJet gyorsprototípus gyártással készült alkatrészhez volt rögzítve. Itt már jelentős vegyi hatással nem kell számolni, viszont a hosszú csapágytengely miatt jelentős nyomaték hat a szíjhajtásból eredően ennél az alkatrésznél. Ennek hatására eldeformálódott, kilazult, az erővel záró kapcsolat megszűnt. Az itt fellépő kis deformáció (19. ábra) a tengely végén a fejen már jelentős hatású volt, ferdén állt az egész szerkezet.



**19. ábra A deformálódott alaplap**

A harmadik gond az volt, hogy a szíjjal volt hajtva a fej, ráadásul ez a szíj nem a burkolat alatt, hanem szabadon volt. A probléma abból adódott, hogy egy erővel záró kapcsolatról beszélünk, így a szíj a súrlódási erő révén hajtja a fejet. Tehát feszíteni kell, ami a sok gyorsprototípus polimer alkatrész miatt nehézkes volt, másrészt a burkolat hiánya miatt nagyon hamar szennyeződött a szíj a nanoszálakkal és oldatcseppekkel, melynek hatására a súrlódás egyre csak csökkent, így a forgás akadozott, olykor meg is szűnt.

A negyedik probléma abból adódott, hogy a hiába voltak a csapágyak tömítettek és hiába volt szimering is, mégis jutott oldószer hozzájuk, aminek hatására korrodáltak, így szintén nehézkesebb volt a forgás. Ezt csak fokozta az a tény, hogy a

nagyfeszültségű áram a mélyhornyú golyós csapágy golyóin keresztül volt vezetve, ami szintén hibákat, esetleges égéseket okozott a futópályán.

Voltak még egyéb problémák is, például, hogy a nagyfeszültség ívet húzott az oldat tömlő és az oldat adagoló között.

### **3.4. A tervezés során figyelembe vett szempontok**

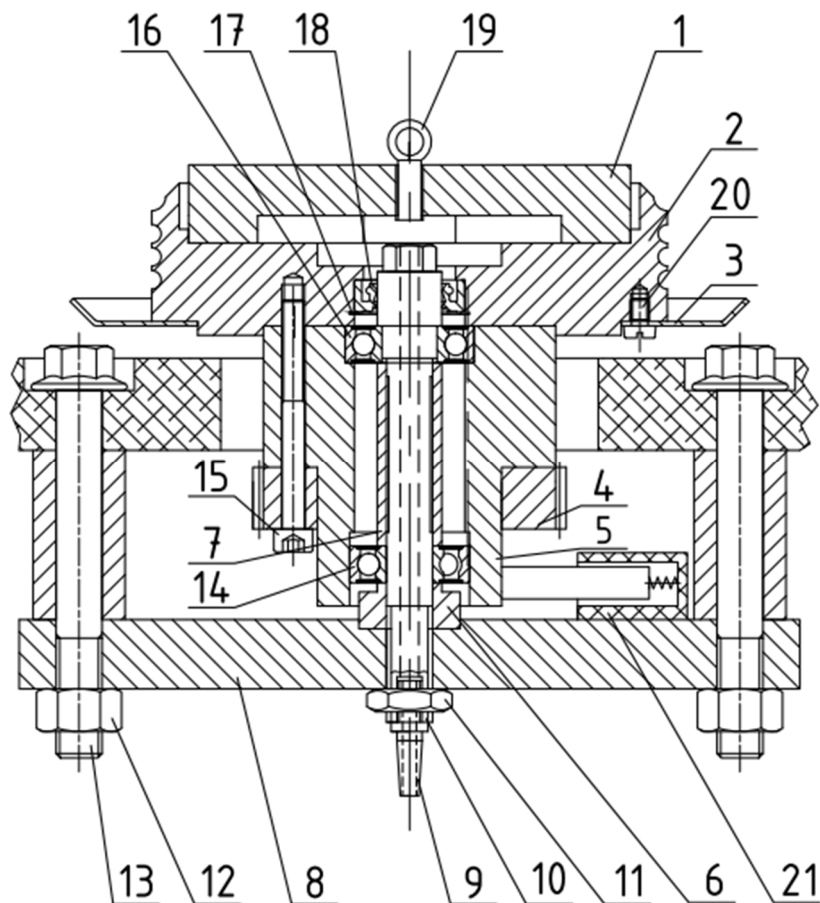
A tervezés folyamán igyekeztem kijavítani a fentebb sorolt hibákat. A tervezési szempontok fontossági sorrendben a következők voltak:

- vegyszerálló anyagból készült fej
- termelékenység növelésének érdekében nagyobb fej kialakítása
- alakzáró hajtás
- hajtás burkolat alá helyezése
- egyszerű szerelést lehetővé tevő kialakítás
- egyszerű tisztíthatóság
- egyszerű gyárthatóság
- a csapágyakon keresztül ne folyjon áram
- univerzális csőcsatlakozó elhelyezés
- lehető legtöbb olcsó és szabványos alkatrész felhasználása
- robosztus szerkezet
- módosítható fej

Ezek alapján az általam tervezett fej összeállítási rajza a 20. ábrán látható. Gyökeresen nem különbözik az eredeti konstrukciótól.

A legfőbb különbség, hogy ez Objet gyorsprototípus gyártás helyett jórészt alumíniumból lett forgácsolva. A beépített szimering Viton anyagból készül, ami az egyik leginkább vegyszerálló tömítőanyag.

A fej szálképző rése már 100 mm átmérőjű. Ezzel a módosítással a rés hosszabb lett, így nagyobb felület áll rendelkezésre a szálképzéshez, több helyen indulhat több sugár. Ezzel a termelékenység növelése volt a cél.



20. ábra Az általam tervezett szálképző fej összeállítási rajza

A 20. ábrán látható számozás értelmezése:

1. Fedő
2. Tálca rész
3. Lemez felfogó tálca
4. Fogasszíz tárcsa
5. Csapágy tartó
6. Csapágy távtartó kicsi
7. Csapágy távtartó nagy

8. Alaplap
9. Csőcsatlakozó
10. Tengely
11. Hatlapú anya M10
12. Hatlapú anya M10 (4db)
13. Hatlapú csavar M10x80 (4db)
14. Mélyhornyú golyóscsapágy 6000 2RS
15. Belső kulcsnyílású csavar M5x50 (3db)
16. Mélyhornyú golyóscsapágy 6001 2RS
17. Bepattanó huzalgyűrű
18. Szimmering 14x24x7
19. Emelőszem M6
20. Hornyolt fejű csavar M4x6 (3db)
21. Szénkefe

A hajtást fogasszík biztosítja. Ennek hatására nem szükséges nagy feszítő erő, mivel a hajtást már nem a súrlódó erő, hanem a fogak alakzáró kapcsolata biztosítja. Az egész hajtás a burkolat alá került, így a szennyeződésektől óvjuk a szíjat. Ez növelheti az élettartamot, ugyanis a különböző lecseppenő oldatok károsíthatják a gumiból és egyéb szintetikus szálakból felépülő szíjat.

A készüléket minden egyes használat után szét kell szedni, hogy ki lehessen tisztítani. Ennek könnyítésének érdekében a csapágytengelyen kialakítottam egy hatlapú részt, amit egy 10 mm-es dugókulccsal ki-be lehet csavarni, ha az alul levő M10-es biztosító anya nincs felszerelve. Ezt csak biztonsági okból, opcióként terveztem oda, arra az esetre, ha csökkenne a csapágytengely stabilitása.

Azoknál a belső szerkezeti elemeknél, ahol üzem közben polimer oldat van, ott kerültem az alámetszett, nehezen hozzáférhető részek kialakítását vagy a meneteket. Ezzel könnyítve a tisztítást. A fej külső oldanál lecsöpögő polimer oldatot egy tányér alakú lemez fogja fel.

A gyártás egyszerűsítése miatt a szabványos elemek mellett igyekeztem forgástest alkatrészeket, esetleg egyszerű ujjmaróval elkészíthető geometriákat

felhasználni. A finoman megmunkált felületek nagyságát igyekeztem minimálisra szorítani.

A nagyfeszültségű tápegység már nem az álló csapágytengelyhez csatlakozik, hanem a forgó fej oldalához, vagy a tálca aljára egy szénkefe segítségével, mely az alaplaphoz vagy a burkolatra helyezhető el. Így mentesül a csapágy a nagyfeszültség átvitel alól, amit a gyártója amúgy sem engedélyez.

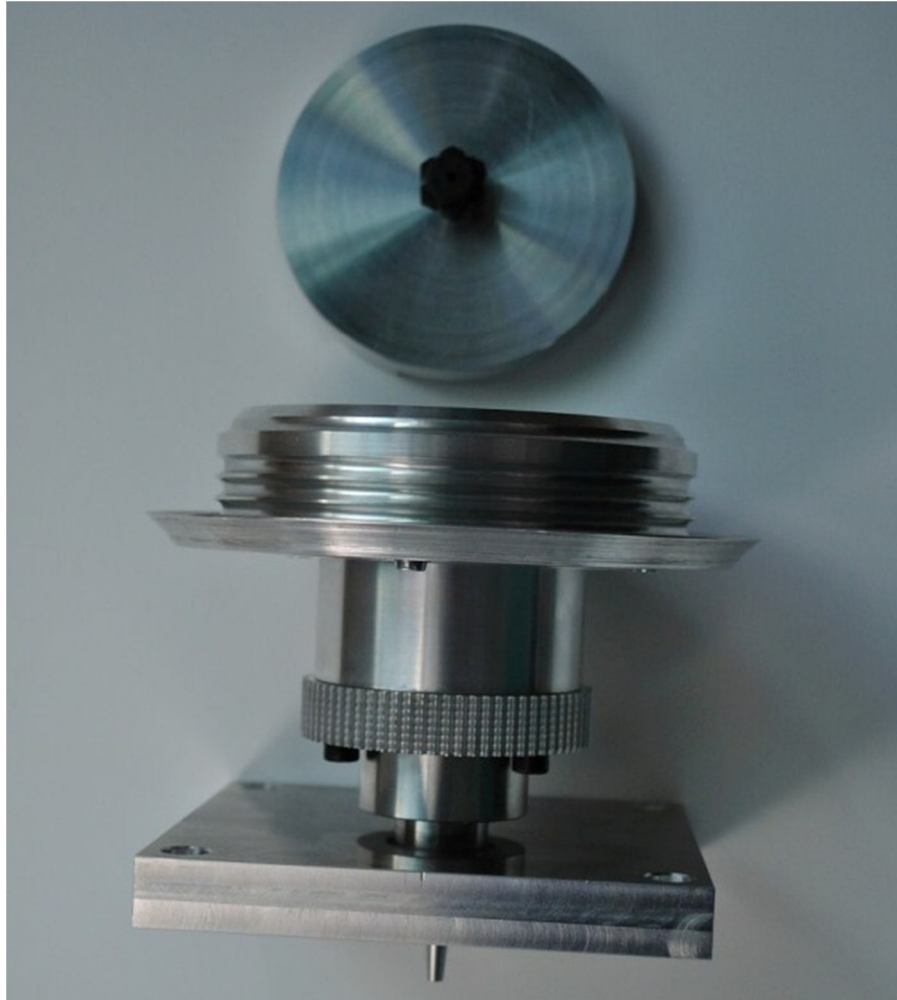
A csapágytengely alsó részéhez egy menetes csőcsatlakozó kapcsolódik, mely cserélhető, így különböző belső átmérőjű szilikon csövek is csatlakoztathatóak a berendezéshez.

A kötőelemek, csapágyak, tömítések, távtartók mind szabványos alkatrészek, könnyen beszerezhetők.

A szerkezet robosztus kialakítású, az alaplap 15 mm vastag alumínium lemezből készül, a csapágytengely pedig acélból, melyek hosszú menettel kapcsolódnak egymáshoz, alul pedig még egy M10-es anya is biztosítja a szerkezetet kicsavarodás és deformáció ellen.

A tálcára peremesen illeszkedik a textilbakelit fedő, melyet tetszés szerint lehet módosítani, lehet a rés méretét csökkenteni vagy növelni, készülhet más anyagból, esetleg teljesen más kialakítású fedél is használható.

A fej elkészítve, burkolatból kiserelt állapotban a 21. ábrán látható.



**21. ábra Az elkészült fém szálképző fej**

#### **4. A szálképző fejek vizsgálata üzem közben**

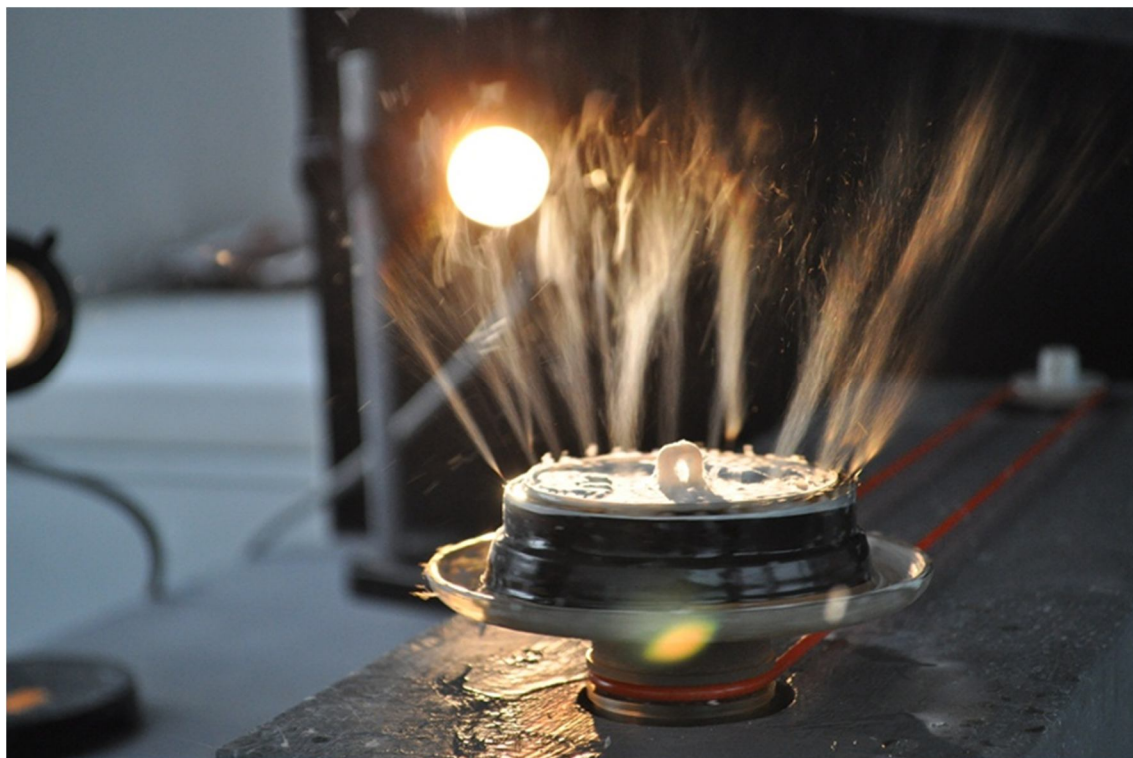
Ez a fejezet a fejek üzem közbeni viselkedését mutatja be.

##### **4.1. A polimer szálképző fej üzem közben**

A polimerből készült szálképző fejet körülbelül 20 óra használat után teljes egészében le kellett cserélni, mert működés közben a szálképzéshez használt polimer oldat teljesen tönkretette, mivel a fej anyagát is oldotta. A tönkremenetel nem hirtelen, hanem fokozatos volt, miközben a működés egyre bizonytalanabbá vált, egyre gyakrabban kellett szétszedni és megtisztítani. Az oldott polimer átszivárgott a szimeringeken úgy, hogy kioldotta a fészket körülötte, így azt megkerülve az oldat

károsította a csapágyakat, korróziót okozva, illetve a kicsapódott polimer akadályozta a mozgást. Mikor ez bekövetkezett a szimering gyakorlatilag megállt a tengelyen, és nem forgott már tovább. Egy idő után a tömítés anyaga is károsodott, elvesztette rugalmasságát, így használhatatlanná vált. Ekkor az üzeme kezdett egyre inkább bizonytalanná válni, akadozni, olykor teljesen be is szorult, és így megállt a forgása. A jelenséget csak fokozta a szennyeződő gömbszíj okozta csúszás.

A nagyfeszültségű vezetékeket minél távolabb kellett vezetni egymástól és az oldatot szállító szilikon tömlőtől. Ugyanis nagyon könnyen kialakultak elektromos kisülések ezek között, aminek hatására károsodtak, és veszélyeztették a többi kiszolgáló elektromos berendezést is.



**22. ábra Szálképzés a polimer fej segítségével, a kilépő sugarak jól kivehetők**

A termelés üteme elég lassú volt. Jellemzően 30 ml oldatot pumpáltunk be a rendszerbe óránként. Ekkor tudott stabilan üzemelni a gép (22. ábra). Ez ~6-szoros sebességnövekedést jelent az egy kapillárisos szálképzéshez képest. Viszont ennek a mennyiségnek a jelentős része maga az oldószer, ami a szálképzés közben elpárolog. Minden esetben poli-akrilnitrilt (PAN) oldottunk dimetilformamidban (DMF). Az oldat koncentrációja 12 tömeg% volt. Egyszerű számítások alapján belátható (8), hogy az elkészült szálak tömege így óránként alig haladta meg a 3,5 g-ot.

$$\rho(\text{DMF}) = 0,948 \text{ g/ml}$$

$$\rho(\text{PAN}) = 1,184 \text{ g/ml}$$

$$c(\text{PAN})\rho(\text{PAN}) + c(\text{DMF})\rho(\text{DMF}) = \rho(\text{oldat})$$

$$0,12 * 1,184 \frac{\text{g}}{\text{ml}} + 0,88 * 0,948 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 0,976 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \text{ az oldat átlagos sűrűsége}$$

$$\rho(\text{oldat})V(\text{oldat}) = m(\text{oldat})$$

$$0,976 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 30\text{ml} = 29,28\text{g}$$

$$m(\text{oldat})c(\text{PAN}) = m(\text{PAN})$$

$$29,28 * 0,12 = 3,51\text{g} \quad (8)$$

tehát a PAN tömege.

Ennek az előállításához a tápegységgel elérhető maximális feszültséget használtuk, ami 65kV-volt.

#### 4.2. A fémből készült szálképző fej üzem közben

Az előző készülékhez képest viszonylag kevés tapasztalat alapján elmondható, hogy ez esetben az előbb felsorolt hibák nagy része már nincs jelen. A fej forgása a teljes fordulatszám tartományban egyenletes a fogasszík hajtásnak köszönhetően. A szík feszessége állítható, ami megkönnyíti az esetleges szerelést a tisztítás során, mely egyenletes üzem közben nem szükséges, már csak a használat után kell kitisztítani. A szerelés egyszerűsödött és közben az oldat sokkal kisebb mértékben csöpög és folyik szét. A Viton® anyagú szimering megfelelően ellenáll a vegyi hatásnak.

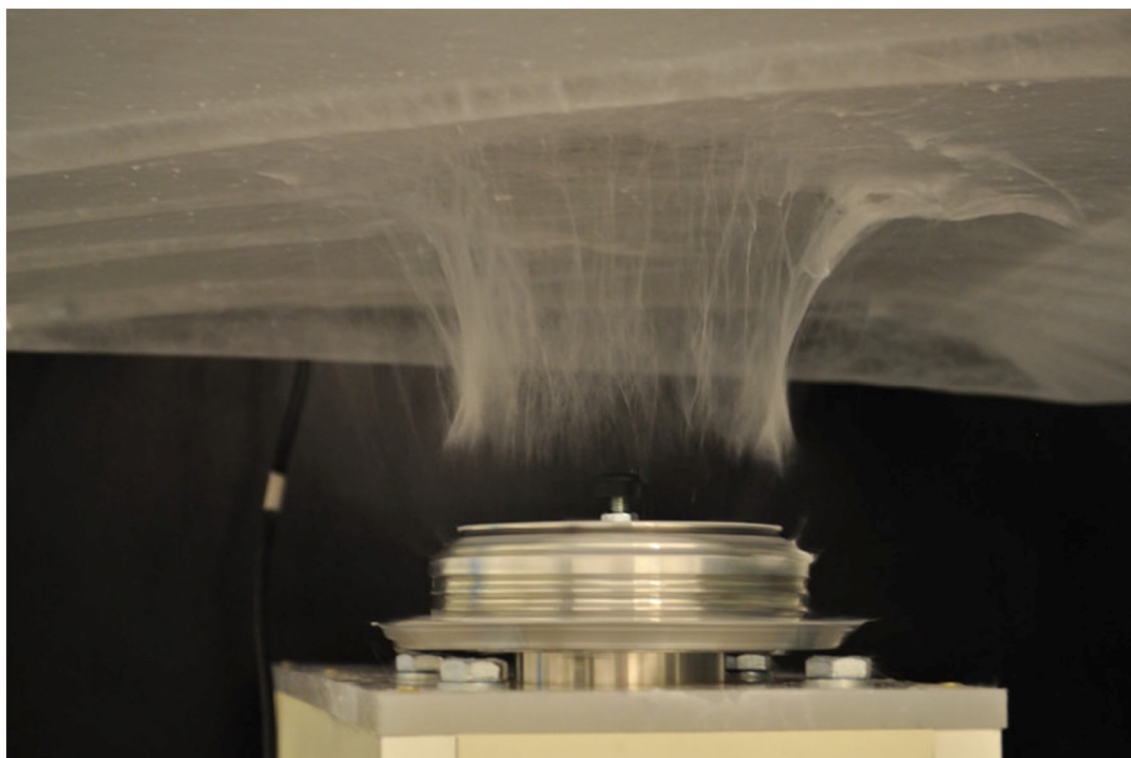
A termelékenység szemmel láthatóan növekedett a nagyobb átmérőjű fejnek köszönhetően. Stabilan tudott üzemelni 2x-es térfogatáram mellett (60 ml/h), tehát a termelékenység duplázódott.

Feltűnt, hogy a fejről sokkal könnyebben kilépnek a folyadékasugarak, ha nagyobb a kerületi sebessége a fejnek. Valószínűleg adott feszültség mellett a centripetális gyorsulás hatásának köszönhető ez, így egyszerűbben megindítható a szálképzés. Ha stabilizálódott a működés, akkor csökkenthető a forgás sebessége. A túl

nagy forgási sebesség nem jó, mert túl nagy cseppek szakadnak ki a folyadék felszínből, amik nem tudnak szálakká alakulni, viszont az elektromos tér hatására a gyűjtő lemezre cseppennek, ezzel nagy góccokat hoznak létre. Ezek az inhomogenitások rontják a nanoszálak szerkezet funkcióját, tehát kerülendőek.

A több fém alkatrész miatt több helyen keletkezett elektromos kisülés, a csöveket és kábeleket sokkal körültekintőbben kell elrendezni, és például a forgató motort külön is kell földelni, annak ellenére, hogy teljesen el volt választva, és nagy távolságra volt a fejtől.

A látható, hogy erős szakálasodás volt tapasztalható (23. ábra). Ennek az oka, hogy a munkatérben az oldószer koncentrációja megnövekedett

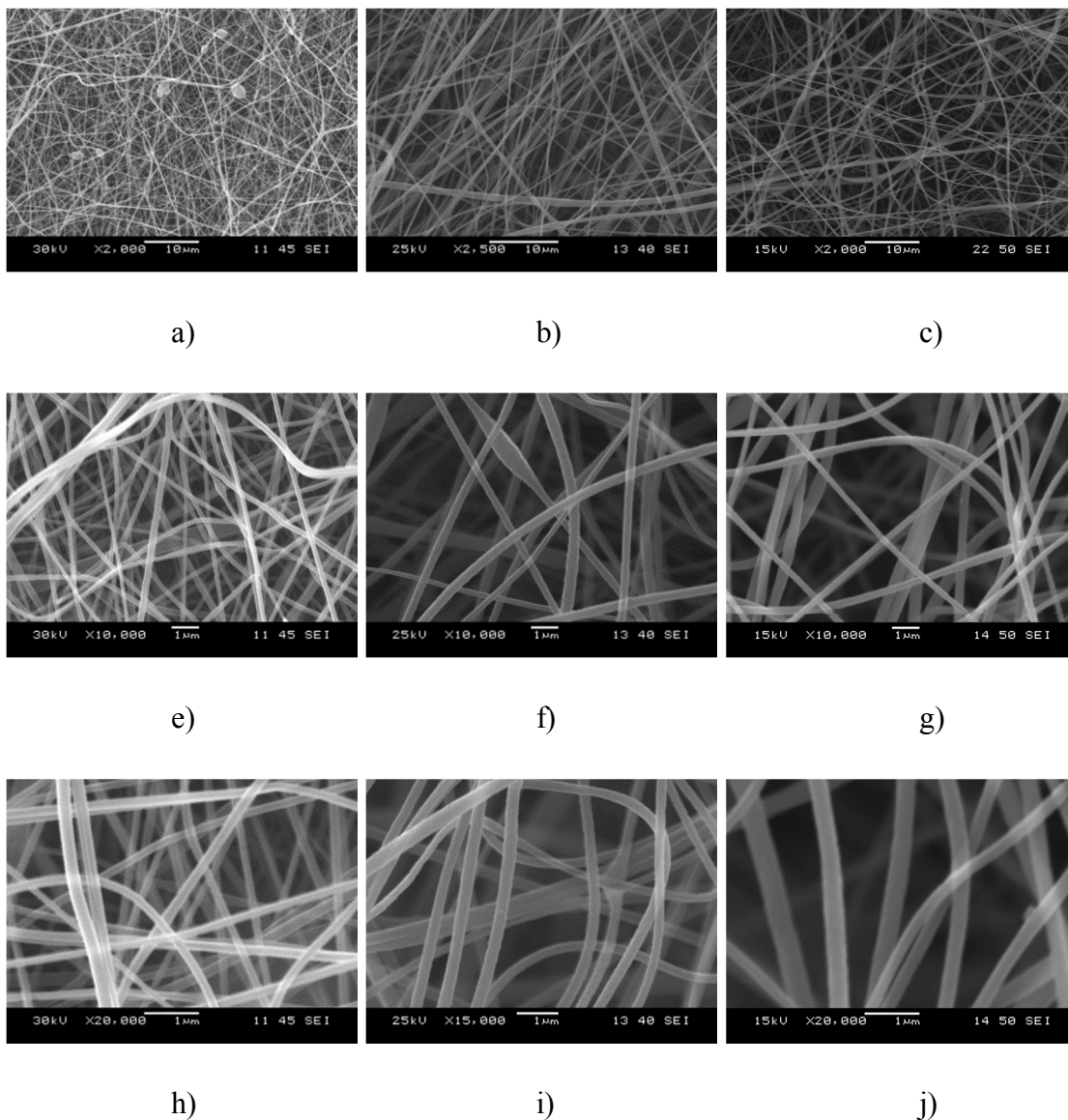


23. ábra A fém szálképző fej tesztüzeme

## 5. A különböző gyártási eljárással készült nanoszálak vizsgálata

A különböző technológiákkal készült szálakat pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével, a morfológiai jellemzők alapján hasonlítottam össze. Megvizsgáltam az iparilag már használt Nanospider, a polimerből készült szálképző fej, illetve az általam tervezett fém fej által készített szálakat. Az első két technológiához

tartozó felvételeket a témavezetőm Molnár Kolos bocsájtotta rendelkezésemre, a fém fej által készült szálak morfológiáját magam vizsgáltam.



**24. ábra SEM képek a különböző technológiákkal készült szálakról. a) e) h) Nanospiderrel készült 2000x, 10000x, 20000x nagyítással, b) f) i) a polimer szálképző fejjel készült 2500x, 10000x, 15000x-es nagyítással, c) g) j) pedig a fém fejjel előállított szálakat ábrázolja 2000x , 10000x, 20000x-es nagyítással**

Az elektronmikroszkópi képekből kitűnik, hogy az általam áttervezett szálképző fej kielégítően működik, a szál főbb morfológiai tulajdonságaiban nincsenek jelentős eltérések. Szemrevételezés alapján az átlagos szálátmérő hasonló és nem mutat nagyobb szórást sem, mint a korábbi technológiákkal készült nanoszálak struktúrákban levő szálak.

## 6. Összefoglalás

A TDK munkám során nanoszálképzésre alkalmas berendezésekkel és technológiákkal foglalkoztam. A saját tapasztalataim és a szakirodalomban leírtak alapján áterveztem egy, már a Polimertechnika Tanszéken megtalálható szálképző fejet. Ez a szálképző fej egy a hagyományos tűs változathoz képest összetett, forgó és nagyfeszültséggel átjárt eszköz volt. A konstrukció több hibával is küzdött. Ezeket a használat során felmértem, és célul tűztem ki, hogy átervezem oly módon, hogy ezeket kiküszöböljem, és a termelékenységet is növeljem. A célt sikerült megvalósítanom, elkészültek a tervek, majd sikerült megvalósítani az eszközt. Ezután sikerült beüzemelni, tapasztalatokat gyűjteni a működése során. Meg tudtam győződni arról, hogy megfelelően működik, a termelékenység duplájára növekedett, a gyártott szálakat pásztázó elektronmikroszkóppal megvizsgálva kiderült, hogy a gyártott szálak tulajdonságai nem maradnak el a korábban más technológiával készütekhez képest. Ezután további fejlesztési utakat kerestem.

## 7. További fejlesztési lehetőségek a területen

Az új szálképző fej működése még mindig nem tökéletes, további fejlesztési potenciál rejlik még a technológiában. A polimer anyagtudományon kívül más szakterület ismerete szükséges ezekhez. A továbbiakban kifejtem, mely területeken szükséges még dolgozni.

- Egy új technológiai paraméter lépett be a rendszerbe, ami a fej forgási sebessége. Ennek jelentős hatása van a szálképzésre. Ennek a paraméternek a vizsgálata, illetve ismerete fontos az optimális működés érdekében.
- Továbbra is probléma, hogy a nagyfeszültséggel áljárt alkatrészek között elektromos ívek alakulnak ki. Nagyban stabilizálná a technológiát, ha ki lenne dolgozva, hogy hogyan lehet megakadályozni ezek kialakulását. Kérdéses, hogy a különböző alkatrészeket milyen potenciálra kell kapcsolni, milyen leválasztás vagy szigetelést érdemes használni a különböző problémás pontokban, és hogy miképp lehetne optimalizálni a berendezés elektromos rendszerét úgy, hogy védve legyenek a kisfeszültségű berendezések például az oldat adagoló. Az érintésvédelmi szempontokat is figyelembe kellene venni, ugyanis gyakran érheti kisebb áramütés azt, aki használja a gépet.

- Hosszabb üzem után, ahogy a (23. ábra) is látható, az oldószer dúsulása miatt szakállképződéssel kell számolnunk. Ennek kiküszöbölésére jelenleg egy szobai ventilátort használunk. Áramlástanai számításokkal optimalizálva a levegő áramlását a szálképző térben a szakállképződés elkerülhető, mert akkor az oldószer megfelelőképpen távozhatna.
- A berendezés nem képes jelenleg folyamatos üzemben dolgozni, mert egy orvosi fecskendőből kapja az oldat utánpótlását. Az adagolás precízen szabályozható, de ha olyan szivattyút használnánk, aminek a tartálya üzem közben feltölthető, akkor folyamatos üzem lenne kialakítható.
- Az elhúzási sebesség automatikus szabályozásának érdekében be lehetne építeni egy optikai érzékelőt, ami a szövet transzparenciájának függvényében változtatja az elhúzó motor fordulatszámát, így egy visszacsatolással egyfajta minőségbiztosítás volna megvalósítható.

## **8. Köszönetnyilvánítás**

A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA 100949) támogatta.

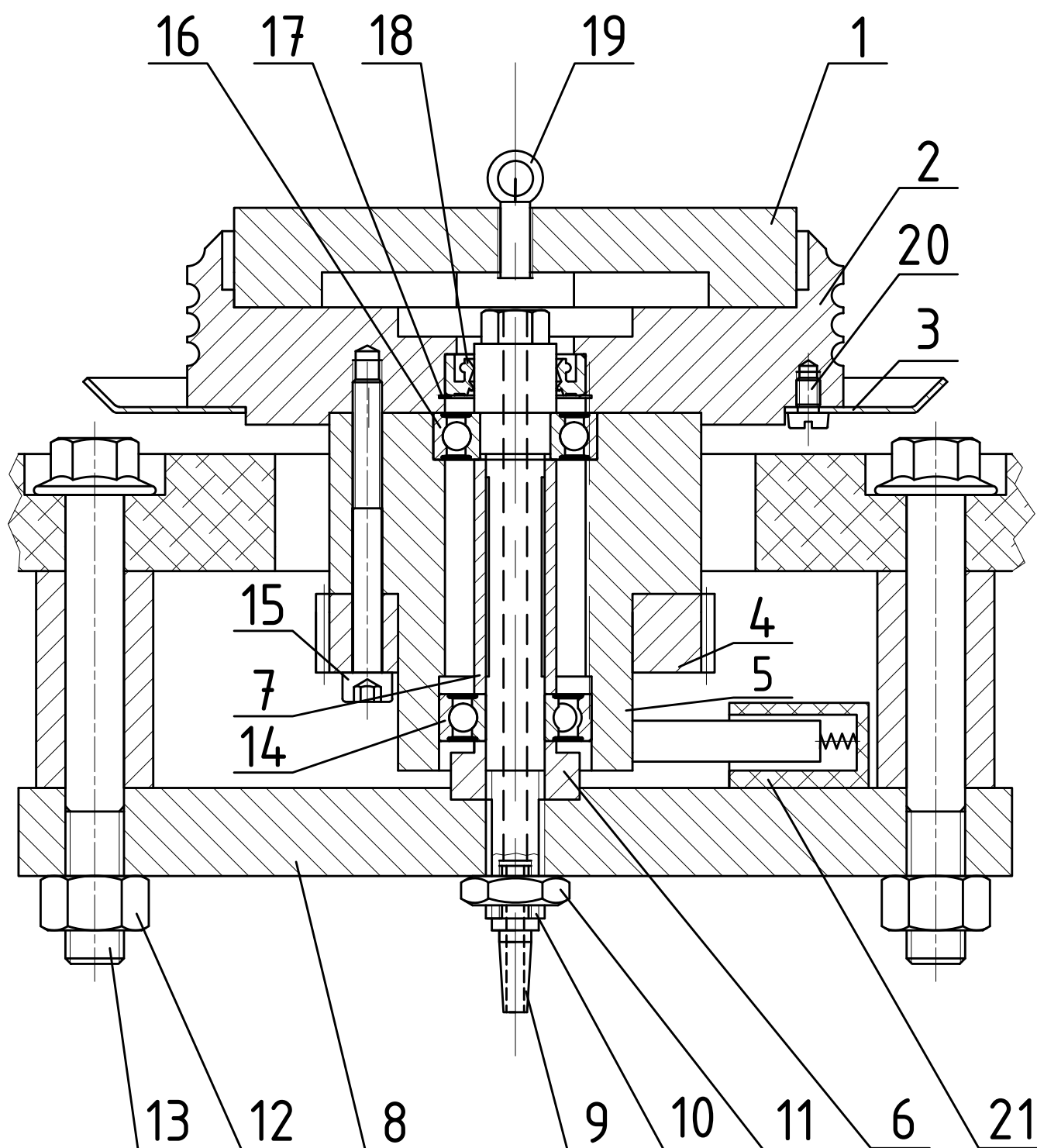
Köszönet illeti Molnár Kolost, illetve Dr. Mészáros Lászlót, amiért segítséget nyújtottak a TDK munkám során.

### **Irodalomjegyzék:**

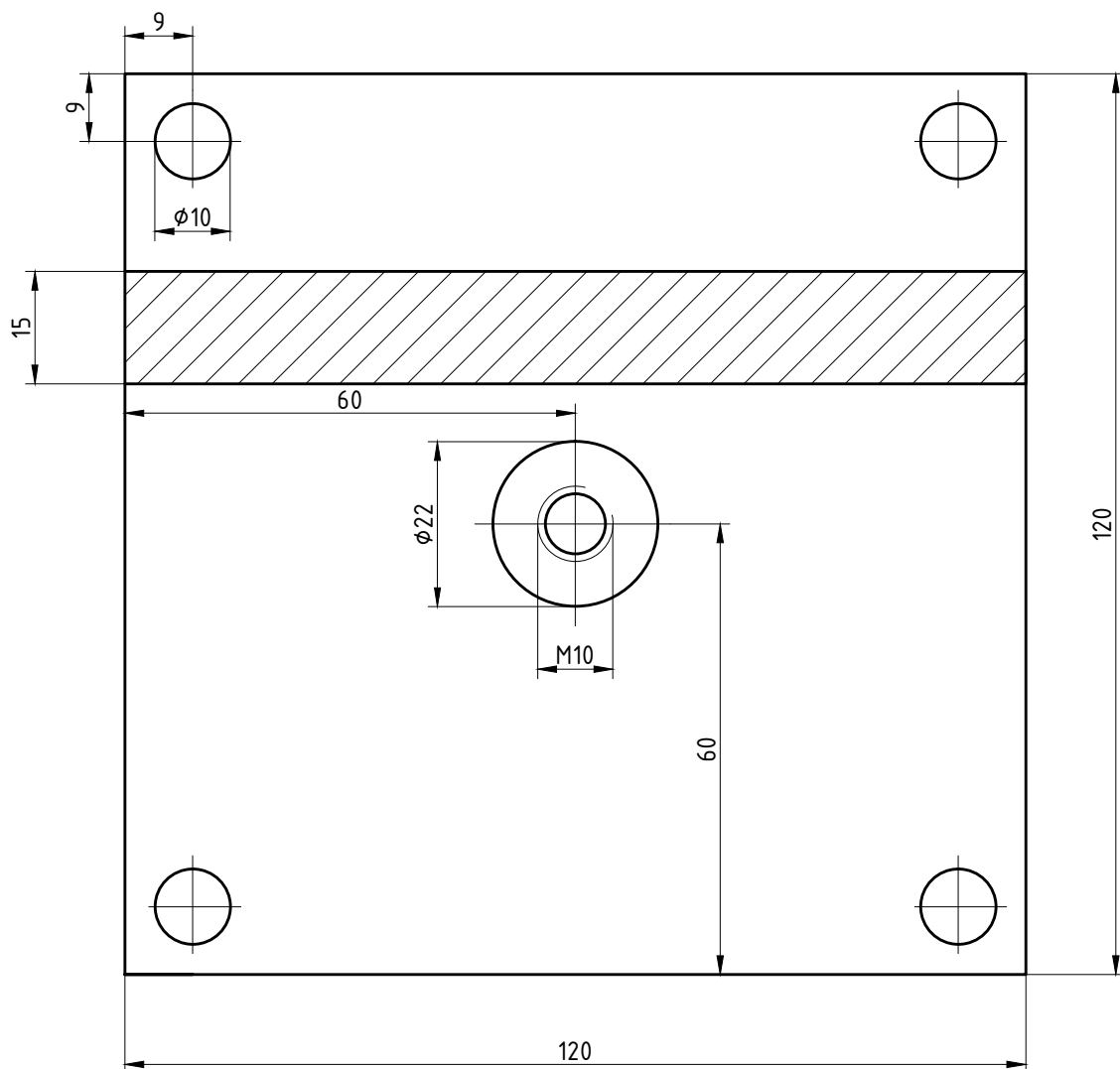
- [1] Ji-Huan He, Yong Liu, Lu-Feng Mo, Yu-Qin Wan and Lan Xu, *Electrospun Nanofibres and Their Applications*, iSmithers, Shawbury, (2008)
- [2] A. Formhals, *Process and apparatus for preparing atrificial threads* US Patent 1,975,504, (1934)
- [3] G. Taylor, *Proceedings of the Royal Society of London Series A* , 280-383. (1964)
- [4] Zheng-Ming Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*, *Composites Science and Technology* 63 2223–2253 (2003)
- [5] Nandana Bhardwaj, Subhas C. Kundu, *Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique*, *Biotechnology Advances* 28 325–347 (2010)
- [6] Hou HQ, Jun Z, Reuning A, Schaper A, Wendorff JH, Greiner A. *Poly(p-xylylene) nanotubes by coating and removal of ultrathin polymer template fibers*, *Macromolecules* 35(7):2429–31, (2002)
- [7] Lee et al. *Apparatus of polymer web by electrospinning process* US Patent 6,616,435, (2003).
- [8] <http://www.elmarco.com/electrospinning/electrospinning-technology/> 2012. október 18.
- [9] Barinov et al. *Controlled Electrospinning of Fibers*, US Patent 0162468 (2009)
- [10] Nagarajan M. Thoppey, Russell E. Gorga, Jason R. Bochinski, and Laura I. Clarke, *Effect of Solution Parameters on Spontaneous Jet Formation and Throughput in Edge Electrospinning from a Fluid-Filled Bowl*, *Macromolecules* 45 (16), 6527–6537, 2012
- [11] Molnár Kolos, Nagy Zsombor Kristóf, Dr. Marosi György, Dr. Mészáros László: *Elektrosztatikus szálképző fej és módosított eljárás nanoszálak termelékeny előállítására*. Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala. Ügyszám: P1200677/1 (2012)

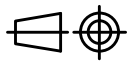
## Melléklet

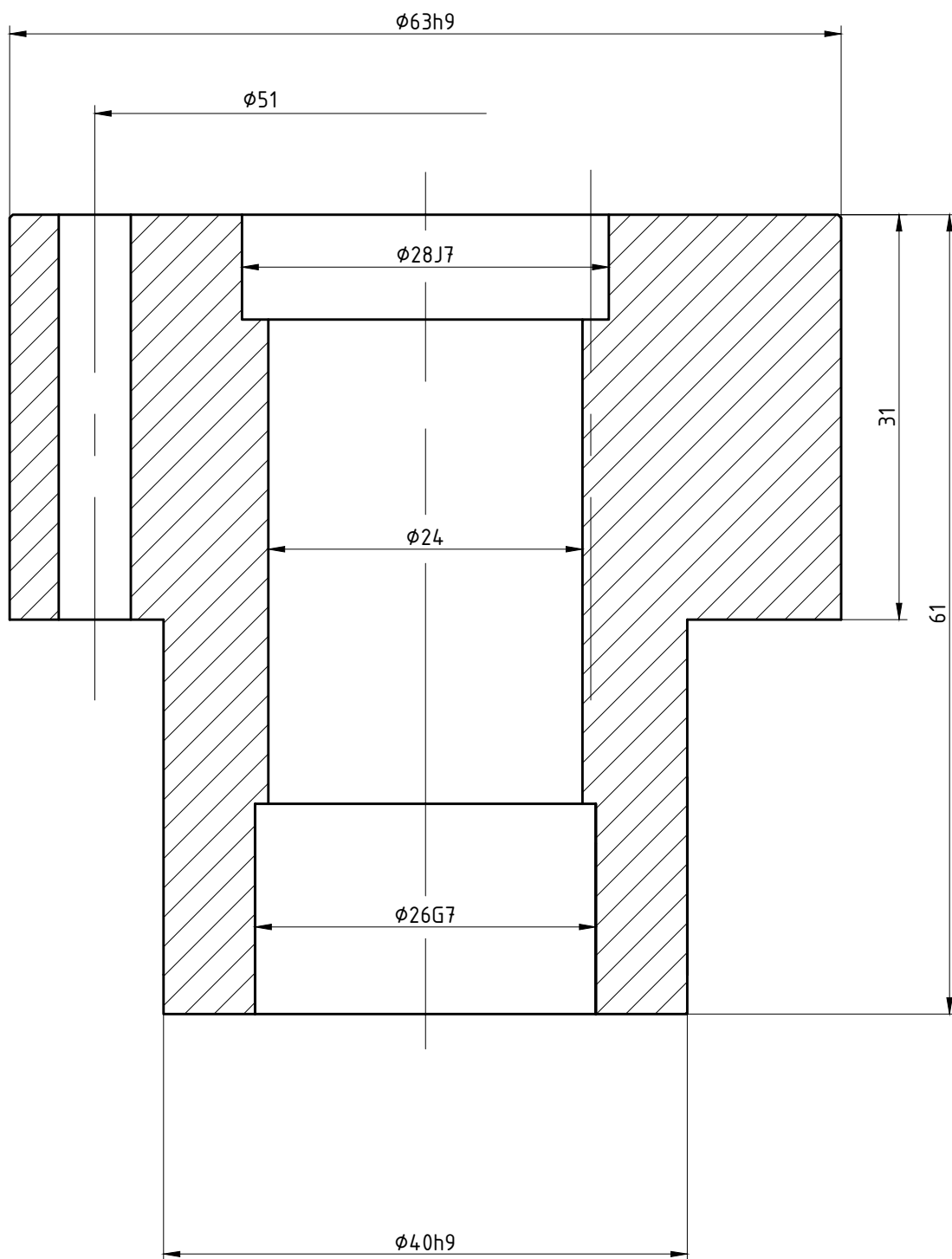
|               |    |                                 |         |                         |                   |             |                   |
|---------------|----|---------------------------------|---------|-------------------------|-------------------|-------------|-------------------|
|               |    |                                 |         |                         |                   |             |                   |
| 21            | 1  | Szénkefe                        |         |                         |                   |             |                   |
| 20            | 3  | Hornyolt fejű csavar M4x6       |         |                         |                   |             |                   |
| 19            | 1  | Emelőszem M6                    |         |                         |                   |             |                   |
| 18            | 1  | Szimmering                      | 14x24x7 |                         |                   |             |                   |
| 17            | 1  | Bepattanó huzalgyűrű            | Ø24     | DIN 7993                |                   |             |                   |
| 16            | 1  | Mélyhornyú golyóscsapágy        |         | 6001 2RS                |                   |             |                   |
| 15            | 3  | M5x50 belső kulcsnyílású csavar |         |                         |                   |             |                   |
| 14            | 1  | Mélyhornyú golyóscsapágy        |         | 6000 2RS                |                   |             |                   |
| 13            | 4  | M10x80-as hatlapú csavar        |         |                         |                   |             |                   |
| 12            | 4  | Hatlapú anya M10                |         |                         |                   |             |                   |
| 11            | 1  | Hatlapú anya M10                |         |                         |                   |             |                   |
| 10            | 1  | Tengely                         |         |                         | acél              |             |                   |
| 9             | 1  | Csőcsatlakozó                   |         |                         | acél              |             |                   |
| 8             | 1  | Alaplap                         |         |                         | Al                |             |                   |
| 7             | 1  | Csapágy tévtartó nagy           |         |                         | Al                |             |                   |
| 6             | 1  | Csapágy távtartó kicsi          |         |                         | Al                |             |                   |
| 5             | 1  | Csapágy tartó                   |         |                         | Al                |             |                   |
| 4             | 1  | Fogasszíz tárcsa                |         |                         |                   |             |                   |
| 3             | 1  | Lemez felfogó tálca             |         |                         | Al                |             | Lemezről hajlítva |
| 2             | 1  | Tálca rész                      |         |                         | Al                |             |                   |
| 1             | 1  | Fedő                            |         |                         | Al                |             |                   |
| Tétel<br>Szám | Db | Megnevezés                      | Méret   | Rajzszám<br>szabványsz. | Anyag-<br>minőség | Tömeg<br>Kg | Megjegyz.         |



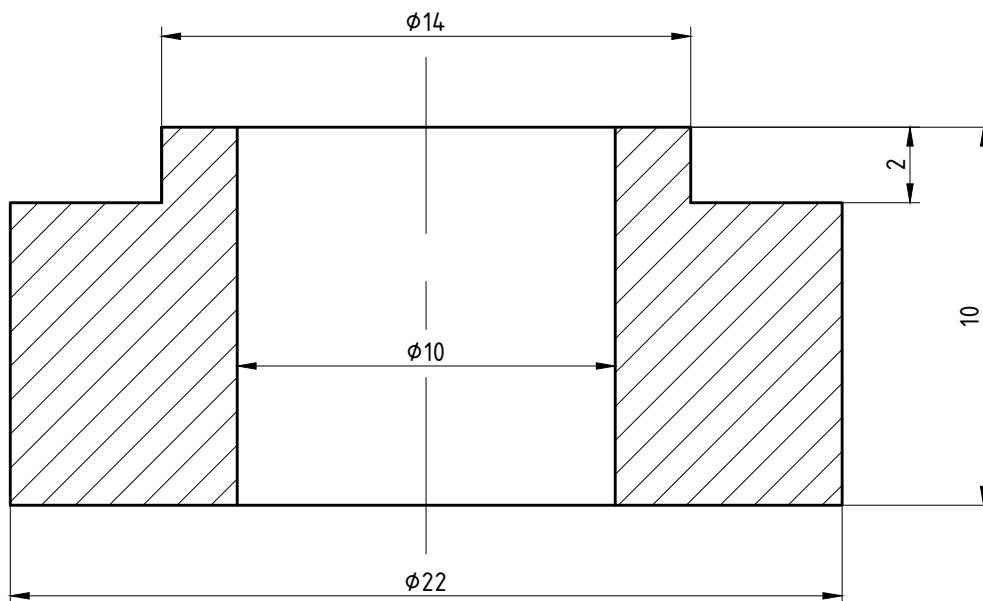
|                          |                              |                    |                                   |
|--------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br>Kovács Tamás | Gyártmány:                   | Méretarány:<br>1:1 | BME<br>POLIMERTÉCHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br>2012.09.05.    | Megnevezés:<br>Szálképző fej | Vet. mód:          | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:             | Anyag:                       | Tömeg:             | Fájlnev:                          |



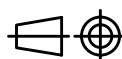
|                                 |                               |                                                                                                   |                                   |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                    | Méretarány:<br><b>1:1</b>                                                                         | BME<br>POLIMERTECHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Alaplap</b> |                                                                                                   |                                   |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                        | Vet. mód:<br> | Rajzszám:                         |
|                                 | Tömeg:                        |                                                                                                   | Fájlnev:                          |

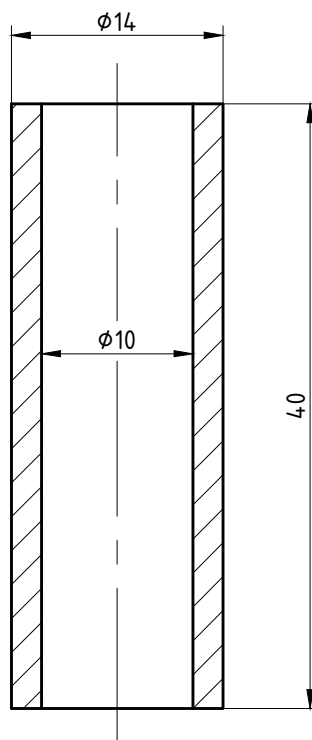


|                                 |                                     |                           |                                   |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                          | Méretarány:<br><b>2:1</b> | BME<br>POLIMERTECHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Csapágy tartó</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                              | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |

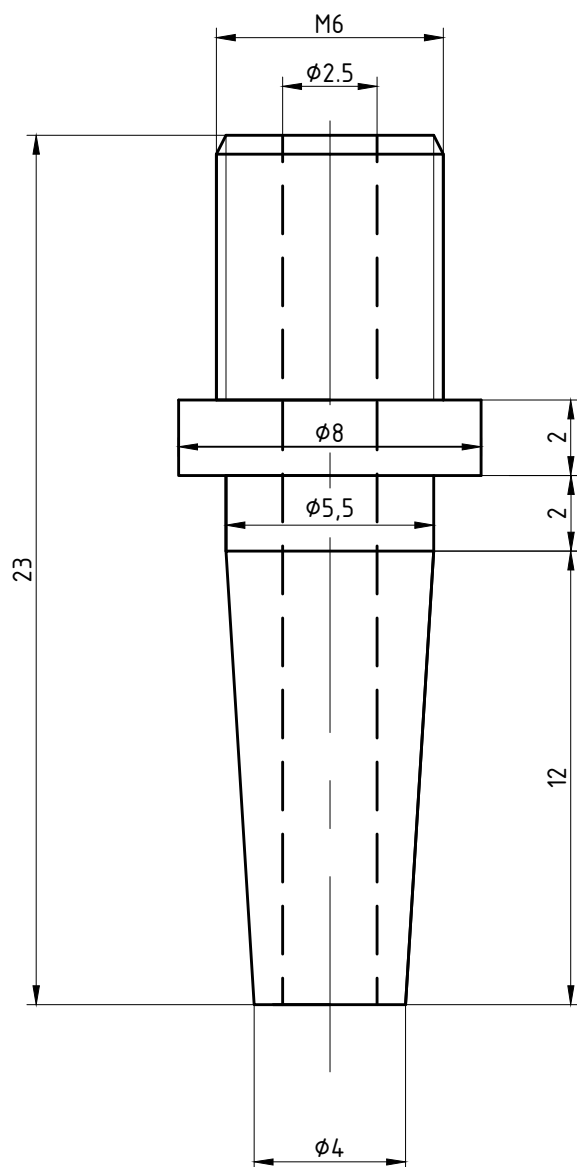


|                                 |                                              |                           |                                   |
|---------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                                   | Méretarány:<br><b>5:1</b> | BME<br>POLIMERTECHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Csapágy távtartó kicsi</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                                       | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |

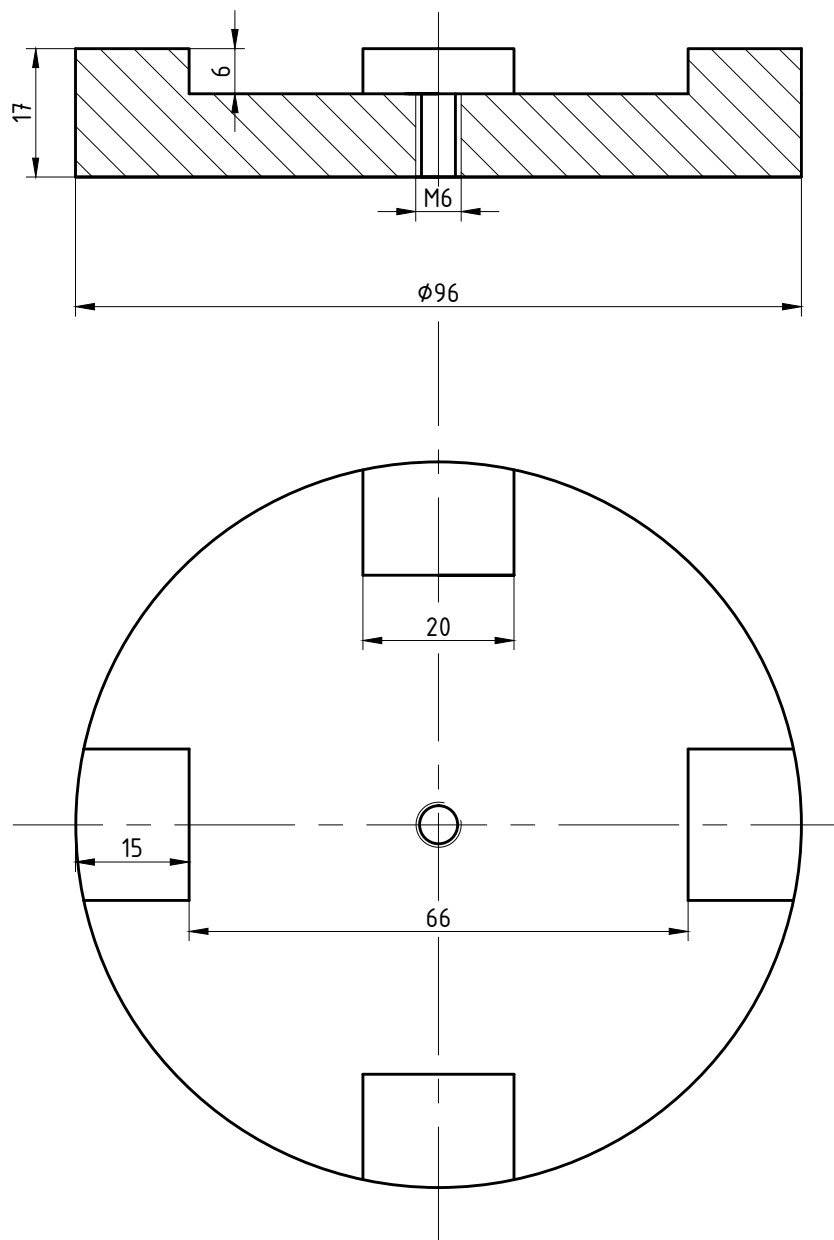




|                                 |                                             |                           |                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                                  | Méretarány:<br><b>2:1</b> | BME<br>POLIMERTECHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Csapágy távtartó nagy</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                                      | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |

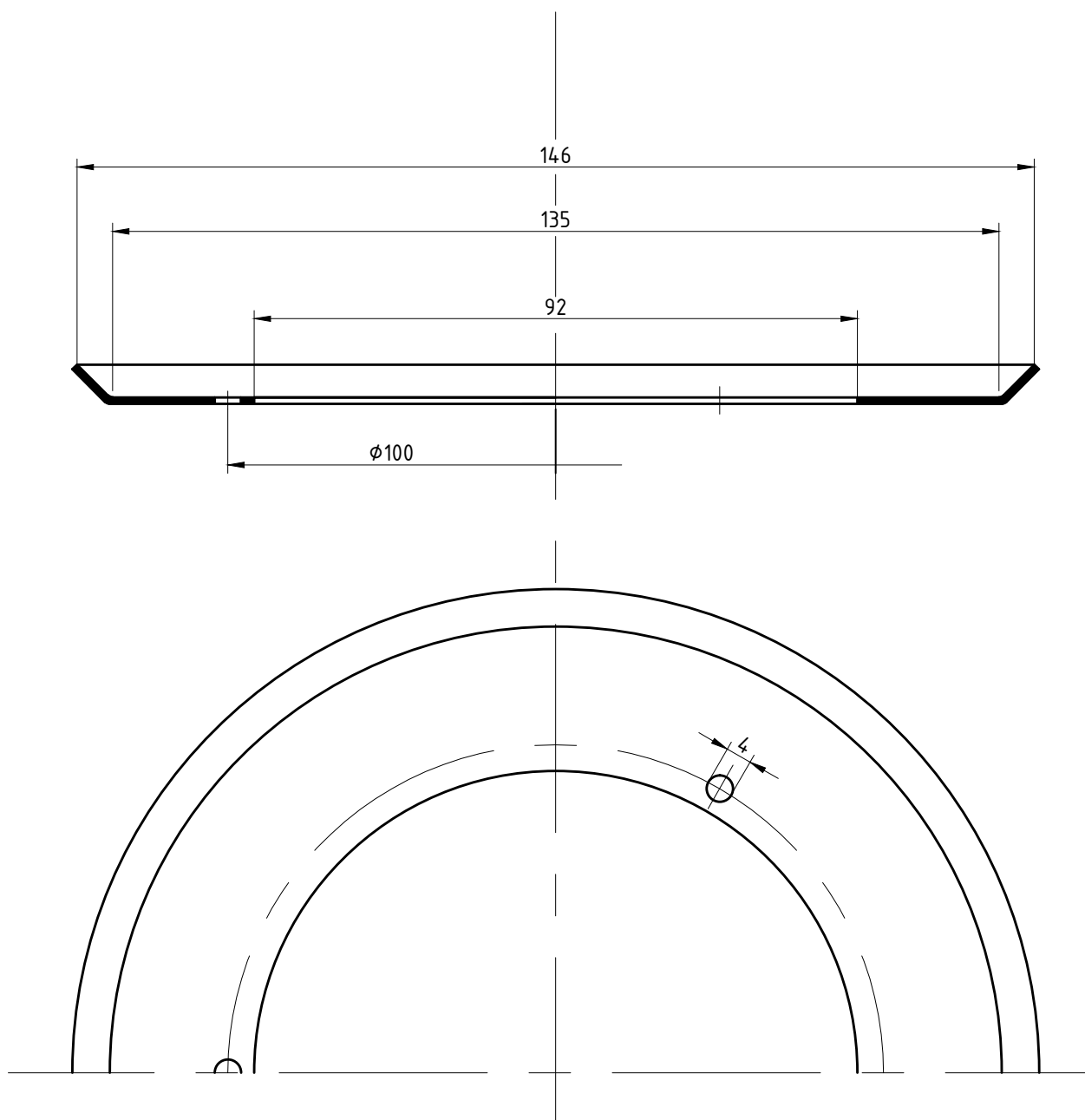


|                                 |                                     |                           |                                   |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                          | Méretarány:<br><b>5:1</b> | BME<br>POLIMERTÉCHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Csőcsatlakozó</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                              | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |

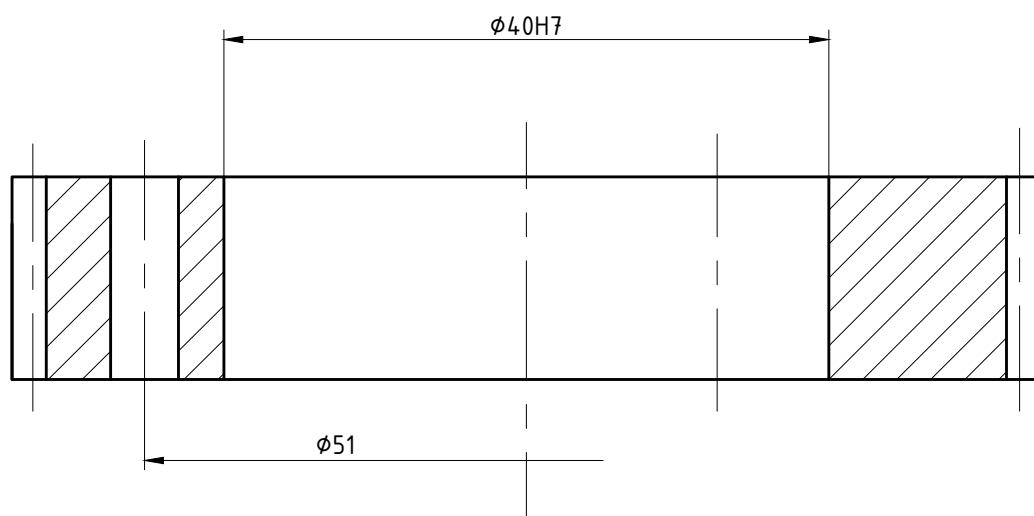


|                                 |                             |                           |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                  | Méretarány:<br><b>1:1</b> | BME<br>POLIMERTÉCHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Fedél</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                      | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |





|                                 |                                   |                           |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                        | Méretarány:<br><b>1:1</b> | BME<br>POLIMERTÉCHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Lemez tálca</b> | Vet. mód:                 | Rajkszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                            | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |
|                                 |                                   |                           |                                   |



|                                 |                                       |                           |                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Tervező:<br><b>Kovács Tamás</b> | Gyártmány:                            | Méretarány:<br><b>2:1</b> | BME<br>POLIMERTECHNIKA<br>TANSZÉK |
| Dátum:<br><b>2012.09.05.</b>    | Megnevezés:<br><b>Fogasszíjtárcsa</b> | Vet. mód:                 | Rajzszám:                         |
| Ellenőrizte:                    | Anyag:                                | Tömeg:                    | Fájlnev:                          |

