

LCO₂ HŰTŐKÖZEGŰ KÜLSŐ KRIOGÉN HŰTŐRENDSZER TERVEZÉSE NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK HORONYMARÁSÁHOZ

DESIGN OF AN EXTERNAL CRYOGENIC COOLING SYSTEM WITH LCO₂ COOLANT FOR THE SLOT MILLING OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS

Kónya Gábor^{1,0000-0003-1531-5921*}, Jámbor Norbert^{1,0000-0001-6255-770X}, Kókai Eszter^{1,0009-0002-3043-9914},
Kovács Zsolt Ferenc^{1,0000-0002-6995-6508}, Miskolczi István^{1,0009-0002-2111-1730}

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2023.1.ENG.010>

Kulcsszavak:

LCO₂
LN₂
Kriogén hűtőrendszer
Ni-bázisú szuperötvözet
Horonymarás

Keywords:

LCO₂
LN₂
Cryogenic Cooling System
Ni-based superalloys
Slot milling

Cikktörténet:

Beérkezett 2023. március 5.
Átdolgozva 2023. március 25.
Elfogadva 2023. április 10.

Összefoglalás

A nehezen forgácsolható fémötvözetek forgácsolhatóságának vizsgálata területén új kutatási terület jelent, a kriogén hűtéssel segített megmunkálás. A kriogenika alacsony hőmérsékleten végbemenő folyamatokkal foglalkozó tudományág. Az ipar számos területén alkalmazzák ezt az eljárást, például az élelmiszeriparban fagyasztott termékek gyorsfagyasztására, mellyel garantálni tudják az élelmiszerek minőségét. Forgácsolás területén egyáltalán nem elterjedt eljárásról beszélünk, az országban elsőként foglalkozunk ezzel a területtel, melynek első lépcsőfoka, hogy olyan hűtőrendszert alakítsunk ki, mely folyékony szén-dioxid (LCO₂) és folyékony nitrogén (LN₂) kijuttatására egyaránt alkalmas. Jelen publikációban ennek a rendszernek a kiépítését mutatjuk be.

Abstract

A new area of research in the study of machinability of difficult-to-cut metal alloys is cryogenic cooling-assisted machining. Cryogenics is a discipline dealing with low temperature processes. It is used in many areas of industry, for example in the food industry for rapid freezing of frozen products to guarantee food quality. In the field of machining, we are talking about a process that is not widespread at all, and we are the first in the country to work in this field, the first step being to develop a cooling system capable of delivering both liquid carbon dioxide (LCO₂) and liquid nitrogen (LN₂). In this paper we present the implementation of this system.

1. Bevezetés

A Ni-bázisú szuperötvözetek rendkívül nehezen forgácsolható anyagok: nagy a melegszilárdságuk, alacsony a hővezető-képességük, korrózióállóak és kúszásállóak is. A forgácsleválasztási folyamat során hatalmas mennyiségű hő keletkezik és a hagyományos hűtőkenő eljárások alkalmazása nem bizonyult elegendően hatékonynak Ni-bázisú szuperötvözetek forgácsolásakor, mivel a forgácsolási zóna nem hűthető le megfelelő mértékben a hagyományos

hűtő-kenő eljárási módszerekkel ezért a kutatás során előtérbe került a kriogén hűtési eljárás. A kriogén hűtési technika alkalmazásakor elsősorban nagyon alacsony hőmérsékletű folyékony-nitrogént és -szén-dioxidot alkalmaznak hűtőközegként, amelyek alkalmazásával a forgácsolási zóna megfelelő mértékben hűthető a forgácsolási folyamat közben, ezzel csökkentve a nagymértékű szerszámkopást és javítva a gyártott felület minőségét. Összehasonlítva a többi hűtő-kenő eljárással látható, hogy környezetbarát eljárás, mert alkalmazása során nem keletkezik veszélyes hulladék és nincsenek káros élettani hatásai, mint például gombás megbetegedések vagy a légutakra gyakorolt káros hatások, szemben az olaj tartalmú hűtő-kenő folyadékok alkalmazása esetén. Kutatásunk célja, hogy megvizsgáljuk egy marógépnél alkalmazható külső hűtésre alkalmas kriogén hűtőrendszer kiépítésének lehetőségeit, majd megtervezzük és megépítjük azt.

2. Nikkel-bázisú szuperötvözetek forgácsolhatóságának problémaköre

A Ni-bázisú szuperötvözetekben az ötvözőelemek száma gyakran lehet 10 vagy annál több, ebben a tekintetben a legbonyolultabb ember által alkotott ötvözetek közé sorolható [1]. A nikkel-bázisú szuperötvözetek különösen nehezen megmunkálható anyagok, ez számos okra vezethető vissza: alacsony a hővezető képességük, ezáltal magas hőmérséklet jön létre forgácsolás közben a vágóéleken és a forgácsolási zónában, nagy melegszilárdságuk miatt nagy forgácsolóerő szükséges a megmunkálásukhoz, továbbá erősen koptató hatásúak a forgácsoló-szerszámokra nézve. Ezen tényezők szemléltetésére a GTD111 típusú Ni-bázisú szuperötvözetet hasonlítom össze két referencia anyaggal, egy ausztenites korrózióálló acéllal (KO36Ti) és egy ötvözetlen szénacéllal (C45). Az 1. táblázatban látható, hogy a Ni-bázisú ötvözet szakítószilárdsága sokkal nagyobb a referencia anyagokénál; hővezetőképessége is meglehetősen alacsony, a KO36Ti anyaggal megegyező [2].

1. Táblázat GTD111, KO36Ti, C45 anyagok mechanikai- és fizikai tulajdonságai [2]

| Anyag megnevezése | GTD111 | KO36Ti | C45 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| Szakítószilárdság, R_m (MPa) | 1310 | 490 | 610 |
| Nyúlás, A_5 (%) | 5 | 40 | 16 |
| Kontrakció, Z (%) | 5 | 55 | 40 |
| Keménység, HB (N/mm ²) | | 180 | 230 |
| Keménység, (HRC) | 41,4 | | |
| Sűrűség, ρ (kg/m ³) | 8000 | 7800 | 7700 |
| Hővezetőképesség 20 °C-on, λ (W/m·K) | 12,56 | 12,50 | 45,35 |
| Fajhő 20 °C-on, c (J/kg·K) | $0,452 \times 10^3$ | $0,502 \times 10^3$ | $0,461 \times 10^3$ |

Továbbá az is látható, hogy a GTD111 szuperötvözet szakadási nyúlása, illetve kontrakciója is kisebb a másik két anyagénál. A Ni-ötvözet keménysége, megközelítőleg kétszerese a referencia anyagokénak és sűrűsége is jelentősen nagyobb azoknál [2].

3. Kriogén hűtéssel végzett forgácsolás

A kriogenika nagyon alacsony hőmérsékleten végbemenő fizikai jelenségek előállításával és alkalmazásával foglalkozó tudományág. A negatív hőmérsékletek (Celsius skálán) számos anyagjellemzőkre is hatással vannak, többek között: a hővezető képességre, az elektromos ellenállásra, a képlékenységre és a szilárdságra is [3]. A hagyományos hűtő-kenő technikák nem bizonyultak elég hatékonynak a Ni-bázisú ötvözetek forgácsolásakor. Ez arra vezethető vissza, hogy a hűtő-kenő folyadék nagyon nehezen jut el a forgácsolási zónába a munkadarab és a szerszám közötti határfelülethez. Ez a jelenség alacsony termelékenységet, magas gyártási költségeket és alacsony forgácsolási sebesség alkalmazhatóságát eredményezi [4]. Kriogén hűtéssel végzett

forgácsolás során főként folyékony nitrogént (LN₂) vagy folyékony szén-dioxidot (LCO₂) alkalmaznak hűtőközeggként. Alkalmazásának legfőbb célja az, hogy a hagyományos hűtő-kenő folyadékkal szemben alacsonyabb forgácsolási hőmérsékletet érjünk el.

A kriogén hűtés hatásai a forgácsolási folyamatra [4], [5]: nagymértékben csökken a forgácsolási hőmérséklet; javulnak a szerszám és a munkadarab közötti súrlódási viszonyok; csökken a forgácsolóerők nagysága; nagymértékben csökken a szerszámkopás, ezzel együtt a forgácsolószerszám élettartama növekszik; jobb forgácstörés érhető el; javul a megmunkált felület átlagos érdessége.

Ezen megállapításokat alátámasztják Aramcharoen és mtsai., akik marási kísérleteket végeztek hűtés nélkül, hagyományos olaj-bázisú hűtő-kenő folyadékkal és kriogén hűtési technikával úgy, hogy folyékony nitrogént juttattak a forgácsolási zónához. TiN bevonatú, 10 mm átmérőjű volfrám karbid szármarót alkalmaztak, a megmunkált anyag Inconel™ 718 volt. Az alkalmazott technológiai paraméterek a következők voltak: $v_c = 90$ m/min, $v_f = 573$ mm/min, $a_e = 0,5$ mm, $a_p = 2,5$ mm [4]. A legnagyobb forgácsolási hőmérséklet száraz forgácsoláskor mérték, mely 843 K volt, ezzel szemben a kriogén hűtésnél ez az eredmény 473 K értékre csökkent. A forgácsolási hőmérsékletet infrakamera segítségével mérték [4].

A forgácsolóerők mérésekor az eredmények azt mutatták, hogy a forgácsolóerő nagyobb volt kriogén hűtésnél, mint a hagyományos hűtésnél, de összességében a szerszámkopás mégis kisebb volt. Ennek oka az lehet, hogy a forgácsolt anyag szilárdsága nagyobb volt az elsődleges nyírási zónában, az alacsonyabb hőmérséklet által. Ezen kívül az is lehetséges, hogy a hagyományos hűtő-kenő folyadék alkalmazásakor nagyobb hőmérsékleten lágyult az anyag és képlékennyé vált általa, hogy a nyírási zónában lévő hő lassabban távozott. A forgácsolószerszám és a munkadarab közötti súrlódás csökkent a kriogén hűtési módszerrel, javítva a szerszámkopást [4]. M. Jebaraj és mtsai. 55NiCrMoV marásakor jelentős mértékű forgácsolóerő csökkenést értek el kriogén hűtés alkalmazásával [5].

A forgácsképződés szempontjából azt figyelték meg, hogy kriogén hűtés alkalmazásakor jobb volt a forgácstörés, rövidebb és fényesebb volt a forgács a hűtés nélküli forgácsolás és hagyományos hűtéssel szemben [4]. Felületi minőség szempontjából is jobb eredményt értek el folyékony nitrogén alkalmazásakor, egyenletes felületet kaptak és kráteres kopás sem volt megfigyelhető [4]. A fenti adatok alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a hagyományos vagy HSC, hűtés nélküli marási technológia kiegészítése kriogén hűtési módszerrel egy ígéretes kutatási terület lehet, amivel javítható mind a megmunkálás minősége, mind a szerszámkopás és ezzel a termelékenység is.

4. Kriogén hűtőrendszer tervezése

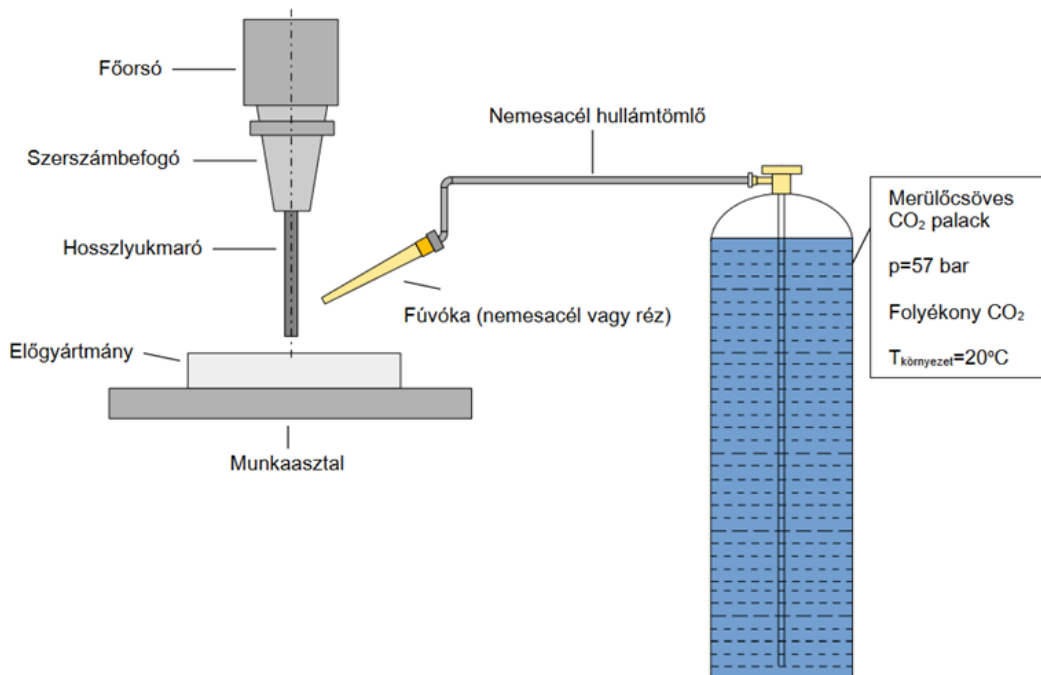
A hűtőrendszer megtervezése nem könnyű feladat. A szakirodalomban egyértelmű információk nem fellelhetők a rendszerrel-, illetve az alkalmazott hűtőközeg mennyiségekkel kapcsolatban. Például M. Jebaraj és mtsai. által végzett kísérletek során megemlítettek egy 0,1 l/min értéket folyékony szén-dioxidra vonatkozóan, azonban azt állítják, hogy a CO₂ palack nyomását egy reduktor segítségével 6 bar-ra csökkentik, ekkora nyomáson pedig nagy valószínűséggel a közeg jelentős részben gőzzé alakul át és az alkalmazott térfogatáram mérővel nem biztos, hogy folyékony állapotban mérték ezt az értéket [5]. Más kísérletek esetében a közeg áramlását tömegáram mérésével határozták meg, amely pontosabb képet mutathat, mivel nem feltétlenül szükséges figyelembe venni a jelenlévő halmazállapotú viszonyokat a mérés helyén, amelyeket a térfogatáram esetében tudnunk kell. Továbbá a mérése lényegesen egyszerűbb, hiszen a palack tömegét egy nagy pontosságú mérleggel nyomon tudjuk követni az idő függvényében. LCO₂ hűtés esetében tapasztalati tömegáram értékeket két kísérleti alkalmazásban találtam: Damir Grguras és mtsai. 0,1 kg/min és 0,2 kg/min értékekkel dolgoztak, Asif Iqbal és mtsai. pedig 0,2 kg/min, 0,4 kg/min és 0,6 kg/min értékeket alkalmaztak [6].

4.1. Hűtőrendszer elvi felépítése

Egy olyan hűtőrendszer kialakítását tűztük ki célul, amely folyékony szén-dioxid- és folyékony nitrogén hűtőközeg alkalmazása esetén egyaránt alkalmazható. Ez a rugalmasság a későbbi kutatások során nagyon fontos lesz. Ebből adódóan a rendszer minden egyes komponensének el

kell tudnia viselni a -198 °C -os hűtőközeget és a szén-dioxidos hűtés esetén fellépő 57 bar-os üzemi nyomást.

Miután a rendszerrel szemben fellépő követelmények, illetve a hőtani folyamatok letisztázták, elkészítettük a hűtőrendszer elvi ábráját, mely az 1. ábrán látható.



1. ábra: Kriogén hűtőrendszer elvi vázlata

4.2. Rendszer alkatrészeinek kiválasztása, tervezése

4.2.1. Szén-dioxid palack

Először egy LCO_2 -t felhasználó hűtőrendszert építünk ki, így az ennek tárolására megfelelő edény meghatározása történt meg először. A palackok közül alapvetően két változat van, a hagyományos és a merülőcsöves. Utóbbi előnyösebb hűtés szempontjából, mivel a palack alsó részéből alacsony hőmérsékletű, cseppfolyós szén-dioxid nyerhető ki, szemben a hagyományos palackkal szemben, amelyből a hűtőközeg nagyobb részben magasabb hőmérsékletű gázként távozik. Az említett okok miatt a merülőcsöves kialakításra esett választásom, 30 kg-os töltettel.

4.2.2. Tömlő

Nemesacél, hullámos falú, egyszeres nemesacél szövetel körülhatárolt fémtömlőt választottunk ki, amely nagyon alacsony üzemi (abszolút 0 K-hez közeli) hőmérsékleten alkalmazható, továbbá a szén-dioxid palackból kilépő nyomásnak is ellenáll. A legkisebb, 6 mm-es belső átmérőjű változatot választottuk, hiszen a kijuttatandó hűtőközeg mennyiségéhez teljesen megfelelő. A tömlő palack felőli oldalára egy W21,8x114" menettel rendelkező, (DIN477-6) hollandi anyás csatlakozót kértünk a palack szabványosságából adódóan, a fúvóka felőli oldalra pedig egy M14x1,5-es hollandi anyás, tömítőképos csatlakozót (24/60°-os kúp, könnyű kivitel, DIN 3861).

4.2.3. Fúvóka választás

Kriogén hőmérsékleti tartományban alkalmazható fúvókára volt szükség, amely folyékony szén-dioxid és folyékony nitrogén hűtőközeget alkalmazó rendszer esetén is megfelelő biztonsággal használható. Alapvetően kétféle megoldást vizsgáltunk meg: egy ipari, szerszámgépeknél alkalmazott hűtő-kenő fúvókát, flexibilis csővel, rozsdamentes acélból; illetve egy egyedileg összeállított rendszert választott alkatrészekkel.

Az ipari megoldás esetén modulárisan felépíthető rozsdamentes elemekből épül fel, amelyhez különböző méretű fúvókákat szerelhetünk fel, mely nagymértékben hasonlít a széles körben alkalmazott Loc-Line® termékekhez, amelyeket hagyományos hűtő-kenő folyadékoknál

alkalmaznak. Erre a megoldásra kevés vállalat kínál termékeket, azonban találtunk kettőt, akikről árajánlatot is kértünk, a Hirt-Line®-tól és az f.britsch-től. A Hirt-Line® megoldása a 2. ábrán látható, a másik vállalat terméke is nagyon hasonló a képen láthatóhoz. A Hirt-Line® rendszer nettó ára, 3 232,7 €. Az f.britsch által kínált rendszer nettó ára, pedig 141 €. Mindkét ár egy fűvókás rendszerre vonatkozik



2. ábra: Hirt-Line® fűvóka

Az egyedi megoldás jelentősen olcsóbban megvalósítható az előzőleg bemutatottal szemben. Ebben az esetben egy lánghegesztéshez alkalmazott vörösréz, hajlítható Varga rendszerű égőszárat alkalmaznánk, amely különböző átmérőjű fűvókákkal elérhető. Az égőszárat négyféle méretben vásárolnánk meg: Ø1 mm, Ø2 mm, Ø3 mm és Ø4 mm. Azért választanánk többféle méretet, hogy később megvizsgálhassuk, melyik fűvókát tudnánk alkalmazni olyan módon, hogy a kimenetnél képződött szárazjég ne tömítse el a fűvókát, illetve, hogy a fűvókán kiáramló közeg milyen képet ad, hiszen fontos, hogy a forgácsolási zónára koncentrálandó közeggel hűtsünk és ne legyen annak nagy szórása. Azért választottuk ezeket a fűvóka átmérőket, mert más kriogén külső hűtőrendszereknél 0,8-2 mm közötti átmérőjű fűvókákat alkalmaztak gyakran és ehhez közelítő méreteket szerettem volna én is alkalmazni. A fűvókák rögzítéséhez, beállításához egy vásárolt vagy egyedileg tervezett tartószerkezet szükséges, amelyet a fűvóka választás után fogunk meghatározni. A koncepcióhoz készítettünk egy szemléltető 3D modellt, amely a 3. ábrán figyelhető meg.



3. ábra: Egyedi fűvóka megoldás koncepciója

A koncepció választást első sorban költség alapon vizsgáltuk meg, mindhárom változat árát összevetettük, az egyes fűvókák árai a 2. táblázatban találhatóak. Az egyedi fűvóka alkalmazása esetében szükséges egy nemesacél csatlakozót is alkalmazni, amellyel a tömlőt és a fűvókát csatlakoztatom, ebben az esetben elsősorban anyagköltséggel számolunk, hiszen egyetemünk forgácsolóműhelyében minden rendelkezésre áll ahhoz, hogy legyártsuk, a tervezését pedig szintén magunk végeznénk el. Egy kisméretű nemesacél csatlakozó nettó darabára ez alapján megközelítőleg 500 forint lenne.

2. Táblázat Fűvókák árai (2022. augusztus)

| Fűvóka variációk | Nettó ár forintban |
|--|-----------------------|
| Ipari változat (Hirt-Line®) | 93 080 / db |
| Ipari változat (f.britsch) | 56 400 / db |
| Egyedi megoldás, (hajlítható hegesztő égőszár) és csatlakozó | 2 990 / db + 500 / db |

Az ipari megoldás költsége meglehetősen magas, az egyedi fűvókás rendszer a kapott árajánlat töredékéből is megvalósítható, ezen kívül még a rendszer egyéb alkotóelemeit is be kell szereznünk, amely további költségekkel jár. A két megoldást összevetve végül arra jutottunk, hogy az egyedi megoldást választjuk, mert sokkal alacsonyabb költségen is megvalósítható, még akkor is, ha egy-egy szükséges alkatrészt egyedileg kell gyártani hozzá vagy vásárolni, továbbá a kísérleti alkalmazáshoz teljes mértékben megfelelő.

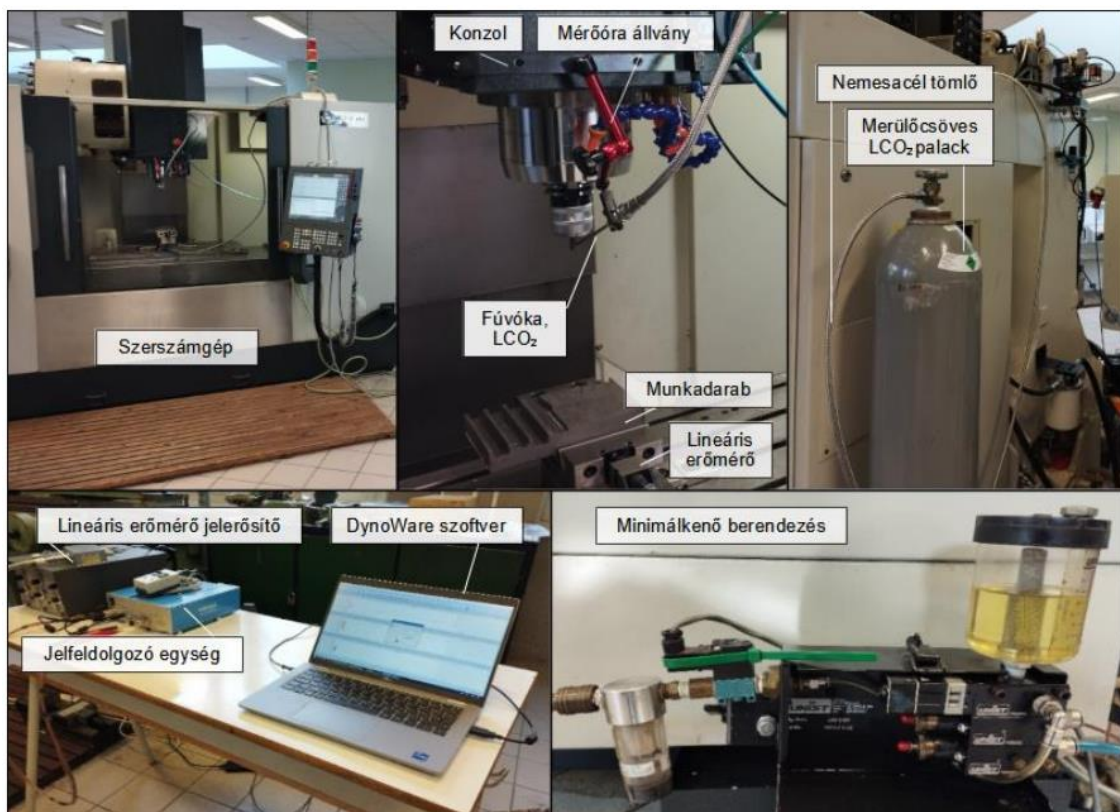
4.2.4. Fűvóka és tömlőfelfogás tervezése, választása

Fűvóka rögzítéshez egy mérőóra állványt választottunk, amely kívánt pozícióba állítható és rögzíthető karokkal rendelkezik, ez rendelkezésünkre állt az egyetemünkön. A választott fűvókák könnyedén befoghatók az állvány tartó részébe szorítva egy persellyel kiegészítve.

Egy műanyag perselyt terveztünk (4. ábra), mert a fűvókák külső, 5 mm-es átmérője nem elegendő azok befogásához. Az alapanyag 10 mm átmérőjű metamid (PA6) rúdanyag. A tervezett persely a fűvóka külső palástfelületére húzható a laza illesztés által, majd könnyedén rögzíthető az állvány befogó részére, annak szorításával. A mérőóra állvány mágneses komponensét leszereltük arról és a főrsó külső burkolatára egy egyedi konzolt terveztünk acéllemezből (4. ábra). A nemesacél tömlő felfogásához csavaros tömlőbilincsek alkalmaztunk.

4.2.5. Csatlakozók tervezése

A tömlő kimeneti oldala és a fűvóka bemeneti oldala közé egy-egy csatlakozó elemet terveztünk, amely szabványos méretű villáskulcs segítségével rögzíthető. Kétféle csatlakozót terveztünk, mert a fűvókák kétféle menettel rendelkeznek. A csatlakozók bemeneti oldalán egyaránt M14-es külső menetet szükséges kialakítani, ugyanezen az oldalon a belső csatlakozó felületet a tömlővégen található 24°-os kúpnak megfelelően alakítottuk ki. A kimeneti oldalon M8x1 és M9x1-es belső meneteket alkalmaztunk, ez az égőszárak menetéből adódik, mert az 1-es és 2-es fűvókán M8x1-es menet van, még a 3-as és 4-es fűvókán M9x1-es. A csatlakozók alapanyagának: 1.4301 minőségű ausztenites króm-nikkel acélt választottunk. A csatlakozó fűvóka oldali részén tömítésként teflonszalagot alkalmaztunk. A műhelyrajzok elkészítését követően a tanszékünkön legyártásra kerültek az alkatrészek, melyek a tömlők és az égőszárak összekapcsolásához szükségesek.



4. ábra: Hűtőrendszer összeállítása

5. Összegzés

Kutatómunkánk során tanulmányoztuk a Ni-bázisú szuperötvözetek legfontosabb jellemzőit és azt is, hogy milyen problémák merülhetnek fel azok forgácsolása során és miként lehetne javítani azokat. A kriogén hűtéssel kapcsolatban ígéretes eredményeket találtunk, amelyek alapján egy hűtőrendszer tervezésébe fogtunk. Egy olyan rendszert dolgoztunk ki, amelyet egyaránt lehet hasznosítani folyékony szén-dioxid és folyékony nitrogén hűtőközeg esetében. Igyekeztünk a rendszert minél több szabványos alkatrészből felépíteni, azonban vannak olyan elemek is, melyeket magunk terveztünk és gyártottunk le. A rendszert miután megépítettük, teszteltük azt és megállapítottuk, hogy az elvártaknak megfelelően működik. A rendszer tesztelése során (legkisebb, 1-es jelű égőszárral) 0,716 kg/min volt a hűtőközeg átlagos tömegárama. Ez meglehetősen nagy érték volt.

További célunk, a hűtőrendszer további fejlesztése, melynek lehetőségei: kisebb átmérőjű fúvókákkal való kísérletezés, tömegáram csökkentése. Más fúvóka kialakítás tesztelése, akár több fúvóka alkalmazása. LN₂ hűtőközeg alkalmazása, azzal való kísérletezés. Kísérlettervet felállítva horonymarási kísérletek elvégzése az optimális forgácsolási technológiai paraméterek meghatározására kriogén hűtés alkalmazásakor.

Irodalomjegyzék

- [1] Satyanarayana, D. V. V., Prasad, N. E.: Nickel-Based Superalloys, Aerospace Materials and Material Technologies, 2017, pp. 199–228, https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_9
- [2] Kodácsy, J., Kovács, Zs. F., Viharos, Zs. J.: A Ni-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA HORONYMARÁSKOR, Gradus, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 142–146
- [3] Cryogenics | physics | Britannica, [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/cryogenics> [Accessed: 15. 05. 2022.]
- [4] Aramcharoen, A., Chuan, S. K.: An Experimental Investigation on Cryogenic Milling of Inconel 718 and its Sustainability Assessment, Procedia CIRP, 2014, vol. 14, pp. 529–534 <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.03.076>
- [5] Jebaraj, M., Pradeep, K. M., Anburaj, R.: Effect of LN2 and CO2 coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel, Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 53, pp. 318–327 <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2020.02.040>
- [6] Iqbal, A., Zhao, G., Suhaimi, H., Nauman, M. M., He, N., Zaini, J., Zhao, W.: On Coolant Flow Rate-Cutting Speed Trade-Off for Sustainability in Cryogenic Milling of Ti–6Al–4V, 2021, vol. 14., no. 12, p. 3429, <https://doi.org/10.3390/ma14123429>
- [7] Grguraš, D., Sterle, L., Krajnik, P., Pušavec, F.: A novel cryogenic machining concept based on a lubricated liquid carbon dioxide, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, vol. 145, p. 103456, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103456>
- [8] Izoflex: TAURUS Fémtömlő, [online] Available at: <https://izoflex.hu/katalogus/termek/femtomlok/taurus-femtomlo> [Accessed: 31. 10. 2022.]
- [9] Hirt-Line Europe: Coolant hose / articulated hose for CNC machine tool, [online] Available at: <https://en.kuehlmittelschlauch.com/> [Accessed: 31. 10. 2022.]