

Zománczott reaktorok roncsolásmentes javítási technológiájának fejlesztése 3D nyomtatott tantálfolt felhasználásával

Development of a Non-destructive Repair Technique for Enamelled Reactors Using 3D Printed Tantalum Patch

Dr. POÓS Tibor¹, KASZÁS Zsombor Gábor², VARGA Gábor³

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás technika Tanszék,
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., D épület 110., Tel.: +36 1 463 2529,
www.epget.bme.hu, poos.tibor@gpk.bme.hu

¹Rimóczi és Társa Kft., 1181 Budapest, Vasvári Pál u. 6., Tel.: + 36 1 297 0300,
https://rimoczifilters.com, zsombi@rimoczifilters.com

²Rimóczi és Társa Kft., 1181 Budapest, Vasvári Pál u. 6., Tel.: + 36 1 297 0300,
https://rimoczifilters.com, gabor.varga@rimoczifilters.com

Abstract

Glass-lined equipment is widely used in chemical and pharmaceutical environments; however, when enamel defects appear, repair options are limited and often carry the risk of further damage. A solution to this is a procedure where a 3D-printed tantalum patch is custom-made for the specific site of the defect, which can be fixed to the enamel surface non-destructively. During the research, a custom-geometry repair element secured by neodymium magnets was tested across various pressure (0–3 bar(g)), temperature (20–80°C), and rotation speed ranges. Penetration tests confirmed that the tantalum patch, equipped with a silicone seal, provided a leak-proof seal under all investigated operating conditions. Based on the results, this technology offers a fast and cost-effective alternative to traditional enamel repair methods that require mechanical intervention.

Keywords: Glass-lining repair, 3D printed tantalum patch, Magnetic fastening, Non-destructive technology

Kivonat

Zománczott készülékeket széles körben alkalmaznak vegyi-, és gyógyszeripari környezetben, azonban a zománchibák megjelenésekor a javítási lehetőségek korlátozottak, további károsodás veszélyeit hordozzák magukban. Erre megoldást kínál az az eljárás, amikor célzottan a hibahelyre készül egy 3D nyomtatott tantálfolt, ami roncsolásmentesen rögzíthető a zománc felületére. A kutatás során egy neodímium mágnesekkel rögzített, egyedi geometriájú javítóelemet teszteltünk különböző nyomás- (0-3 bar(g)), hőmérséklet- (20-80°C) és fordulatszám-tartományokban. A penetrációs vizsgálatok igazolták, hogy a szilikon tömítéssel ellátott tantálfolt minden vizsgált üzemi körülmény között szivárgásmentesen tömített. Az eredmények alapján a technológia gyors és költséghatékony alternatívát kínál a hagyományos, mechanikai beavatkozást igénylő zománcjavítási módszerekkel szemben.

Kulcsszavak: Üveg-zománc javítás, 3D nyomtatott tantálfolt, Mágneses rögzítés, Roncsolásmentes technológia

1. BEVEZETÉS

Zománchibák és sérülések lokális javítására több megoldást is kifejlesztettek. Mivel a javítás nagyon költséges, az az általános megoldás, hogy a zománcot teljesen eltávolítják, és újra felhordják a készülék felületére [1]. A sérülés fajtájától függően, vagy tantál vagy nyers teflon (PTFE) alkalmazásával lehet orvosolni a hibát, de jellemző megoldás az is, amikor mindkét anyag egyszerre kerül felhasználásra. A kisebb felületi hibák javításánál a tantál csavaros megoldás az elterjedt. Ez a módszer megfelelő előkészítést igényel, a zománchiba környékét lekerekítik, lemunkálják, majd az acélköpenybe menetes furatokat készítenek. Ebbe

megfelelő méretű teflon tömítéses, galléros tantálcavart hajtanak be, így szigetelve el a hibát a gyártott terméktől. Az ilyen megoldások nem alkalmaznak ragasztási technológiát, csakúgy, mint a fémpótlásos javítás sem. Fémpótlásra olyankor van szükség, ha a sérült zománc miatt erőteljes korrózió indul meg a köpenyben. A sérült rész eltávolítása után, több felületelőkészítés következik, majd a ráakó hegesztéses javítás, vagy a javítólemez, vagy a tárcsa rá munkálása után, újra kell zománcozni az eszközt, ami meglehetősen drága [2]. Nagyobb hibák javításánál tantálfoltokat alkalmaznak, ami hasonló az előbb említett megoldásokhoz, azzal a különbséggel, hogy körkörösén, több csavarra van szükség a megfelelő leszorítóerő létrehozásához. Kritikus a felületelőkészítés, és a megfelelő lemunkálása a zománcnak, mivel ezekkel megelőzhetőek a további repedések. A felhelyezett foltot időközönként ellenőrizni kell, illetve a csavarok után húzására is szükség van.

A zománcozott felületekre a fém alkatrészek direkt illesztéssel nem helyezhetők fel, valamilyen tömítést alattuk mindenképpen kell alkalmazni. A szükséges tömítési feladatok ellátására általában fluoropolimereket használnak, mivel ezek a fluorozott műanyagok stabilok, sterilizálhatóak, magas hőmérséklet tűrésűek, és a műanyagokat tekintve a legellenállóbbak a vegyi anyagokkal szemben. Ilyen például a teflon (PTFE), vagy a PVDF, amely extrém saválló tulajdonsága miatt szintén jellemző az iparban. Ilyen az FEP is, amit az elasztomerek védelmére fejlesztettek ki, és vegyi ellenállósága közel azonos a teflonéval, de a hőmérséklet tűrése alacsonyabb a teflonhoz viszonyítva.

A csonkok környékén létrejött zománchibák teflon és tantál hüvelyekkel javíthatók. A megoldás hátránya, hogy a rögzítéshez muszáj ragasztót alkalmazni. Nem használhatók a fluoropolimer tömítések és egyes gyógyszeripari alkalmazásoknál a ragasztó használata sem megengedett a GMP miatt. Ilyenkor a berendezést visszaminősítik segédberendezéssé.

Kutatásunk során hidrodinamikai, hidrosztatikai és penetrációs vizsgálatokat végeztünk tesztreaktorban, amely során valós körülmények között monitoroztuk a létrehozott mintát, és dokumentáltuk az eredményeket, tapasztalatokat. Szabályozott reaktortéri nyomás és hőmérséklet mellett, megfelelően turbulens körülmények között történtek a mérések. A megfelelő tömítettség kritikus szempont a tantálfolt alkalmazása során, hiszen a szivárgás a készülék tönkremeneteléhez vezethet. A kutatási téma ötletét adó megoldás azért is aktuális, mert nemcsak a hazai, hanem a világ felhasználói körében az üvegzománcozott eszközök esetlegesen szükséges javításait az elmúlt 40 évben közel azonos módszerekkel végezték a szakma hozzáértői. Ezeknek a javítási módszereknek pedig megvannak a korlátai.

2. VIZSGÁLT BERENDEZÉS, ANYAGOK, MÓDSZER

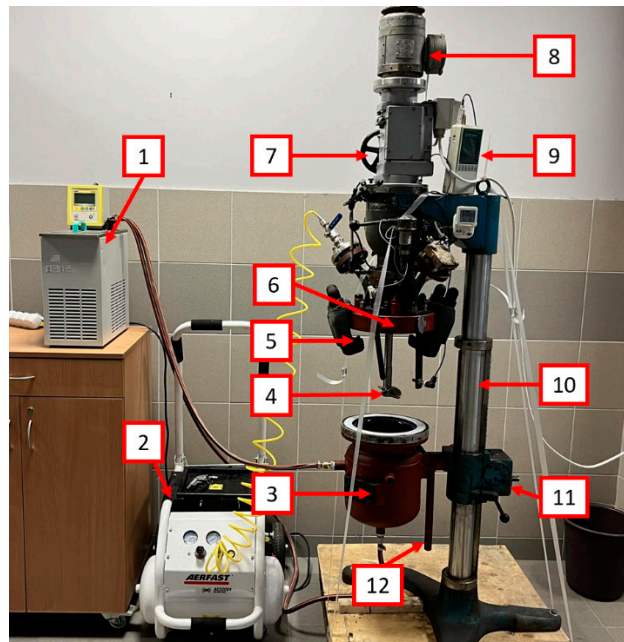
A reaktor központi elemét képező zománcozott tartály felületének javítására használt 3D nyomtatott tantálfolt alkalmazásának ellenőrzése a BME Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék Stokes Laboratóriumában történt.

2.1. Vizsgált berendezés

A mérőberendezés felépítése az 1. ábrán látható. A képen meg lettek jelölve a berendezés fő egységei, a műszerköri elemek, illetve a szabályozókörök.

A mérőállomás központi része a 4-jelű 90 mm átmérőjű propeller keverővel ellátott zománcozott, Pfaudler 27-105/G típusú reaktor (V-101). A propeller keverő forgatását egy Loher GmbH LA 71b-4 típusú variátoros villamos keverőmotor (M-101) végzi, ahol a keverőelem fordulatszáma a 7-jelű kézi fordulatszám állítóval fokozatmentesen beállítható 150 – 850 $1/min$ tartományban. A tartály duplikátoros kivitelű, amin keresztül a kevert folyadék fűthető vagy hűthető. A mérés során a köpenytér fűtése melegvízzel történt, amelyet a Lauda E200 típusú termosztát (H-101) segítségével lehet a kívánt hőmérsékletre beállítani $T_{víz} = T_{körny} - 90^{\circ}C$ között. A termosztátban gyárilag beépített szivattyú keringteti a vizet a köpenytérben. A reaktortérben a nyomás növelése a 2-jelű Aerfast AC32024 típusú kompresszorral (C-101) történt, $p = 0 - 3 \text{ bar}(g)$ nyomástartományban.

A tartály nyitása annak függőleges irányú leeresztésével valósítható meg, a fedelet rögzítő 5-jelű tartálybilincsek eltávolítása után. A függőleges irányú mozgatás a 10-jelű állványon található 11-jelű magasságállító forgatásával lehetséges. A 12-jelű billenőkarral a tartály a vízszintes tengely körül elfordítható és így abból a folyadék üríthető. A zománc felületére elhelyezett tantálfolt a tartályfenék alsó pontján található, a keverőtengely alatt. A tantálfoltot mágnes rögzíti a felülethez.

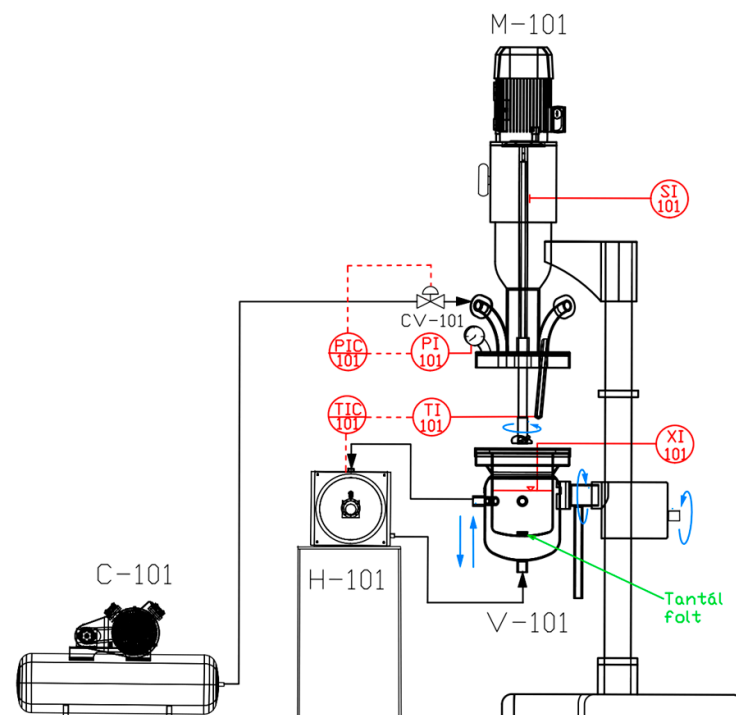


1. ábra. Mérőberendezés és főbb részei

(1-termosztát; 2-kompresszor; 3-tartály; 4-propeller keverő; 5-tartálybilincs; 6-fedél; 7-fordulatszám állító; 8-villamos motor; 9-fordulatszám kijelző; 10-állvány; 11-magasságállító; 12-billenőkar)

A 2. ábrán láthatóak a műszerek és a szabályozókörök. A mérés során a kevert folyadék hőmérsékletét egy PT-100 típusú termoelem (TI-101) méri és egy helyi kijelzőn jeleníti meg az értéket. A köpenytérben áramló víz hőmérsékletének szabályozását a TIC-101 szabályozókörön keresztül végzi a termosztát. Az reaktortér nyomása a CV-101 szeleppel szabályozható és a PI-101 jelű manométeren keresztül ellenőrizhető. A propeller keverő fordulatszámának mérése az SI-101 jelű Visolux GLV12-8-200/36/40B/92 típusú optikai fordulatszám-mérővel történik. A fordulatszám méréséhez a keverőtengelyre egy nagy reflexiójú matrica van felragasztva. Az optikai fordulatszám-mérő egy Ahlborn ALMEMO 2890-9 típusú adatgyűjtőn keresztül jelzi ki a mért értéket.

A mérés során a tartály aljára felhelyezett tantálfolt alá ~20 mm hosszú pH-mérő lakmuszpapír (XI-101) került, amellyel a penetráció, a folyadék átszivárgás ellenőrizhető.

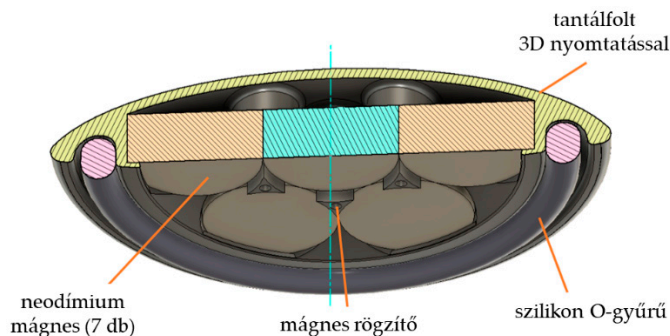


2. ábra. A mérőállomás P&I rajza

(C-101 – kompresszor, H-101 – termosztát, V-101 – reaktor, M-101 – keverőmotor)

2.2. A tantálfolt ismertetése

A folt egyedileg készült, geometriája leköveti a tartályfenék alakját. A tantálfoltot a Rimóczi és Társa Kft. készítette 3D modell alapján, PBF (powder bed fusion) technológiával. A modell alapját a zománcozott Pfauder reaktor adta, amelyet 3D felületi szkennelés segítségével mért fel a Rimóczi és Társa Kft. Az ötvözetlen tantál port rétegenként vitték fel, ezzel elérve a megfelelő szerkezet kialakítását. A 3D modell külső oldala domború. Belsejébe a nyomtatás után, a 7 db, $\varnothing 12 \times 5$ mm méretű, N48 neodímium mágnes került, amelyek műgyantával kerülnek rögzítésre a foltba, ezáltal biztosítva a megfelelő inertséget és stabilitást.



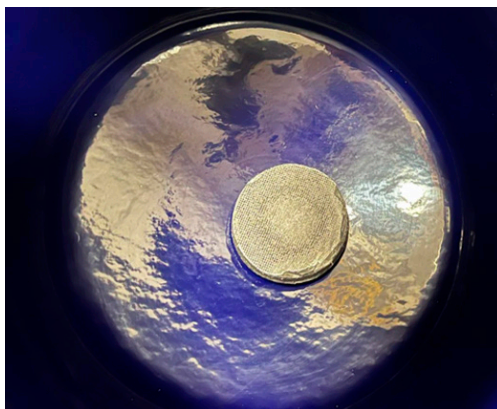
3. ábra. Tantálfolt 3D modellje

A 3. ábrán látható a mintadarabban a mágnesek helyzete, a nyomtatott rögzítők, valamint a tömítőgyűrű illeszkedését segítő kialakítás. A nyomtatott folt nagy belső merevséggel rendelkezik. A folt alkalmazásának kritikus pontja a megfelelő tömítettség biztosítása, amely az alkalmazott fluoropolimerre jellemző tömítőerő biztosításával kompenzálható. Jelen esetben a tömítőerőt a mágnesek biztosítják. A 3D nyomtatott $\varnothing 50 \times 10$ mm méretű tantálfolt, habosított szilikon O-gyűrűvel van ellátva. A mintadarab tartalmazza a nyomtatás során szükséges külső támasztékot, ami a vizsgálatok előtt nem került lemunkálásra.

2.3. Módszer

A 4. ábrán látható módon került elhelyezésre a tantálfolt a zománcozott felületen. A vizsgálathoz a tantálfolt alá ~ 20 mm hosszú pH-mérő lakmuszpapírt helyeztünk el. A reaktorba 20%-os háztartási étellecet és víz adott arányú keverékével töltöttük fel a tartályt. Amennyiben a tantálfolt alá bejut a folyadék, akkor a lakmuszpapír nemcsak nedves lesz, hanem a savas kémhatás hatására elszíneződik. Ha a lakmuszpapír érintetlen marad, akkor a tantálfolt megfelelően működött és így a tömítettség biztosított. Ahhoz, hogy tudjuk, milyen mértékben színeződik el a lakmuszpapír, először közvetlenül belemártottuk a savas folyadékba. Ebből a mérésekből kiderül, hogy az ecetes víz kémhatása $\text{pH}=3,5$.

A maximális fordulatszáma a laboratóriumi készüléknek, $n_{max} = 320 \text{ 1/min}$. Ugyanakkor érdemes más, alacsonyabb fordulatszámon is elvégezni a méréseket, ezért a berendezés fordulatszám tartományának a határait figyelembe vettük. Így az alacsonyabb vizsgált fordulatszámérték a maximum fele, azaz $n_{min} = 160 \text{ 1/min}$. A berendezés felépítéséből fakadó hőmérséklettartomány alapján a mérési beállításokhoz három értéket választottuk: $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 50^\circ\text{C}$, $T_3 = 80^\circ\text{C}$. A berendezés jelen üzemi állapotában elérhető nyomástartomány alapján a mérési beállításokhoz az alábbi három értéket választottuk: $p_1 = 0 \text{ bar}(g)$, $p_2 = 1,5 \text{ bar}(g)$, $p_3 = 3 \text{ bar}(g)$.

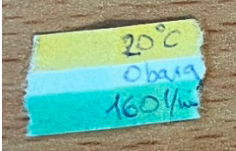
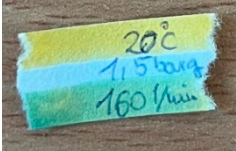
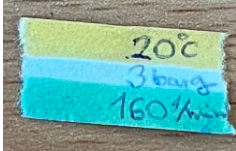
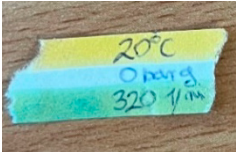

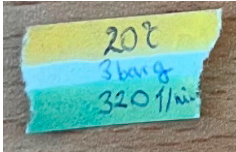


4. ábra. A reaktortér aljára elhelyezett tantálfolt

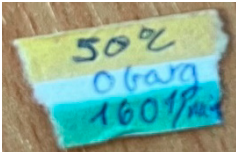
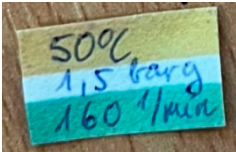
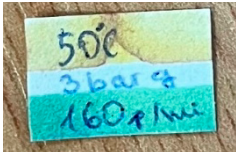

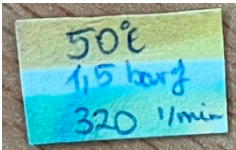
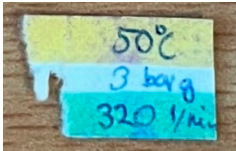
3. EREDMÉNYEK

Összesen 18 sikeres mérést végeztünk különböző beállításkombinációk mellett. A különböző hőmérséklet, nyomás és fordulatszámok lehetővé tették, hogy relatíve széles tartományban vizsgáljuk a tantálfolt ellenállását a folyadék szivárgása ellen. Az 1-3. táblázatokban láthatóak az adott beállítások mellett használt lakmuszpapírok képei, amelyek a tantálfolt alatt voltak a vizsgálat alatt.

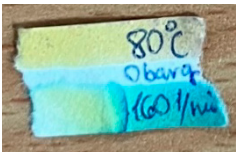
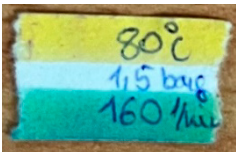

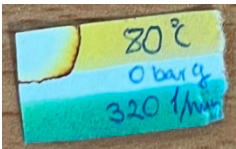
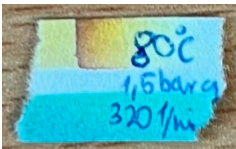
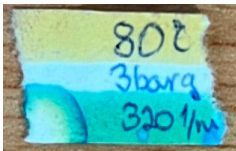
1. táblázat. pH-mérő lakmuszpapírok 20°C-on

n [1/min]	p [bar(g)]		
	0	1,5	3
160			
320			

2. táblázat. pH-mérő lakmuszpapírok 50°C-on

n [1/min]	p [bar(g)]		
	0	1,5	3
160			
320			

3. táblázat. pH-mérő lakmuszpapírok 80°C-on

n [1/min]	p [bar(g)]		
	0	1,5	3
160			
320			

A mérések különböző napokon és napszakok mellett lettek elvégezve, így az egyes képek sávszínei között a fényviszonyok miatt enyhe árnyalatbéli eltérések figyelhetők meg, azonban a valóságban azonos volt mindegyik. Egyértelműen elmondható, hogy a lakmuszpapírok minden mérésnél szárazok maradtak.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A reaktorok a vegyipar és gyógyszeripar területén gyakran előfordulnak. A reaktor konstrukciós anyagát gyakran zománccal védik a különböző, főként vegyi hatások ellen. A felületen zománchiba jelentkezhet akár

a készülék gyártási eljárása során, vagy a nem megfelelő üzemeltetés miatt, de a folyadék eróziós, és a kémhatásából adódó korróziós tulajdonsága miatt is. A zománchiba javítása különböző módszerekkel lehetséges. Ezek megválasztásánál az egyik legfontosabb követelmény a költségeken túl, hogy a javítás minél rövidebb idő alatt megtörténjen. A reaktorban végzett művelet költsége miatt, sokszor a drágább megoldást választják a zománchiba javítására a megrendelők, mivel a rövidebb állásidő kompenzálja a kiadásokat. Egy gyors, szinte minden felületi geometriát leíró, zománchiba javító megoldást jelenthet a mágneses rögzítést alkalmazó, 3D nyomtatott tantálfolt.

Méréseink során egy $\varnothing 50 \times 10$ mm méretű, habosított szilikontömítéssel ellátott, tantál alapanyagból 3D nyomtatással készített javítófoltot vizsgáltunk. A tantálfoltot egy reaktortartály fenékgörcsületén, a keverőtengely alatt helyeztük el. A mérések 20; 50 és 80°C-on, 0; 1,5 és 3 bar(g) reaktornyomás és 160 és 320 1/min keverőfordulatszám 18-féle különböző kombinációi mellett végeztük el. A mérések során vizsgáltuk, hogy a reaktorban lévő víz áthatol-e a tantálfolt alján lévő tömítésen, így eljutva a hibás tartályfelülethez. A penetráció során pH-mérő lakmuszpapírt helyeztünk a védett területre, a tantálfolt alá, folyadékként pedig enyhén savas kémhatású vizet használtunk. A különböző beállítások mellett végzett mérések a stacioner állapot elérésétől legalább 20 percig tartottak. A méréseink alapján bebizonyosodott, hogy a mágnessel rögzített tantálfolt megfelelően tömített, a lakmuszpapír mindegyik vizsgált esetben száraz maradt. Azonban néhány 80°C-os mérés esetén folt jelent meg a lakmuszpapíron, de elszíneződést nem okozott. Ennek feltehető okait ismertettük az eredmények során.

A biztató mérési eredmények alapján használhatónak mondható a felületi zománchibák javítására a tantálfoltok alkalmazása. Ugyanakkor ennél még több és szélesebb mérési intervallumban végzett kísérletekre van szükség – illetve egy adott beállításon többszöri ismétlések végzésére – ahhoz, hogy egyértelműen kijelentsük, hogy a lehető legtöbb, iparban előforduló körülmény mellett használható ez a fajta zománchiba javítási módszer. Ugyanakkor még pontosabb penetrációs vizsgálati módszert is érdemes lenne kidolgozni, ami nemcsak a folyadék áthatolását, de a gőzök bejutását is kimutatná. A tantálfolt fejlesztésénél javasoljuk egy olyan számítási modell kidolgozását, ami tartalmazza az adott tömítés esetén a szükséges szorítóerő mértékét, illetve az ennek megvalósításához szükséges mágnesek pozícióját és mennyiségét.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A fentiekben bemutatott 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00139 számú projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással valósult meg, *Additív gyártás felhasználása zománcozott berendezések javítási technológiájának fejlesztéséhez* projektcímen. A munka a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával (BO/00059/23/6) és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával (NKFIH FK-142204) készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] 'Enamel & Borosilicate Glass for Chemistry | De Dietrich Process Systems'. Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.dedietrich.com/en/solutions-and-products/enamel-borosilicate-glass>
- [2] Z. Pálfi, Vegyipari készülékek - szerkesztési atlasz. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1986.