



MISKOLCI
EGYETEM

Kutatási eredmények
a
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Karának
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében
2022





MISKOLCI
EGYETEM

Kutatási eredmények
a
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Karának
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében
2022

Szerkesztette:
Koncsik Zsuzsanna – Lukács János

Miskolc, 2022

**Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai
Karának Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében
2022**

Szerkesztette:

Dr. Koncsik Zsuzsanna – Dr. Lukács János

© Ahmad Yasser Dakhel, Lucas Alexander De Carvalho, Jemal Ebrahim Dessie,
Fodorné Cserépi Mariann, Fülöp Fruzsina, Gál Gaszton, Gáspár Marcell,
Pusta Jalalova, Koncsik Zsuzsanna, Kovács Judit, Kovács Péter Zoltán,
Kókai Ákos Levente, Kuzsella László, Lukács Zsolt, Lukács János,
Marosné Berkes Mária, Meilinger Ákos, Nagy Nóra,
Raghawendra Pratap Singh Sisodia, Török Imre

Kiadó:

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar,
Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

A kiadásért felelős:

Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens, intézetigazgató

Miskolc, 2022

ISBN 978-963-358-270-1

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	3
<i>Table of Contents</i>	
Előszó	7
<i>Foreword</i>	
Lukács Zsolt	
Csővég peremezési technológia fejlesztése	9
<i>Development of Flanging of Pipe end Technology</i>	
Lukács Zsolt, Gál Gaszton, Jemal Ebrahim Dessie és Kovács Péter Zoltán	
EN AW 5754 alumíniumötvözet klincs kötéseinek mechanikai vizsgálatai	17
<i>Mechanical Investigations of EN AW 5754 Aluminium Alloy Clinched Joints</i>	
Kovács Péter Zoltán és Lukács János	
Továbbfejlesztett Coulomb-féle súrlódási modell anyagparamétereinek meghatározása	25
<i>Determination of Material Parameters for an Improved Coulomb Friction Model</i>	
Lukács Zsolt, Gál Gaszton és Lucas Alexander De Carvalho	
Anyagkártya meghatározása AutoForm programrendszerhez	31
<i>Material Card Determination for AutoForm Program System</i>	
Lukács Zsolt és Kovács Péter Zoltán	
A korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztésének kihívásai és megoldásai	39
<i>Challenges and Solutions for Welding of Advanced High Strength Steels</i>	
Gáspár Marcell és Sisodia Pratap Singh Raghawendra	
Alumínium – acél vegyeskötés készítése ellenállás-ponthegesztéssel	47
<i>Aluminium – Steel Hybrid Joints Made by Resistance Spot Welding</i>	
Meilinger Ákos és Fodorné Cserépi Mariann	
A gáznitridálás időtartamának hatása a keletkezett réteg vastagságára	59
<i>Influence of the Gas Nitriding Duration on the Thickness of the Formed Layer</i>	
Kuzsella László	
Növelt hőkapacitású, energiatakarékos beltéri bevonatok kvázi gradiens építőelemek fejlesztéséhez – bazaltszálalás ásványi hidrátok és low-E anyagok	69
<i>Energy-Saving Indoor Coatings of Increased Heat Capacity for the Development of Quasi-Gradient Building Elements – Basalt Fiber Mineral Hydrates and Low-E Materials</i>	
Fülöp Fruzsina és Marosné Berkes Mária	

Nagyszilárdságú acélok nagy ciklusú fáradásra érvényes fáradási szilárdsági görbéi <i>Fatigue Strength Curves of High Strength Steels for High Cycle Fatigue</i> Kovács Judit és Lukács János	87
Some Experiences with Polycrystalline Diamond Coatings on a Steel Substrate during Dry Sliding Ball-on-Disk Wear Test Conditions <i>Acél hordozóra felvitt polikristályos gyémánt bevonatok kenőanyagmentes, ball-on-disc kopásvizsgálatának néhány tapasztalata</i> Pusta Jalalova, Fruzsina Fülöp and Maria Berkes Maros	97
Hipoeutektikus alumínium forgattyúház atmoszférikus plazmaszórással készült acél bevonatainak vizsgálata <i>Investigation of Steel Coatings deposited by Atmospheric Plasma Spraying on Cylinder Bores of Hypoeutectic Aluminum Crankcase</i> Kókai Ákos Levente, Nagy Nóra és Marosné Berkes Mária	115
Szerkezetintegritási esettanulmányok <i>Structural Integrity Case Studies</i> Koncsik Zsuzsanna	133
Földgázszállító csővezetékek potenciálisan veszélyes helyeinek kockázat alapú azonosítása <i>Risk-Based Identification of Potentially Dangerous Locations in Natural Gas Transmission Pipelines</i> Koncsik Zsuzsanna és Lukács János	145
Kísérleti csőszakaszok körvarratainak vizsgálata ciklikus belső nyomás és statikus külső hajlítás együttese esetén <i>Investigation of Girth Welds of Pipeline Sections under Cyclic Internal Pressure and Static External Bending</i> Lukács János és Ahmad Yasser Dakhel	157
Adatbázis koncepció kísérleti csőszakaszok vizsgálati eredményeinek hasznosítására <i>Database Concept for the Exploitation of Test Results from Full-Scale Pipeline Sections</i> Lukács János, Koncsik Zsuzsanna és Török Imre	167
A mikrobiológiai korrózió kialakulása és jelentősége <i>The Development and Significance of Microbiological Corrosion</i> Kovács Judit	177
A mikrobiológiai korrózió vizsgálati módszerei <i>Investigation Methods of Microbiological Corrosion</i> Koncsik Zsuzsanna és Lukács János	189

Ventilátor járókerék kiegyensúlyozására szolgáló klipsz fejlesztése és járókerék kapcsolatának vizsgálata	201
<i>Development of Balancing Clips for Ventilator Impeller and Investigation of its Connection to Impeller</i>	
Kovács Péter Zoltán	
A termikus öregedés hatása a PWR reaktor tartály élettartamára	209
<i>Effect of Thermal Ageing on PWR Reactor Vessel Lifetime</i>	
Fodorné Cserépi Mariann	
A. Függelék – A 2022-es esztendő legfontosabb intézeti és Intézethez kötődő eseményei	217
<i>Appendix A – Key Institute and Institute-Related Events in 2022</i>	
B. Függelék – Emlékfüzet Prof. Dr. Tisza Miklós halálának évfordulóján	225
<i>Appendix B – Memorial Booklet on the Anniversary of the Death of Prof. Dr. Miklós Tisza</i>	

ELŐSZÓ

A Miskolci Egyetemen és jogelődjén, a Nehézipari Műszaki Egyetemen, több évtizedes múltra tekint vissza az, hogy egy adott év eseményeit, a főbb tudományos és ipari kutatások eredményeit az utókor számára megörökítve, Évkönyv formájában foglalják össze. Talán mi, akik ezt az Évkönyvet összeállítjuk nem is gondoljuk, hogy milyen hasznos lehet ez a munka a bennünket követő oktatói-kutatói generációk számára. Saját tapasztalatomból kiindulva mondhatom, hogy egy-egy neves évforduló során rengeteg fontos adatot és eseményt ismerhettem meg a múlt Évkönyveinek áttanulmányozásából. „Akinek nincs múltja, annak nem lesz jövője sem”, tartja a mondás. Ahhoz viszont, hogy a múlt a jövőben is elérhető legyen, ahhoz a jelenben kell tenni.

Ez vezérelte az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet kollektíváját akkor, amikor az elődök iránymutatását megértve, Évkönyv sorozat indítását határozta el. Ebben a sorozatban az első a most a Tisztelt Olvasó által forgatott, vagy a jövőben görgetett Évkönyv, amely a Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében, a 2022-es évben végzett kutatások eredményeit foglalja össze.

A kutatási eredmények bemutatása során nem volt nehéz dolgunk. Az Intézetben 2022-ben is, a múltunk ismeretében már elvártak tekinthető mennyiségű ipari megbízások és projektek kereteiben végzett szakmai tevékenység zajlott. Az Intézet minden kompetencia területén fel tudott mutatni, a hagyományos oktatási formák művelése mellett, a piaci bevételszerzést növelő ún. szakirányú vagy túszerű képzések indításában és más gondozó intézetek képzéseiben történő közreműködésében is eredményeket. Új szakmai kapcsolatok születtek, a régiak tovább épültek, amelyek a jövő kutatásait megalapozhatják. Ezeket az eredményeket jól mutatja a 2022-es eseményeket időrendben felsoroló mellékletben az ipari partnerek látogatásait, projekt generáló megbeszéléseit dokumentáló dátumok sokasága.

Az Intézet kutatásai között megtalálhatók a sok évtizedes múltra visszatekintő kompetenciák területein (alakítás-, hegesztés- és hőkezelés technológiák, anyagvizsgálatok) végzett munkák és az Intézet, a mérnöki szakma folyamatos megújulását követő, új kutatási területei (számítógépes modellezés és technológiatervezés, szerkezetintegritás, károsodáselemzés, tribológia) is. Összeségében is kijelenthető, hogy az egyes szakmai műhelyek követik a területek megújuló kihívásait és ezt az ipari partnereink a közösen végzett szakmai tevékenységekkel elismerik. Talán ez az egyik legfontosabb küldetése az intézeti kollektívának, mindig egy kicsit bővíteni és alkotó módon alkalmazni az elődjeink által lefektetett ismeretanyagot.

A 2022-es Évkönyv, talán még abban az értelemben is kordokumentumnak tekinthető a jövőre nézve, hogy a szerzők között több külföldi kolléga neve szerepel. Ők az Intézetbe, a szélrózsa minden irányából (Azerbajdzsán, Brazília, Etiópia, Szíria) Miskolcra érkezett doktoranduszok, akiknek a kutatási cselekményeiből a témavezetők „tolmácsolásával” adunk áttekintést. A szerzők között van egykori indiai doktoranduszunk is, aki – a sikeres PhD védést követően – ma már oktató kollégánk. Mindezek talán jól mutatják, hogy az Egyetem nemzetköziesítési törekvései nem eredmény nélküliek. A szerzők között vannak olyan ipari szakemberek is, akik hosszabb-rövidebb egyetemi előzmények és pályafutás után, a napi munka mellett vállalták a tudományos előmenetel nem könnyű feladatainak a teljesítését. Az ilyen típusú kapcsolat, természetesen, az Intézet számára is hasznos, hiszen automatikusan kínálja a közvetlen ipari együttműködés lehetőségét, talán az átlagosnál egy kicsit szélesebb értelemben véve is.

Ahogy az előbbieken már említettem, a 2022-es Évkönyvvel egy sorozatot szeretnénk újtára indítani, bízva abban, hogy a sorozat egymást követő kötetei alapján, valamikor hagyományá alakul a kezdeményezésünk. Ezt az édes, ugyanakkor hasznos terhet hagyjuk a mindenkori kollektívára, ha november, akkor itt az ideje a soron következő évkönyv tartalmi megbeszélésének, és az évkönyvbe szánt anyagok elkészítésének a dátumát is ki kell tűzni. Remélem, hogy majdani követőink is a témák bőségének zavarában lesznek, mint ahogyan mi voltunk.

Végezetül, szeretnék köszönetet mondani minden egyes kollégámnak, akik a 2022-ben folytatott sokszínű és értékes szakmai munkát cikkek formájában megfogalmazták. Ezzel hozzájárultak ahhoz, hogy a 2022-es évkönyvünk szakmai színvonalában az egykori Mechanikai Technológiai Tanszék és jogutódja, az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet – benne a Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék és a Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék – hagyományaihoz méltó kiadvány születhessen.

Külön is szeretnék köszönetet mondani Prof. Dr. Lukács Jánosnak és Dr. Simon-Koncsik Zsuzsannának azért, hogy a szakmai lektorálás és az egységes formátumra szerkesztés sokszor hálátlan feladatát magukra vállalták.

Miskolc, 2022. december 12.

Dr. Lukács Zsolt
egyetemi docens, intézetigazgató

CSŐVÉG PEREMEZÉSI TECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSE

Lukács Zsolt

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: lukacs.zsolt@uni-miskolc.hu

Gál Gaszton

C. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metgalga@uni-miskolc.hu

Jemal Ebrahim Dessie

PhD. hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metjemal@uni-miskolc.hu

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Cikkünkben egy konkrét ipari K+F munka során kidolgozott csővég peremzési technológiai, számítógépi alkalmazásokkal támogatott fejlesztési folyamatát mutatjuk be. A kidolgozott technológiai segítségével olyan peremkialakítás jön létre képlékeny hidegalakítás segítségével, ami minimális forgácsolási ráhagyást tartalmaz. A peremzési technológiai annyiban különleges, hogy csővégek peremkialakítási módszerei nagyrészt a peremet a cső külső átmérő növelésével valósítja meg. Az általunk bemutatott technológiai megoldás ezzel ellentétben a cső belső átmérőjének csökkentésével valósítja meg a kívánt peremgeometriát.

Kulcsszavak: Csővég peremzése, CAPP folyamat, technológia fejlesztés

Abstract

In this paper, we present the computer-aided development process of a pipe-end flanging technology to be developed in a specific industrial R&D project. The developed technology produces a flanging with cold forming with minimal machining allowance. The most pipe end flanging is achieved by increasing the outside diameter of the pipe. In contrast, the technology we present here achieves the desired flange geometry by reducing the internal diameter of the pipe.

Keywords: Flanging of pipe-end, CAPP method, Process Planning

1. Bevezetés

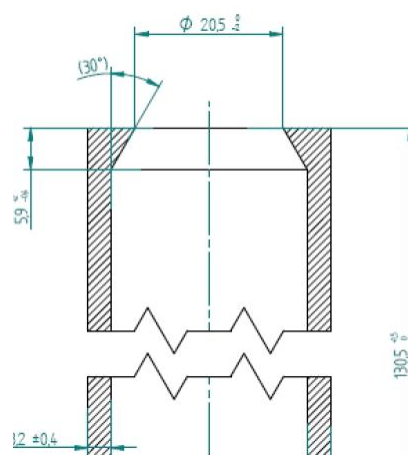
A hideg képlékenyalakítás területén a technológiai- és szerszámtervezés folyamatát alapvetően változtatta meg a célterületre fókuszáló numerikus modellező szoftverek megjelenése. A korábban a szakmai tapasztalatokra, megérzésekre épülő „próbálgass és korrigálj” elv alapján készült technológiai tervezés során, az esetleges tervezési hibák költségvonzatának minimalizálására, az egyes technológiai lépéseket fizikai térben un. provizórikus szerszámokkal modellezték. Ha ezekkel az ideiglenes szerszámokkal egy technológiai elképzelés sikeresen megvalósult akkor elkészültek a sorozatgyártást is lehetővé tevő végleges szerszámok.

A kipróbálható technológiai változatokban azonban még így is önmérsékletet kellett tanúsítani, mivel az ideiglenes szerszámok előállításuk is idő- és költség növekedést okozott. Ebben a cikkben a számítógépi szoftverekkel történő szerszámtervezés egy megvalósult K+F fejlesztés esettanulmányát mutatjuk be, részletezve, hogy a tervezési elgondolások virtuális térben történő ellenőrzése mennyivel idő- és költséghatékonyabbá teheti a képlékenyalakítási technológiai tervezését.

2. Gyártandó munkadarab elemzése

A megrendelő által gyártani tervezett csővégkialakítás forgácsolási műveletek utáni geometriáját az 1. ábra mutatja. A technológiai tervezés első lépésében az un. technológiai ráhagyásokkal ellátott képlékenyalakított előgyártmányt kell meghatározni, mivel az 1. ábra alapján az is megállapítható, hogy a sarkos peremkontúrok a hidegalakítási technológia szempontjából nem optimálisak, leginkább azért, mert az ilyen éles (lekerekítetlen) sarkos részletek hidegen való sajtolása – acélok esetén – csak igen nagy alakító nyomással valósíthatók meg (Billigmann et al., 1977).

Az ezen szempontrendszer figyelembevételével kialakított, hidegalakított előgyártmányról elmondható, hogy az alakítással beperemezett csomópontokat e miatt, utólag forgácsolással is meg kell munkálni. Ennek következménye, hogy a külső átmérőn látható sarok is lekerekítéssel készíthető, ami az alakíthatóság szempontjából kedvező.



1. ábra. Csővégperem geometriai kialakítása.

Az alkatrész anyagminősége P235TR1 melegen hengerelt varratnélküli ötvöztelen acélcső. Az acélcső a gyártói műbizonylat alapján lágyított állapotú. A lágyított állapot a hidegalakítás szempontjából előnyös, de a tervezett peremzés szempontjából a peremzés során a csőfalban fellépő mechanikai feszültségek viszonylag alacsony megengedhető értéke miatt nem tekinthető optimális anyagválasztásnak.

3. A numerikus modellezés felépítése, kiértékelése

Képlékenyalakítási folyamatok numerikus modellezéséhez az alapvető mechanikai mérőszámok mellett, mint az egyezményes folyáshatár ($R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$) Young-féle rugalmassági modulus ($E_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$) és a Poisson tényező ($\nu = 0,3$) a képlékeny hidegalakítás hatására bekövetkező alakítási keményedést leíró un. folyási görbe megadása a legfontosabb bemeneti adat. A folyási görbe alakítástechnológiában egyik elterjedt matematikai leírása az un. Swift-közelítés (Dixit et al., 2008). Ennek matematikai alakja és a közelítés anyagparamétereinek számszerű értékei a következők a vizsgált acélminőség tekintetében.

$$\sigma = C(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^m \quad (1)$$

ahol,

ε_p a mindenkori képlékeny alakváltozás mértéke,

ε_0 az alakváltozás megindulásához tartozó valódi alakváltozás, ($\varepsilon_0 = 0,006$),

C a keményedési együttható ($C = 780 \text{ MPa}$),

m a keményedési kitevő ($m = 0,23$).

Ezen anyagi viselkedést leíró bemeneti adatok után az egyes alakítási műveletekben tervezett aktív, alakadó szerszámgeometriák és azok kinematikai viszonyainak megadása szükséges és így az adott alakítási lépés lemodellezhető.

A modellezési eredmények elemzésének alapja, hogy a cső megtámasztás nélküli, szabadon álló falában a peremzési művelet alatt fellépő valódi feszültség, ne érje el a folyáshatár értékét.

4. Technológiai változatok tervezése, elemzése

A csőcsonk gyártásának lehetséges technológiai változatainak tervezésekor a következő szempontrendszer tartottuk szem előtt:

- Megtervezünk egy elképzelt alakítási módot: a szerszámok alakját, méreteit, mozgását,
- Az elképzelt alakítási folyamatot, a megtervezett szerszámozás felhasználva, számítógépi modellezéssel vizsgáljuk,
- A számítógépes modellezés eredményét a már ismertett szempontrendszer szerint kielemezzük,

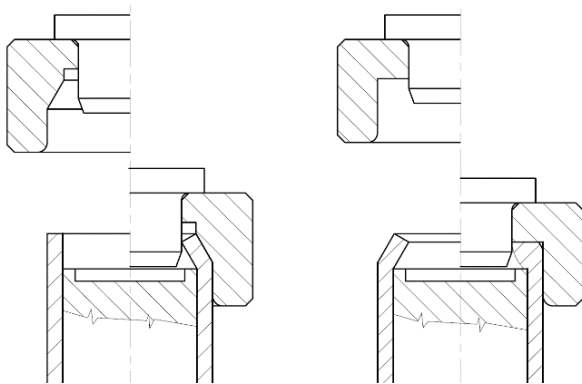
- Az alakítási folyamat vizsgálata során feltárt alakítási hibák okait elemezve célszerűen módosítjuk a peremalakítás módját, azaz az aktív szerszámok alakját, a szerszámok elrendezését, műveletek számát és újabb számítógépes modellezéssel vizsgáljuk a módosított alakítási folyamatot.

A lehetséges alakítási módok meghatározásakor több technológiai szempontra kell tekintettel lenni:

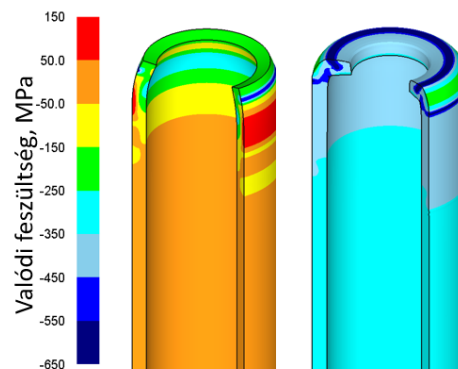
- A Megrendelő igénye alapján csak hidegalakítási eljárások jöhetnek szóba a peremezéshez;
- A peremezett csőcsonk alakítás után forgácsoló megmunkálásra kerül (a menet elkészítése okán), ezért ráhagyásokkal lehet a peremezést alakítani;
- Az éves gyártandó darabszámot figyelembe véve csak sajtológépre telepíthető eljárások felelhetnek meg;
- A lehető legkevesebb alakító művelettel kell elérni a kívánt peremezést;
- A technológiát az adott cső előgyártmány speciális jellemzőit, mérettűréseit figyelembe véve kell kidolgozni.

4.1 Első technológiai változat – két lépésben, belső tűskével

A lehetséges csővég peremezési módszerek közül az először a 2. ábrán látható, legegyszerűbb peremezési elvet vizsgáljuk meg. Első lépésben a csőszáját 30 fokos kúppal szűkítjük a felsőtüske méretéig, majd második lépésként megkíséreljük a behúzott csőrészt zömíteni olyan módon, hogy a zömítőerő egy részét a csőbe helyezett belső tűske sarkos homloklapfelülete vegye fel.



2. ábra. Kétlépéses csőperemezés, legegyszerűbb peremezési elv alapján.



3. ábra. Valódi feszültség eloszlása a csőfalban kétlépéses peremalakítás során.

Az első alakító művelet számítógépes szimulációt elvégezve, az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a cső szájának behúzásakor, a cső falában nem lép fel a folyási határt meghaladó feszültség, ezért az első csőszűkítési művelet végrehajtható.

A második műveletben, a zömítési alakítási folyamat során viszont, számítógépes szimuláció szerint, már a zömítés kezdetén a cső teljes hosszában megzömül, mivel a belső tűske éle az alakítóerőnek csak egy kis részét veszi fel. Ezért a 2. ábra szerinti alakítási változat nem alkalmas a csővég peremezésére.

4.2 Második technológiai változat – két lépésben, kúpos belső tűskével

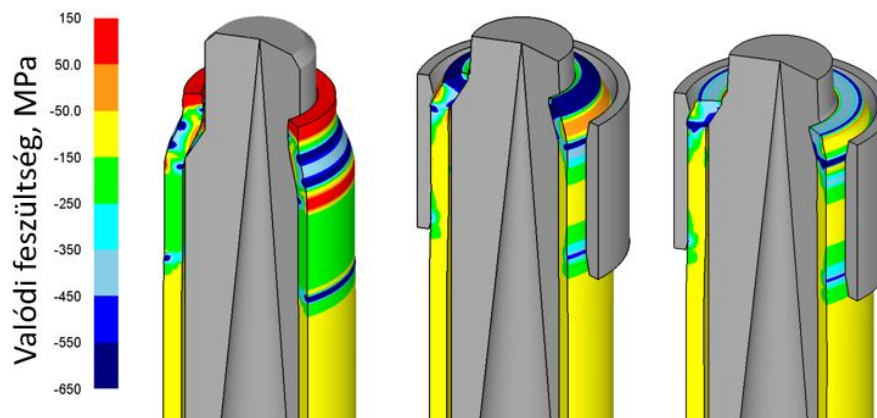
Az előző peremezési módszernél tapasztalt alakítási hibának elkerülésére a csőben kúpos belső tűskét használunk, azt feltételezve, hogy a zömítés kezdetekor a tűske kúpos részére nyomódik a cső anyaga, és a kúpon fellépő súrlódás révén a zömítőerő nagyobb részét fogja felvenni a belső tűske.

A művelet számítógépes szimulációját elemezve megállapítottuk, hogy a csőszáj szűkítése ennél a módszernél is gond nélkül végrehajtható. A második műveletben a szimuláció alapján, a zömítőszerszám először a kúpos tűskére nyomja a behúzott csővég anyagát, ahol a fellépő súrlódás ellenére elcsúszik az anyag. A kúpos tűskén elmozduló cső anyaga a zömítőszerszám hengeres falára nyomódik. Ez a szerszámfelület az axiális mozgása miatt a cső alakítani nem kívánt részére adja át az erőt, aminek következtében az egész cső megzömül.

A tűske kúpos felületének alkalmas (fűrészfogszerű) hornyolásával valószínűleg lehetne valamennyit javítani az alakváltozás folyamatán. A kúpos felület hornyolása a gyakorlati alkalmazás során, az elszennyeződés miatt, (a cső belső felülete revés lehet) nem jelentene megbízható megoldást a cső zömülésének elkerülésére, ezért ezt a technológiai változatot is elvettettük.

4.3 Harmadik technológiai változat – három lépésben, kúpos belső tűskével

Az előző alfejezetben vizsgált peremezési módszernél tapasztalt alakítási hibát elősajtolási művelet használatával próbáljuk kiküszöbölni. Ennek a peremezési módnak az az alap gondolata, hogy a csőszáj behúzását követően egy 60 fokos kúppal a kúpos tűskére elősajtoljuk a peremezendő anyagrészt úgy, hogy az anyag nagyobb felületen súrlódjon a kúpos tűskén. Ennek meg kellene gátolhatni, hogy a készre sajtolásnál az anyag a kúpos tűskén elcsússzon, amivel elkerülhető lenne a cső zömülése.



4. ábra. Valódi feszültség eloszlása a harmadik technológiai változat egyes alakítási lépéseinek végén.

A numerikus modellezés alapján kijelenthető, hogy a csőszáj behúzása végrehajtható. Az első, 60 fokos szerszámmal való előzömítésnél már jelentős külső átmérő növekedés jött létre, ami a készre zömítésnél is további átmérőváltozást okoz. Ennek ellenére az előgyártmány alsó részén ébredő nyomófeszültség nem éri el a zömülést okozó folyáshatár nagyságát.

A kalibráló gyűrű pozíciójának meghatározó szerepe van a cső külső átmérőjének alakváltozása szempontjából. Ha túlságosan közel helyeztük el a gyűrűt a peremezési zónához, akkor a csőben zömülést okozó mértékig növekedett a nyomófeszültség. Ha a kalibráló gyűrűt távolabb helyeztük el a peremezési zónától, akkor a zömítéssel a külsőátmérő növekedését lehetett elérni.

Összefoglalva: a számítógépes szimulációk alapján megállapítható, hogy a csőalapanyag névleges méretei esetén a csőcsonk peremezése a 4. ábra feszültségeloszlása alapján ez a technológiai változat megvalósítható.

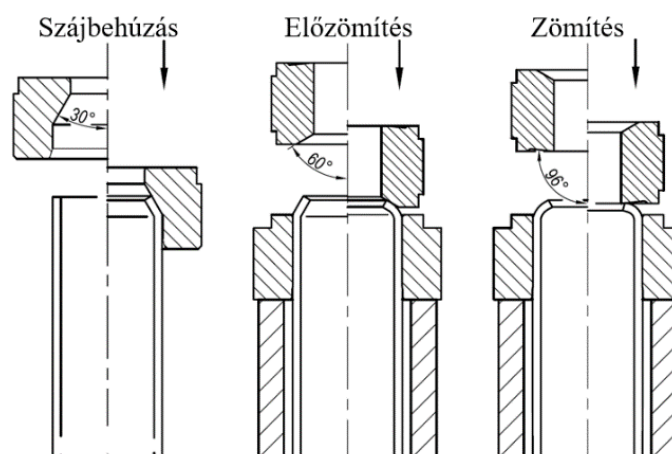
A kísérleti gyártástervezés során nyilvánvalóvá vált számunkra, hogy a peremezésre kifejlesztett alakítási technológia bár működőképes, de üzemi körülmények közötti alkalmazása, meglehetősen bonyolult alakító célgép tervezését, illetve legyártását teszi szükségessé. Figyelembe véve a gyártandó csőcsonkok éves darabszámát, ezzel a technológiával valószínűleg nem lesz gazdaságos a gyártás.

Ezt követően a Megrendelő azt kérte, hogy újabb peremezési technológiát dolgozzunk ki, amelynél nem használunk belső tüskét, így bár nagyobb deformációra számíthatunk, de ennek ellenére olyan előgyártmány peremalak is megfelelhet, amely végsősoron a forgácsolás után a csőperem felhasználásával összefüggő funkciókat biztosítja.

4.4 Belső tüske nélküli technológiai változat

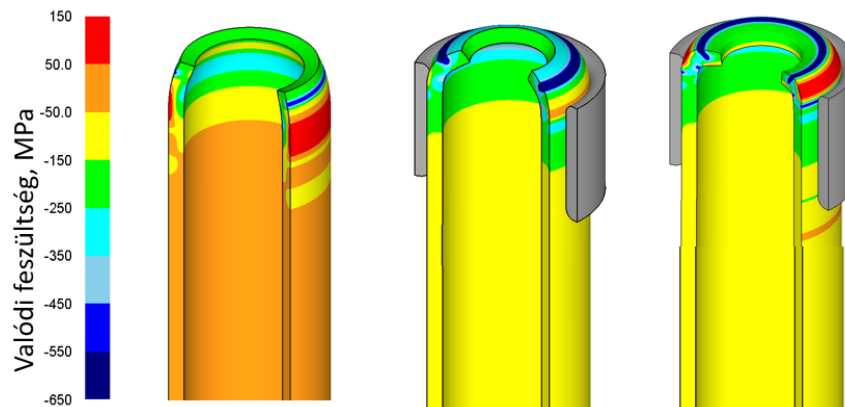
Ennél a módszernél lényegében a peremet a cső végén a cső falának több fokozatban való behajlításával hozzuk létre. A belső tüske használat nélkül való peremezés tervezett alakítási műveleteit az 5. ábrán láthatjuk. A peremezés lépései a következők:

- Az első lépésben 30 fokos kúpos szerszámmal szájbehúzást végzünk;
- A csőcsonkra támasztógyűrűt húzunk fel, hogy elkerüljük az alakításokkal járó átmérő növekedést;
- A második lépésben, 60 fokos szerszámmal tovább szűkítjük a behúzott csővéget;
- A harmadik lépésben, 96 fokos szerszámmal végezzük a készre alakítást.



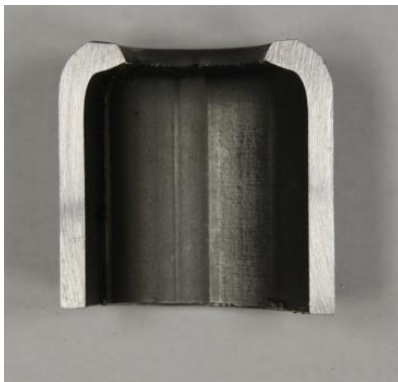
5. ábra. Három lépéses belső tüske nélküli technológiai változat.

Mindhárom alakítási lépés modellezési eredményeinek ismeretében (6. ábra) kijelenthető, hogy egyik alakítási lépésnél sem lépi túl a csőfalban ébredő valódi feszültség értéke a folyáshatárhoz tartozó 200 MPa feszültség értéket. Ezért kijelenthető, hogy a belső tüske nélküli három lépéses technológiai változat a tervezés kiinduló feltételeit maradéktalanul teljesíti.

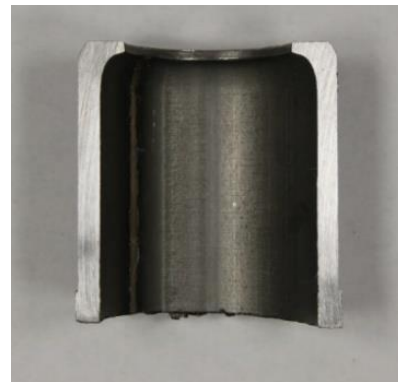


6. ábra. Valódi feszültség eloszlása a csőfal mentén a három lépéses belső tüske nélküli technológiai változatnál.

A technológiai változat véglegesítése után elkészítettük a szerszámok rajzait és a szerszámok legyártásra kerültek. A legyártott szerszámokkal kísérleti alakításokat végeztünk. A 7. ábra a fizikai kísérleti alakítások után mutatja a hidegen alakított előgyártmányt, a méret és alakhelyesség ellenőrzése miatt kettévágott állapotában.



7. ábra. Hidegen alakított előgyártmány metszete a kísérleti gyártást követően.



8. ábra. Csővégperem a forgácsolási műveletet követően.

A 8. ábrán a munkadarab kész alakja látható a peremalakítást követő forgácsolási művelet után.

5. Összefoglalás

Ebben a publikációban a számítógéppel segített technológia- és szerszámtervezés egy esettanulmányát mutattuk be konkrét ipari K+F fejlesztési folyamaton keresztül. Napjaink fejlett számítógépi környezete az adott mérnöki tevékenység támogatására fókuszáló szoftverekkel kiegészülve idő- és költséghatékonyan valósítja meg a technológia- és szerszámtervezés több iterációs hurokkal megvalósuló folyamatát.

Az intézetünk ebben a folyamatban szinte a szoftverek megjelenésével egyidőben fejt ki kutatótevékenységet, így az évtizedek alatt felhalmozott tapasztalatait sikeresen kamatoztatja ipari környezetben is.

Irodalom

- [1] Billigmann, J., Feldmann, H.-D. (1977). *Sajtolás és zömítés*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [2] Dixit, M. P., Dixit, S. U. (2008). *Modeling of Metal Forming and Machining Processes*. Springer-Verlag London.

EN AW 5754 ALUMÍNIUMÖTVÖZET KLINCS KÖTÉSEINEK MECHANIKAI VIZSGÁLATAI

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metluk@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A közlemény célja két azonos vastagságú lemez klincseléssel való egyesítési lehetőségének a tanulmányozása volt. A kötési szilárdság ellenőrzéséhez kísérleti vizsgálatokat végeztünk, EN AW-5754 alumíniumötvözetben, a lemezek összes csatlakoztatott vastagsága 2 mm volt. A kötések a Miskolci Egyetemen, TOX klincselő szerzővel gyártottak. A kötések mechanikai szilárdsági szempontból legfontosabb paraméterei a nyakvastagság és az alámetszés, amelyek mellett az egyetlen mérhető érték a fenékvastagság, amelyeket elemeztünk. A kötések keresztmetszetét optikai mikroszkópos vizsgálatokkal tanulmányoztuk és megállapítottuk az optimális fenékvastagság értékét. A létrehozott kötések nagy ciklusú fárasztóvizsgálatokat végeztünk, amelyek igazolták a kötések teherbíró képességét.

Kulcsszavak: EN AW 5754, lemezegyesítés, klincselés, nyíró-szakító vizsgálat, fárasztóvizsgálat

Abstract

The aim of the study is to learn about the possibilities of joining two sheets of the same thickness. The geometrical parameters significantly determine the strength of the joint. Tests were carried out to check the joint strength, on EN AW-5754 aluminum alloy, the total connected thickness of the sheets was 2 mm. The joints were performed at the University of Miskolc with a TOX clinching tool. The most important parameters of the joints from the point of view of mechanical strength are the neck thickness and the undercut, besides which the only measurable parameter, which we analyzed, is the bottom thickness. The cross-section of the joints was analyzed by optical microscope. The clinched joints were tested with high cycle fatigue investigations and demonstrated their bearing capacity.

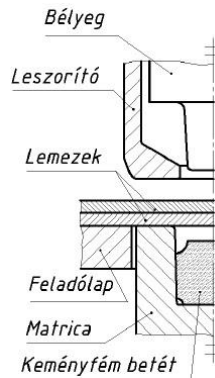
Keywords: EN AW 5754, joining of sheets, clinching, tensile-shear test, high cycle fatigue test

1. Bevezetés

A gépészeti szerkezet helyes és megbízható működését döntően befolyásolják az egyes szerkezeti elemeinek kötései. Kiválasztásuknál és kialakításuknál elsősorban a szerkezet funkciója a meghatározó. Ezenkívül figyelembe kell venni a kötésekkel szemben támasztott követelményeket: a kötés szilárdságát, alakváltozó képességét, tömítését, mozgathatóságát, szerelhetőségét, lazulás elleni biztonságát, valamint a kivitelezhetőséget, a gazdaságosságot és a dizájnt. A járműiparban alkalmazott

lemezanyagok skálája nagyon széles: a gyártók az adott célnak, rendeltetésnek legmegfelelőbb anyagokat széles anyagminőség palettából választhatják meg, és az is gyakori, hogy egy szerkezeti elemen belül többféle anyagú, eltérő vastagságú és tulajdonságú lemezt alkalmaznak. Azonban ezeket a lemezeket valamilyen módon egyesíteni kell a megfelelő végső termék kialakítása érdekében.

A finomlemezek egyesítésére számos eljárás használatos, mi a klincselés technológiáját alkalmaztuk, amely napjainkban egy elterjedt korszerű eljárás a sajtoló kötések csoportjában (1. ábra).



1. ábra. A klincs kötés létrehozása során használt elemek.

A klasszikus klincs technológia megvalósítása során két lemezt egyesítenek egy pontszerű kötés formájában. Lényege, hogy a két lemezt egy speciális, erre a célra kialakított bélyeg – matrica párral egymásba sajtolják, valamilyen szerszám, vagy présgép segítségével.

2. EN AW 5754 alumínium ötvözet kötéseinek vizsgálata

2.1 A vizsgált alapanyag jellegzetességei

A cikkben alumínium lemezek egyesítésével foglalkozunk, mert az alacsony tömeg és a viszonylag nagy szilárdság miatt egyre növekszik a felhasználásuk az autókarosszéria gyártásban.

Mivel számos alumíniumötvözet létezik, ezért egy jellemző alapanyagot választottunk az alakítható ötvözetek csoportjából (EN AW 5754). Az 5xxx csoportba tartozó ötvözetek nem nemesíthető ötvözetek, a keménység és a szilárdság növelését hidegalakítással érik el. Az ötvözetek szilárdságát a szilárdoldatban lévő Mg biztosítja, amely növeli a korrózióval szembeni ellenállását is. Jellemzően az 5xxx csoportban 0,5-7% közötti a Mg ötvözöttség. Az adott ötvözet folyáshatárát tovább lehet növelni Mn adagolással, Cr ötvözéssel pedig a finomabb szemcsés szövetszerkezetet lehet elérni.

Az 1. táblázatban a kísérleteknél használt alapanyag kémiai összetétele, a 2. táblázatban pedig a mechanikai tulajdonságai láthatók. A mechanikai tulajdonságokat saját méréssel határoztuk meg.

1. táblázat. EN AW 5754 alumínium ötvözet kémiai összetétele [tömeg%].

Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Zn	Ti	Al
0,195	0,35	0,04	0,305	0,035	2,85	0,02	0,015	maradék

2. táblázat. EN AW 5754 alumínium ötvözet mechanikai tulajdonságai.

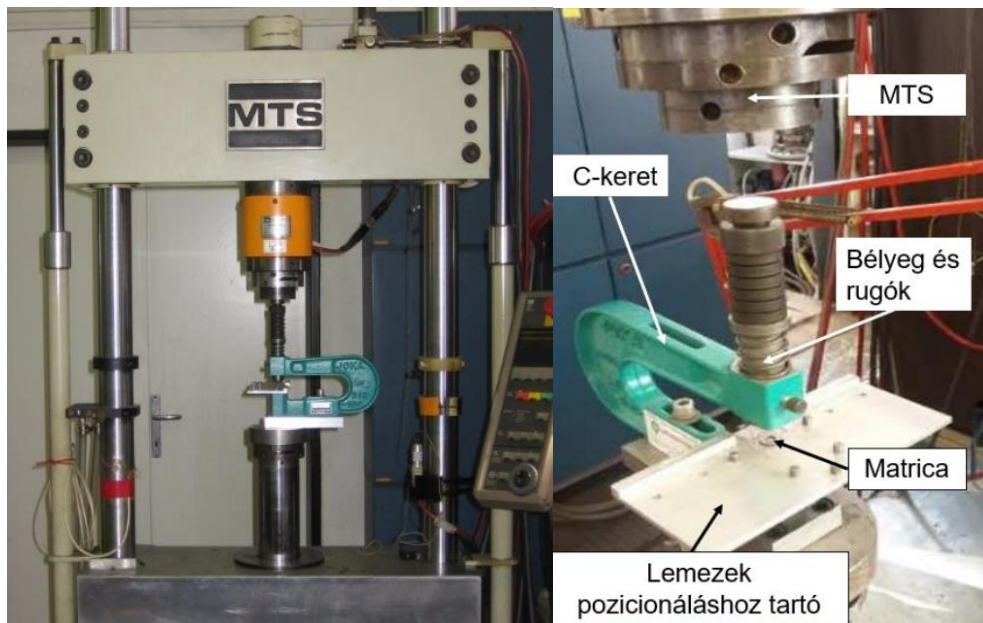
$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]
180	237	16

Az EN AW 5754 alumínium ötvözet közepes szilárdságú, nem keményíthető, nagyon jó korrózióállóságú, a tengervíznek és a trópusi körülményeknek jól ellenálló, valamint jellemzően nagyon jó vegyszerállóságú anyag. A hegesztése bármilyen módszerrel problémamentesen elvégezhető, a hegesztési varratok szinte az alapanyaggal azonos korrózióállósággal rendelkeznek. Nagyon jó az anyag polírozhatósága. Képlékenysége lágy állapotban nagyon jó, félkemény állapotban megfelelő. Közepesen igénybe vett hegesztett alkatrészekhez és konstrukciókhoz használható. Az élelmiszer- és a vegyiparban használatos, de járművek és hajók gyártásában, valamint kül- és beltéri építészeti elemeknél is alkalmazzák. Tipikus termékek: csövek, folyadéktároló edények, teherhordó konstrukciók, hőcserélők, védőburkolatok, mezőgazdasági, textil és feldolgozóipari gépek, járművek, hajók alkatrészei, tartályalkatrészek.

2.2 Az optimális kötés kialakítása

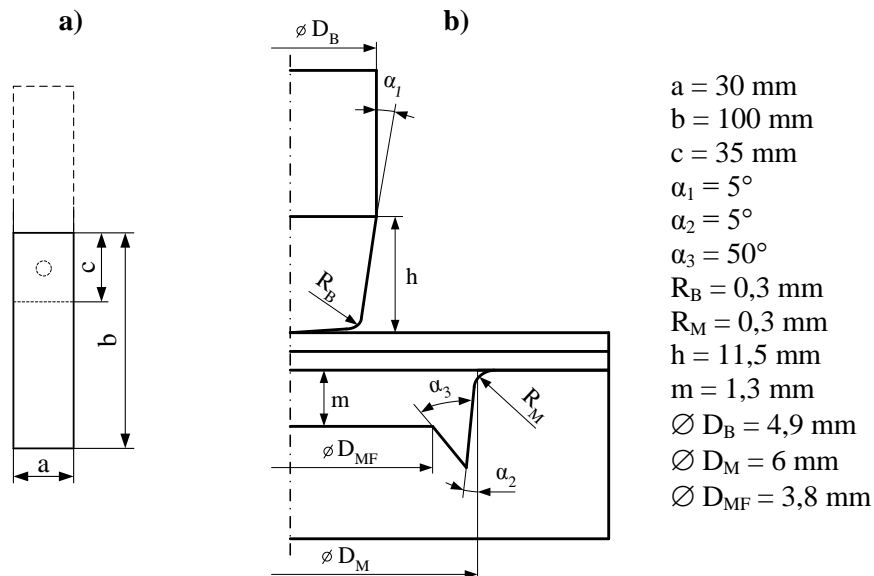
Ahhoz, hogy egy gyártási folyamat elkezdődhessen, költséges vizsgálatokat kell elvégezni, és ahhoz, hogy az adott alkalmazáshoz a megfelelő szerszám együttest kiválaszthassuk, több kötést is el kell készítenünk, változó szerszámgeometriákkal. A kötések statikus és dinamikus terhelésekkel is tesztelik. A vizsgálatok megegyeznek a ponthegeesztett kötések roncsolásos vizsgálataival, amelyek közül a nyíró-szakító vizsgálatokat alkalmaztuk.

A vizsgált kötések MTS gyártmányú, elektro-hidraulikus, számítógép vezérlésű, univerzális anyagvizsgáló berendezésen készítettük el. A berendezés maximális nyomóereje $F_{\max} = 250 \text{ kN}$. A berendezést – a terhelő keretre felszerelt klincselő szerszámmal együtt – a 2. ábra mutatja.



2. ábra. MTS gyártmányú, 250 kN méréshatárú elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezés a klincselő szerszámmal.

A kötéshez használt próbatest elemeket lézeres vágással munkáltuk ki. A próbatest geometriáját a 3. ábra a) részlete, a kötésnél alkalmazott szerszám paramétereit pedig a 3. ábra b) részlete mutatja.

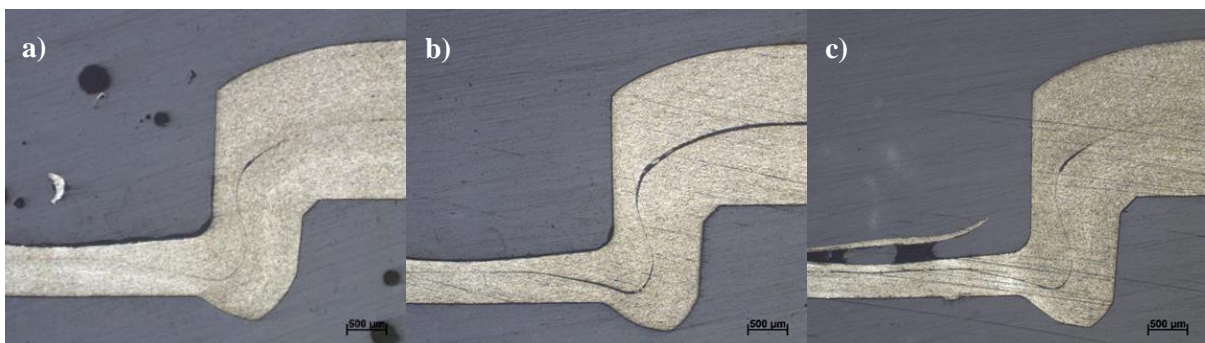


3. ábra. A próbatest geometriája és a klincselő szerszám kialakítása.

Ezen vizsgálatokkal párhuzamosan, tengelymetszetes makrocsiszolatokon mérik a nyakszélességet, és az alámetszést, vizsgálva a geometriai jellemzők hatását a kötés szilárdságára. A technológiai folyamat megismeréséhez létrehozott próbatest-sorozaton lehetőség van a technológiai paraméterek meghatározására, mint például a fenékvastagág, az alámetszés, a nyakvastagság lemérése az egyes alakítási lépésekben. A továbbiakban a fenékvastagság megváltozásának a hatását vizsgáltuk meg a kötés szilárdsági tulajdonságaira nézve.

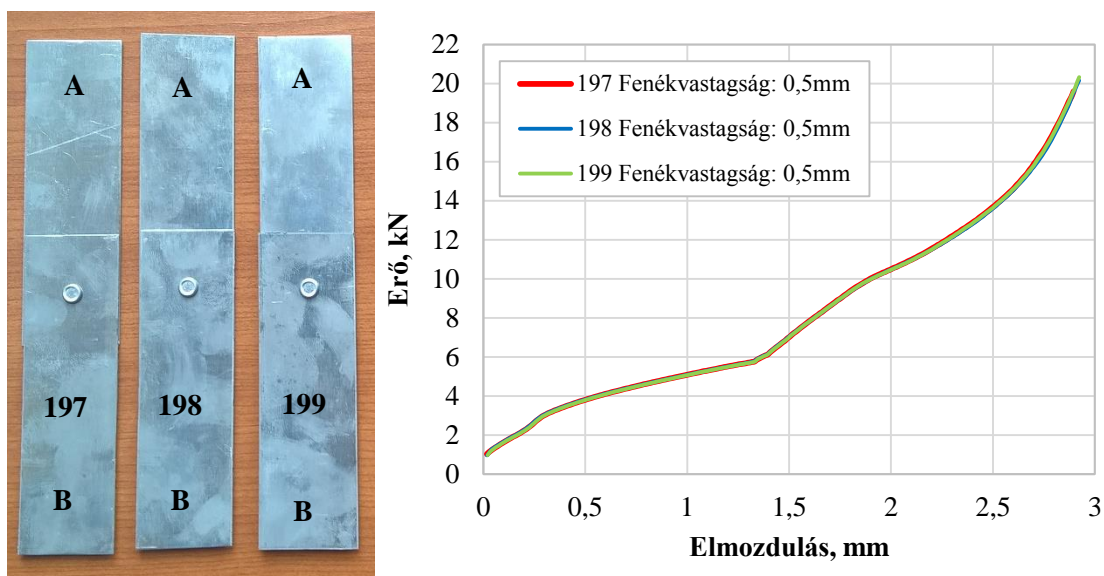
A kísérletek során több kötés készült különböző fenékvastagságokkal, tekintettel arra, hogy a rendelkezésre álló TOX szerszámot eredetileg DP600-as acélminőségű lemezre fejlesztették ki. Az általunk használt alumínium lemezekhez meg kellett tehát határozni az optimális fenékvastagságot.

Három fenékvastagsággal készültek kötések, $s_{\text{fenék}}=0,4 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm}$ és $0,6 \text{ mm}$. Mivel a kötések hibamentesek voltak, ezért a további kísérleteket ezekkel az előre meghatározott értékekkel végeztük. A különböző fenékvastagsággal létrehozott kötések mikroszkópi képeit a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A klincselő kötések mikroszkópi képei különböző a) $0,6 \text{ mm}$, b) $0,5 \text{ mm}$, c) $0,4 \text{ mm}$ -es fenékvastagságoknál.

Minden fenékvastagsághoz három-három kötést készítettünk, a 0,5 mm-es fenékvastagságú nyíró-szakító próbatestek, valamint a kötések klincselése során kapott erő-elmozdulás görbék – példaként – az 5. ábrán láthatók.



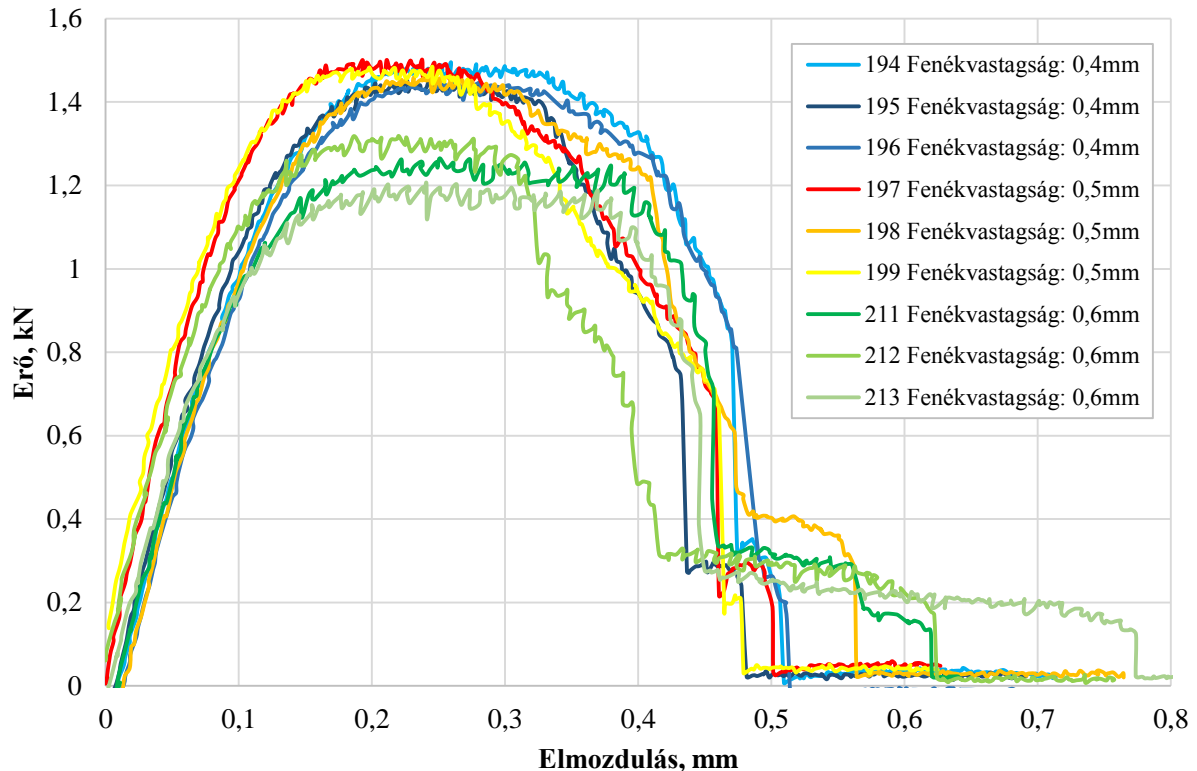
5. ábra. A klincselte kötések és az erő-elmozdulás görbék a 0,5 mm-es fenékvastagságnál.

A nyíró-szakító vizsgálatokra ugyanazon a berendezésen került sor, amelyen a kötések készültek. A vizsgálatok során a hajlító hatások kiküszöbölésére kiegészítő lapokat használtunk. A maximális alakító erőt (F_{\max}) és a maximális nyíró-szakító értékeket (T_{\max}) a 3. táblázat tartalmazza a vizsgált kötésekre vonatkozóan. A mért nyíró-szakító (T_{\max}) értékek explicit kapcsolatot mutatnak a fenék vastagsága és a kötések szilárdsága között.

3. táblázat. Az alakító erők és a szakítóvizsgálatok eredményei 0,6 mm-es, 0,5 mm-es és 0,4 mm-es fenékvastagságokra.

A próbatest jele	s_A [mm]	s_B [mm]	$s_{\text{fenék}}$ [mm]	F_{\max} [N]	$F_{\max, \text{átl.}}$ [N]	T_{\max} [N]	$T_{\max, \text{átl.}}$ [N]
211	0,99	0,99	0,59	19832	20168	1265	1270
212	0,99	0,99	0,60	20223		1331	
213	0,99	0,98	0,60	20449		1215	
197	0,98	0,99	0,52	23094	22839	1501	1484
198	0,99	0,99	0,50	22905		1463	
199	0,98	0,98	0,50	22518		1489	
194	0,99	0,98	0,41	23878	24122	1498	1469
195	0,98	0,98	0,41	23901		1460	
196	0,98	0,99	0,41	24588		1450	

A nyíró-szakító vizsgálatok erő-elmozdulás görbéit a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. A nyíró-szakító vizsgálatok erő-elmozdulás diagramjai különböző fenékvastagságok esetén.

Az eredmények alapján megalapítható, hogy a legjobb kötést a 0,5 mm-es fenékvastagságnál valósíthatjuk meg. Megjegyezzük egyúttal, hogy a kötés létrehozásakor fellépő alakítási erőt és ezáltal a lemezbe bevitt alakítás mértékét figyelembe véve a szilárdsági jellemzők változása (javulása) nem számottevő. Összességében a 0,5 mm-es fenékvastagságú kötés megfelelőnek bizonyul.

2.3 Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokra a JSME S 002 (Anon., 1981) előírásban megfogalmazottak (Nakazawa et al., 1987) szellemében, MTS 810 gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszeren került sor. A vezérlési mód állandó terhelésamplitúdójú, a terhelés aszimmetria tényező pedig a teljes vizsgálatsorozatban állandó értékű, $R = 0,1$ volt. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten, laboratóriumi közegben és szinusz alakú terhelési függvénnyel végeztük. A terhelési frekvencia $f = 30$ Hz volt.

A vizsgálatok első fázisában nem alkalmaztunk a próbatesteken alátámasztást (kiegészítő lapokat), a második fázisban azonban, annak befolyásoló hatása feltárásának az érdekében, már alátámasztással készült próbatesteket vizsgáltunk. A vizsgálatok terhelési adatait és eredményeit – azok elvégzésének a sorrendjében – a 4. és az 5. táblázatok foglalják össze.

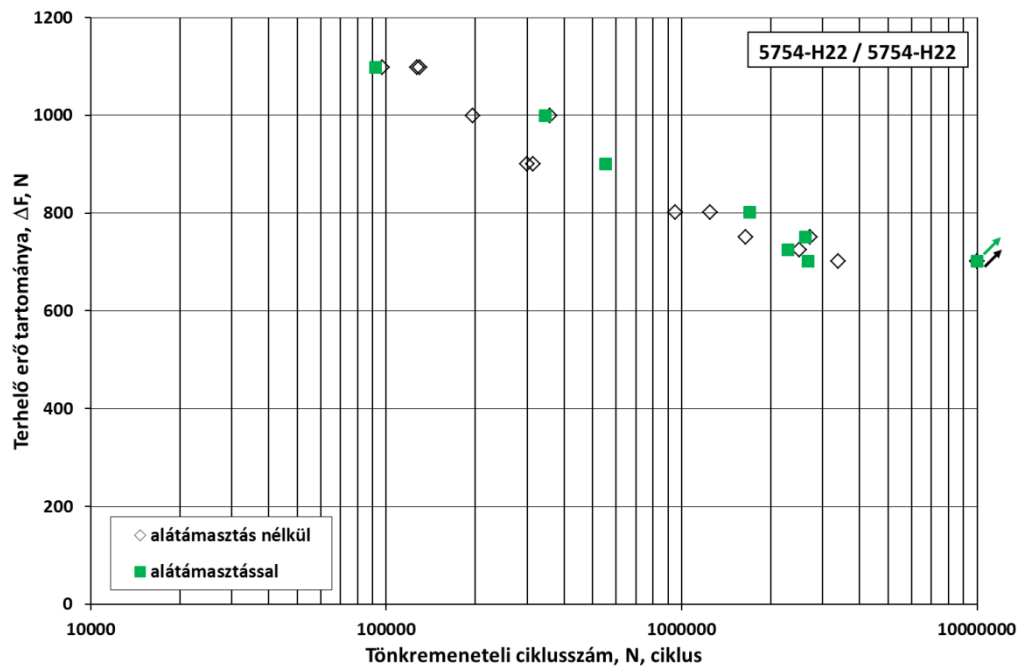
4. táblázat Az alátámasztás (kiegészítő lapok) nélkül elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok terhelési adatai és eredményei.

A próbatest jele	F_{\max} [N]	F_{\min} [N]	ΔF [N]	N [ciklus]
225	1000	100	900	300020
228	1110	111	999	358451
229	890	89	801	951044
231	1000	100	900	313633
234	890	89	801	1248996
235	780	78	702	3394934
237	1110	111	999	195899
239	1220	122	1098	129542
244	1220	122	1098	127497
288	1220	122	1098	96928
289	780	78	702	10000000
290	835	84	752	1649157
291	835	84	752	2726115
292	805	81	725	2501858

5. táblázat Az alátámasztással (kiegészítő lapokkal) elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok terhelési adatai és eredményei.

A próbatest jele	F_{\max} [N]	F_{\min} [N]	ΔF [N]	N [ciklus]
294	1000	100	900	553571
297	890	89	801	1696326
299	1110	111	999	344541
300	835	84	752	2622403
301	805	81	725	2292269
302	780	78	702	2672195
303	780	78	702	10000000
304	1220	122	1098	92163

A 7. ábra bemutatja a fárasztóvizsgálatok eredményeit, ahol a ferde nyilakkal megjelölt adatok olyan próbatestek adatai, amelyek a 10 000 000 ciklus eléréséig nem károsodtak (túlélő próbatestek).



7. ábra A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei.

3. Összefoglalás

Az alumíniumötvözetek növekvő mennyisége a karosszéria gyártásban nemcsak azt a kérdést veti fel, hogy hogyan lehet ilyen anyagokból alkatrészeket előállítani, hanem azt is, hogy hogyan lehet ezeket az alkatrészeket összekapcsolni. A kutató munka során EN AW 5754 jelű anyagon készült klincselte kötések vizsgálatait végeztük.

A vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy a rendelkezésre álló TOX szerszám szilárdsági szempontból 0,5 mm-es fenékvastagsággal készíti a legjobb kötések. A szokásos kötések minősítő vizsgálatok mellett nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat is végeztünk. A fárasztóvizsgálatok eredményei megbízható vizsgálatokról tanúskodnak és igazolják, hogy a vizsgálatok során alkalmazott alátámasztás nincs szignifikáns hatással az ismétlődő igénybevétel szembeni ellenállásra.

Irodalom

- [1] <https://langtool.hu/termek/tox-technologiak/tox-kotestechologia/>
- [2] Tisza, M., Gál G., Kiss A., Kovács, P. Z., Lukács, Zs. (2013). Alakítható nagyszilárdságú lemezanyagok klincs kötése. *Multidiszciplináris Tudományok*, 4(1), 49-58. <http://orcid.org/0000-0003-2651-642X>
- [3] <https://alucut.hu/index.php>
- [4] Anon. (1981). JSME S 002: *Standard Method of Statistical Fatigue Testing*.
- [5] Nakazawa, H., Kodama, S. (1987). Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. In T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa (Eds.), *M. Statistical research on fatigue and fracture. Current Japanese materials research – Vol. 2.* (1st ed., pp. 59-69). Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan.

TOVÁBBFEJLESZTETT COULOMB-FÉLE SÚRLÓDÁSI MODELL ANYAGPARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA

Lukács Zsolt

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: lukacs.zsolt@uni-miskolc.hu

Gál Gaszton

C. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metgalga@uni-miskolc.hu

Lucas Alexander De Carvalho

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: de.carvalho.lucas.alexandre@sudent.uni-miskolc.hu

Absztrakt

A lemezalkatrészek alakítási modellezésének fejlődése ma már olyan szinten jár, hogy segítségével kedvezőbb anyag- és költséghatékony technológiai változatok dolgozhatók ki. A gyártási paraméterek egyre szűkebb tartományban szórhatnak és ennek eredménye, hogy az ún. technológiai ablakok egyre inkább szűkülnek. E kihívások azonban a technológia fejlesztés szempontjából a múltban másod vagy harmadlagos bemeneti paraméterektől is egyre nagyobb pontosságot követelnek meg. A lemezalakítás tribológiai rendszerének viselkedése napjainkban már nem írható le maradéktalanul a sokáig alkalmazott Coulomb-féle súrlódási modellel. Ezért ennek továbbfejlesztése és az új modellek anyagparamétereinek fizikai mérésekre alapozott meghatározása egyre inkább előtérbe kerül az autóiipari lemezalakítás modellezésében. Cikkünk áttekinti az ún. továbbfejlesztett Coulomb-modell anyagparamétereit és bemutat egy lehetséges mérőkészülék konstrukciót a paraméterek fizikai mérésre alapozott meghatározására.

Kulcsszavak: *súrlódás modellezése, továbbfejlesztett Coulomb modell, súrlódásmérő készülék*

Abstract

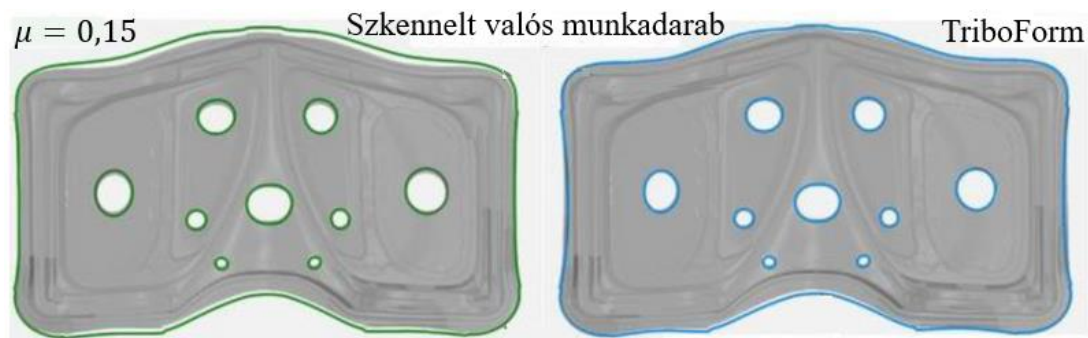
Advances in sheet metal part forming modelling are now at a stage where more favourable material and cost-efficient process variants can be developed. Manufacturing parameters can be spread over an increasingly narrow range, resulting in ever narrower process windows. However, these challenges also require increasing accuracy from the secondary or tertiary input parameters. Nowadays, the behaviour of the tribological system of sheet metal forming cannot be fully described by the long-used Coulomb friction model. Therefore, its further development and the determination of material parameters of new models based on physical measurements are becoming increasingly important in the modelling of automotive sheet metal forming. In this paper reviews the material parameters of the so-called improved Coulomb model and presents a possible measuring device design for the physically based determination of the parameters.

Keywords: *modelling of friction, enhanced Coulomb's model, friction measuring device*

1 Bevezetés

Az autóiipari lemezalkatrészek technológiai- és szerszámtervezésére orientált szoftverek alkalmazása szinte napi mérnöki rutinná vált az utóbbi néhány évtizedben. A modellezés folyamatosan növekvő megbízhatósága lehetőséget biztosított a technológusok számára, hogy egyre inkább a technológiai lehetőségek határát feszegetssék. Ahogy ez a folyamat egyre inkább felerősödött úgy váltak egyes, a múltban a technológia sikerességét kevésbé befolyásoló tényezők is egyre nagyobb jelentőségűvé, a sikeres és üzembiztos technológia megtalálásában.

A kenéssel és így közvetve a súrlódással kapcsolatos kérdések is e jelentőségteljes, a technológia sikerességét alapjaiban meghatározó, így vizsgálendő tényezőkké váltak. Ezt mutatja az 1. ábra, ahol az alakítási folyamat fizikai elvégzése utáni visszaszkennelt munkadarab kontúr és a fizikai alakítás előtt modellezett kontúr (zöld és kék színnel jelölve) eltérése látható a különböző súrlódási modellel végzett modellezések során (Sigvant et al. 2019).



1. ábra. Valós- és modellezett alkatrészkontúr az alakadás után (Sigvant et al. 2019).

Az 1. ábrából levonható következtetés nem a valós és modellezett kontúr eltérése miatt nagy jelentőségű, hanem amiatt, hogy ha a peremen a modellezés ellenére több anyag marad kint, akkor az a nagyobb felületen fellépő ráncartóerő miatt gátolhatja az anyag beáramlását a matricába, így a munkadarab vékonyodás-eloszlásában jelenthet eltérést a valós és a modellezett technológiában. Mivel az autóiiparban a lemez vékonyodás „menedzselése” az egyik legfontosabb kihívás, így közvetve az a technológiai kiértékelését viheti félre. Erre a jelenségre több tanulmány is felhívta a modellezéssel foglalkozó szakemberek figyelmét (Lacues et al., 2019). Ezért a jelenség mélyebb megértésére több kutatás is koncentrált és ennek eredményeként sikeres fejlesztések történtek a súrlódási jelenség modellezése területén

2 Továbbfejlesztett Coulomb súrlódási modell

A lemezalakítási modellezés területén a súrlódással kapcsolatos jelenségek modellezésére a Coulomb-féle súrlódási modellt használták évtizedekig, így az AutoForm szoftverben is.

$$\tau_R = \mu \sigma_n, \quad (1)$$

ahol

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}, \quad (2)$$

a súrlódó erő és a normálerő hányadosa.

A Bevezetésen említett változások és a tapasztalati eltérések azonban a modell átdolgozását tűzték ki célul. Több szerző (Kim et al. 2013; Hol et al. 2015) kutatásaira alapozva jelenleg az AutoForm programrendszer egy ún. továbbfejlesztett Coulomb-féle súrlódási modellt használ, ahol a súrlódási tényező figyelembe veszi a lemezre ható normálnyomás és a mindenkorú súrlódási sebesség értékét is:

$$\mu_{eff} = \mu \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{e-1} - a \cdot \ln \frac{\max(v_{rel}, v_{ref})}{v_{ref}}. \quad (3)$$

A (3) képletben a két legfontosabb tényező az e normálnyomástól függő kitevő és az a sebességfaktor. Ezen tényezők meghatározásához fizikai kísérletsorozatot kell végrehajtani, ahol a tényleges alapanyag-kenőanyag-szerszámanyag tribológiai rendszert különböző normálnyomásokon és sebességviszonyok között működtetve kell mérni a súrlódási tényező értékét.

Az AutoForm lehetőséget biztosít a felhasználónak a kitevők tetszőleges értékének használatához, de ezek meghatározása, a viszonylag sok befolyásoló paraméter miatt, rendkívül időigényes. A tribológiai rendszeren végzett kísérletsorozat idő és eszközigénye miatt nem lehet része a termeléssel és a technológiai tervezéssel foglalkozó vállalatok tevékenységének. Ugyanakkor, az utóbbi években egyre többször fordul elő, hogy AutoForm-ot használó vállalatok kenőanyag beszállító váltáskor szembesülnek azzal, hogy egy adott kenőanyaggal az átvételi előírás tartományon belül tartott lemezvékonyodás a kenőanyag megváltoztatása miatt nem tartható vagy rosszabb esetekben selejt munkadarab készül. Ezért ez a probléma egyre erőteljesen jelenik meg és a problémához vezető kenési-rendszer megváltoztatásának numerikus térben történő vizsgálatára egyre nagyobb igény jelentkezik.

2.1 Modellparaméterek fizikai mérése

A lemezalakítás területén végzett tribológiai vizsgálatokat, a célterület specialitásai miatt, nem lehet végrehajtani a klasszikus kopás-kenés vizsgálatok eszközein. Így a mérések kivitelezéséhez célberendezések kifejlesztése szükséges (Kirkhorn et al., 2012), amelyek közös tulajdonsága, hogy megfelelő normálfeszültség- és súrlódási sebesség tartománnyal kell rendelkezniük. Ez a lemezalakítás területén 0-40 MPa feszültségi tartományban változtatható normálfeszültséget jelent, a súrlódási sebesség méréstartományának pedig 0-200 mm/s sebességtartományt kell lefednie (Tavares et al., 2021). Egy ilyen fejlesztést mutat a 2. ábra. amin a Raziol vállalat Tribometer[®] 5100 berendezése látható.



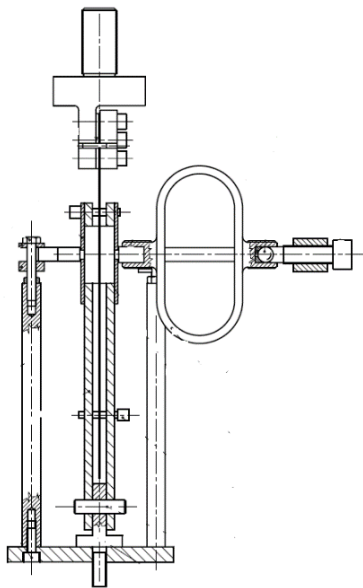
2. ábra. A Raziol cég által kifejlesztett Tribometer[®] 5100 mérőberendezés.

A témával maguk a kenőanyaggyártók is foglalkoznak, mivel a számítógéppel támogatott technológiai tervezés korában a fizikai kenőanyagok numerikus térben jó egyezéssel modellezett viselkedéséhez szükséges anyagparaméterek meghatározása piaci előnyt jelenthet számukra. Emellett, több AutoForm-ot használó autóiipari beszállító tartana igényt a továbbfejlesztett Coulomb-modell anyagparamétereinek méréssel történő meghatározására, amely generálta az Intézet erre a kutatási területre vonatkozó érdeklődését.

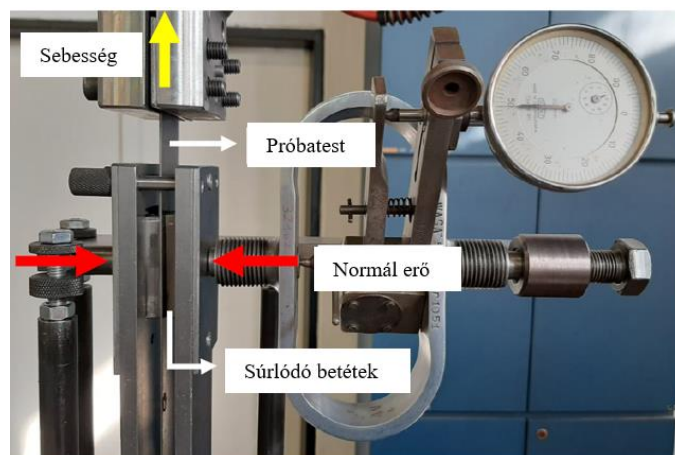
3 Súrlódásmérő készülék tervezése

Az előzőekben ismertetett igények kielégítésére az Intézetben egy viszonylag egyszerű kialakítású, az MTS univerzális anyagvizsgáló berendezésre szerelhető és azzal működtethető mérőkészüléket terveztünk. A 3. ábrán bemutatott mérőkészülék valójában egy előzetes megvalósíthatósági tanulmány részének tekinthető, hiszen mind a normálerő, mind a súrlódási sebesség tekintetében elmarad a modellparaméterek teljes paramétertartományában végezhető mérésektől.

Az irodalomkutatásaink eredményeként megfigyeltük, hogy a súrlódási tényező normálnyomás és súrlódási sebesség függése valójában az ideálisnak tekinthető mérési tartomány első harmadában már állandósult értéket vesz fel, így ha a mérést erre a mérési tartományra végezzük el, akkor ennyi mérési ponttal, ismerve a közelítő függvény matematikai alakját a súrlódási tényező változása extrapolációval kiterjeszhető a fizikai mérések pontjaira illesztett függvénnyel.



3. ábra. A súrlódási tényezőt mérő készülék terve.



4. ábra. A megvalósított mérőkészülék a mérés kezdeti állapotában.

A 4. ábrán a legyártott mérőkészülék látható a mérés kezdetén. A mérőkészülékben a súrlódó betétek cserélhetőek, így mindig a tényleges szerszámanyag-lemezanyag párosítással tudjuk a mérést elvégezni. A súrlódó betétek gyártása mindig az adott megbízó szerszámüzemében készül, betartva a szerszámkelemek gyártása során követett gyártási paramétereket. Ennek a kialakult felületi topográfia miatt van jelentősége, hiszen a felületek érdességi mérőszámai erősen befolyásolják az adott

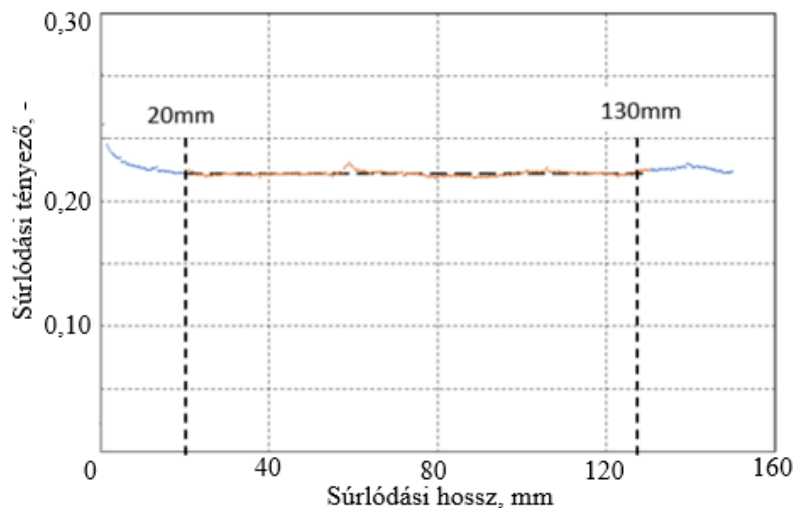
triborendszer súrlódási tényezőjét. A mérések során a megrendelő által biztosított kenőanyagot alkalmazva, laboratóriumi körülmények között a lehető legjobb közelítéssel modellezhető a tényleges gyártási körülmény.

A mérés során adott normál terhelőerőt beállítva és állandó értéken tartva az anyagvizsgáló berendezés méri az elmozdulás (súrlódási úthossz) mentén a próbatest súrlódó betétek közüli kihúzásához szükséges erőt.

A két érték ismeretében a súrlódási tényező meghatározható a (4) összefüggéssel:

$$\mu = \frac{F_s}{2 \cdot F_n} \quad (4)$$

ahol F_s a próbatest kihúzásához szükséges súrlódási erő [N], F_n pedig a súrlódó betéteket összeszorító normálerő [N].



5. ábra. Súrlódási tényező változása a súrlódási hossz alatt.

Az 5. ábra egy, az előzőekben részletezett beállításokkal elvégzett mérés eredményét szemlélteti. Az ábrán jól követhető, hogy a mérés elején egy bizonyos elmozdulásig (20 mm) a rendszer még nincs stacioner állapotban és az úthossz végén (130 mm), amikor már a súrlódó betétek nem teljes felületükkel terhelik a próbatestet, a mért értékeket nem célszerű figyelembe venni a mérés kiértékelése során ezért; ezeket a szakaszokat elhanyagoljuk. A bemutatott mérést más normálerők és más sebességviszonyok mellett megismételve meghatározható a súrlódási tényező normálnyomás és súrlódási sebesség függése, valamint a (3) összefüggésben bevezetett e és a kitevők.

4 Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk, hogy az alakítási folyamatok modellezése során egyre inkább előtérbe kerülnek a súrlódással, kenéssel kapcsolatos jelenségek numerikus modellezésének kérdései. A jelenleg alkalmazott szűkített technológiai ablakok betartásához már nem elegendő a modellezések során a klasszikus Coulomb-féle modell alkalmazása.

A továbbfejlesztett Coulomb modellhez azonban további modellparaméterek szükségesek, amelyek fizikai mérésekkel történő meghatározása nehézséget okoz a technológiai- és szerszámtervező mérnököknek. Erre a területre számos egyedi mérőberendezés kerül kifejlesztésre, de ezek beruházási

költségei rendkívül magasak és a használatuk csak adott időszakhoz kötött (kenőanyag beszállító váltás).

Mindezek alapján, az erre a területre fejlesztett mérőberendezések és mérési kapacitások jó alapot teremtenek a akadémiai és ipari partnerek együttműködésére. Az Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézetben kifejlesztett kísérleti mérőberendezéssel, bár szűkített mérési tartományban, de a modellezéshez szükséges súrlódási modellparaméterek megfelelő megbízhatósággal meghatározhatók.

Irodalom

- [1] Sigvant, M., Plithammar, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Chezan, T., Carleer, B., Boogaard, T. V. D. (2019). Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results. *Procedia Manufacturing*, 29, 512-519. doi: [10.1016/j.promfg.2019.02.169](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169)
- [2] Lacues, J., Pan, S., Francville, J.-C., Guillot, P., Capellaere, M., Chezan, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Souchet, A., Ferragu, V. (2019). Friction and lubrication in sheet metal forming simulation: Application to the Renault Talisman trunk lid inner part. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 651. 012001. doi: [10.1088/1757-899X/651/1/0120101](https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/0120101)
- [3] Kim, Y. S., Jain, M., Metzger, D. (2012). Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application of cup drawing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 56, 69-78. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2011.12.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.12.011)
- [4] Hol, J., Meinders, V. T., Geijselaers, H. J. M., Boogaard a. H. (2015). Multi-scale friction modeling for sheet metal forming: the mixed lubrication regime. *Tribology International*, 85, 10-25. doi: [10.1016/j.triboint.2014.12.017](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.017)
- [5] Kirkhorn, L., Frogner, K., Andersson, M., Stahl, J. E. (2012). Improved tribotesting for sheet metal forming. *Procedia CIRP*, 3, 507-512. doi: [10.1016/j.procir.2012.07.087](https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.087)
- [6] Tavares, A. F., Lopes, A. O. P., Mesquita, E. A., Almeida, D. T., Souza, J. H. C., Costa, H. L. (2021). Effect of transfer layer on friction and wear mechanisms in strip drawing test of commercially coated forming tools. *Wear*, 476, 203733. doi: [10.1016/j.wear.2021.203733](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203733)

ANYAGKÁRTYA MEGHATÁROZÁSA AUTOFORM PROGRAMRENDSZERHEZ

Lukács Zsolt

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: lukacs.zsolt@uni-miskolc.hu

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az autóipari lemezalkatrészek technológia- és szerszámtervezése az utóbbi néhány évtizedben kifejlesztett, numerikus modellezésre alapozott célszoftverek jelentős támogatására épül. Ezen alkalmazások matematikai-mechanikai modellekkel közelítik a fizikai alapanyag viselkedését. A modellek megfelelő pontosságú leírásához a tényleges lemezanyag anyagparamétereinek megadása szükséges. Az autóiparban felhasználásra kerülő lemezminőségek anyagparamétereit (un. anyagkártya) a célszoftverek alapanyag adatbázisa a legtöbb esetben tartalmazza. Azonban vannak olyan esetek amikor az adatbázisban nem található alapanyag felhasználásával kell technológiai tervet készíteni. Ilyenkor az alapanyag anyagparamétereit anyagvizsgálati módszerekkel kell meghatározni. A cikk bemutatja az AutoForm programrendszer anyagkártya meghatározásához kapcsolódó anyagvizsgálati folyamatot.

Kulcsszavak: AutoForm, folyási görbe, anizotrópia, alakítási határgörbe

Abstract

The technology and tool design of automotive sheet metal parts relies heavily on the support of numerical modelling-based target software developed over the last few decades. These applications use mathematical-mechanical models to approximate the behaviour of the physical material. In order to describe the models with sufficient accuracy, the material parameters of the physical sheet material need to be specified. The material parameters (so-called material card) of the sheet grades used in the automotive industry are in most cases included in the raw material database of the dedicated software. However, there are cases where a process design has to be created using a material not included in the database. In such situations the material parameters of the raw material have to be determined by material testing methods. This paper describes the material testing process related to the material card determination in the AutoForm software system.

Keywords: AutoForm, flow curve, anisotropy, forming limit curve

1. Bevezetés

Az utóbbi néhány évtizedben az alakítási folyamatok technológiai- és szerszámtervezése területére egymástól függetlenül fejlesztve, több végeselemes elven működő szoftver került bevezetésre. Ezek

működési elveikben összegezték a képlékenyalakítás területén újonnan kifejlesztett elméleti matematikai-mechanikai modelleket és az azokhoz szükséges anyagparamétereket (Banabic et al., 2000). A szoftverek használata olyan szinten integrálódott az árajánlatképzés folyamatába, hogy elengedhetetlen támogató eszközöknek tekinthetők.

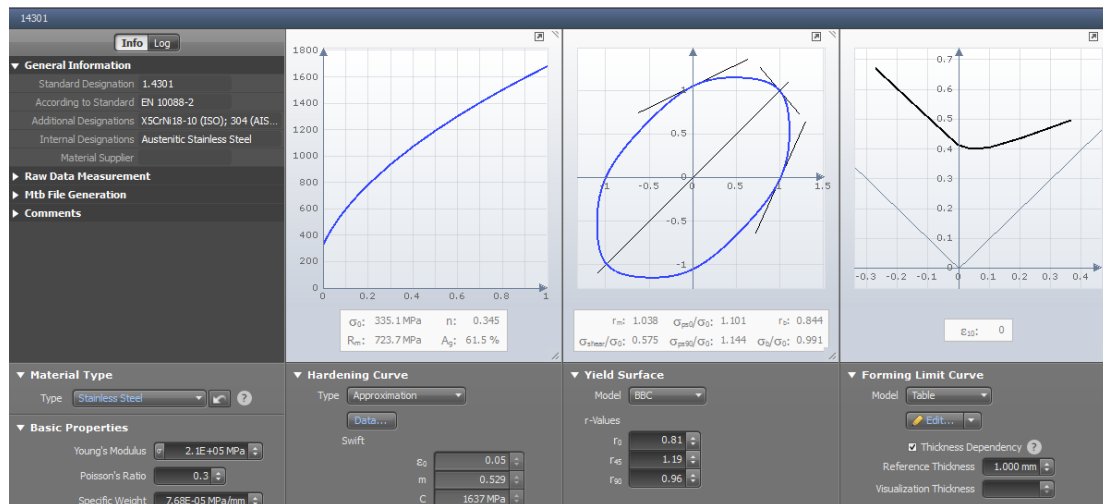
Az autóiipari beszállítói láncban egy adott alkatrészprojektre történő ajánlatadást, valamilyen numerikus technológiai modellező alkalmazással műveletek szintjén alá kell támasztani, hogy a megrendelő ellenőrizhesse, az általunk tervezett technológiai változat, teljesíti-e az átvételi követelményeket (Banabic, 2007).

A magyarországi autóiipari beszállítói kkv-k ebben a piaci versenyben csak úgy tudnak helyt állni, ha rendelkeznek e célorientált szoftverekkel és a kezelésükhöz szükséges szaktudással. Szerencsére hazánkban ezen a területen nem állunk rosszul. A piaci szereplők hamar felismerték a jelentőségét a szoftverek használatának. Figyelemben véve, hogy a hazánkban legtöbb multinacionális autógyár az AutoForm programrendszert preferálja, a beszállítói körben is ez az alkalmazás terjedt el.

Az AutoForm szoftver egyik legnagyobb előnye, hogy a szerszámtervezőt a tervezési folyamatban úgy támogatja, hogy az általános végeeselemes szoftverek használatához szükséges mélyebb mechanikai ismereteknek nem kell birtokában lennie. A program belső szubrutinok ún. „black box-ok” segítségével csak a technológiai tervezéshez szükséges adatokra koncentrálva ad választ a háttérben futó matematikai-mechanikai folyamatokról, így segítve a technológus mérnök döntéseit a tervezés során.

2. AutoForm anyagkártyához szükséges anyagparaméterek

Az AutoForm szoftver működésének egyik alapvető bemeneti paramétere az alapanyag képlékenyalakítás hatására történő viselkedését leíró modellek anyagparamétereit összegző ún. alapanyagkártya (1. ábra). Az egyes anyagparaméterekről és alakíthatóságra vonatkozó hatásairól részleteiben olvashatunk több szerző publikációjából (Tisza et al., 2015).



1. ábra. Anyagkártya párbeszédablaka AutoForm programrendszerben.

Az alapanyagkártya párbeszédablak négy fő egységre bontható. Balról az első az alapvető anyagparamétereket foglalja össze (Young modulus, Poisson tényező, sűrűség). Az ezt követő

párbeszédablak részen, az alakítás hatására bekövetkező alakítási keményedés matematikai formulákkal leíró ún. keményedési görbe (hardening curve) adható meg. Az 1. ábrán látható párbeszédablak következő, balról harmadik, nagyobb egysége az ún. folyási feltétel (*Yield Surface*) megadásához szükséges anyagparaméterek beviteli területe. A folyási feltételek a képlékenyalakítás egyik legfontosabb összefüggései, mivel megadják a feszültségek valamennyi olyan kombinációját, ami képlékeny állapotot idéz el. A folyási feltételt grafikusan is megjeleníthető a $\sigma_I - \sigma_{II}$ főfeszültségi síkon egy origó középpontú ellipszisként. A folyási feltételt reprezentáló ellipszis a folyási görbe ismeretében meghatározható. Azonban, a folyási feltételnél figyelembe kell venni a lemezek hideghengerléséből származó, az anyagparaméterek irányfüggőségét okozó ún. anizotrópia jelenséget is. Az anizotrópia legegyszerűbben úgy fogalmazható meg, hogy a lemez hengerlési irányához képest az anyagparaméterek értékeiben változást tapasztalunk. A folyási feltétel ezen irányfüggése kifejezhető az ún. normál anizotrópia tényezők figyelembevételével.

A párbeszédablak utolsó területe az un. alakítási határgörbét tartalmazza. Az alakítási határgörbe, az alakítási határdiagram azon területe, amelyhez rendelt síkbeli főalakváltozások kombinációja révén a lemez tönkremenetele bekövetkezik. Az alakítási határdiagram, határgörbe alatti területei a technológia megítélése szempontjából még további információkat is tartalmaznak (pld: ráncképződés, kritikus elvékonyodás) ezért a technológusok kiértékelési gyakorlatának szerves részét képezik.

Az anyagkártya anyagparamétereinek meghatározásához szükséges vizsgálatok az egytengelyű húzóvizsgálat és az ún. Nakazima teszt.

3. Egytengelyű húzóvizsgálatból meghatározható anyagparaméterek

Az egytengelyű húzóvizsgálat kiinduló próbateste klasszikus lemezzakító próbatest, amit leginkább lézervágással munkálunk ki. A szakító próbatesteket az Intézetünk MTS típusú, 250 kN méréshatárral rendelkező, univerzális elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezésén egytengelyű húzásnak vetjük alá. A vizsgálatok közben regisztráljuk a terhelőerőt, a próbatest hosszirányú- és a szélesség irányú méretváltozását, a berendezés saját erőmérő cellájával, illetve a próbatestre rögzített hossz- és keresztirányban mérő extenzométerekkel. Az extenzométerek helyzetét szemlélteti a 2. ábra a mérés kezdeti állapotában (Gál, et al., 2001).



2. ábra. Egytengelyű húzóvizsgálat hossz- és keresztirányú méretváltozást mérő extenzométerekkel.

3.1 Folyási görbe meghatározása

A folyási görbe meghatározásának az alakítástechnológiában számos módszere ismert. Ezek közül az egyik legegyszerűbben megvalósítható az egytengelyű szakítóvizsgálat eredményeként előállított erő – megnyúlás diagram átszámítása valódi feszültség – valódi alakváltozás diagrammá. Ebből a rugalmas alakváltozás szakaszát leválasztva ún. folyási görbét kaphatunk. A folyási görbe (*hardening curve*) alakítástechnológiai jelentősége abban rejlik, hogy matematikai függvénnyel leírja a maradó alakváltozás tartományában a feszültségi és az alakváltozási mérőszámok közötti nem lineáris kapcsolatot. Az erő-menyúlás átszámítása valódi feszültség-valódi összehasonlító alakváltozás diagrammá az (1)-(5) matematikai képletekkel lehetséges, ahol Δl_i a hosszirányú és Δb_i a szélességirányban felszerelt extenzométer hosszváltozásai. Ezek alapján a hosszirányú valódi alakváltozás (1) képlettel meghatározható.

$$\varphi_{ax} = \ln \left[1 + \left(\frac{\Delta l_i}{l_0} \right) \right] \quad (1)$$

Ezt követően a szélesség irányú valódi alakváltozás (2) képlettel meghatározható.

$$\varphi_b = \ln \left[1 + \left(\frac{\Delta b_i}{b_0} \right) \right] \quad (2)$$

A két irányú valódi főalakváltozás ismeretében a lemezzvastagság irányú alakváltozás, térfogatállandóságot feltételezve (3) képlettel számítható.

$$\varphi_s = -(\varphi_{ax} + \varphi_b) \quad (3)$$

A főalakváltozások ismeretében az összehasonlító valódi alakváltozás

$$\varphi_{\text{össz}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varphi_{ax} - \varphi_b)^2 + (\varphi_b - \varphi_s)^2 + (\varphi_s - \varphi_{ax})^2]} \quad (4)$$

összefüggéssel kiszámítható.

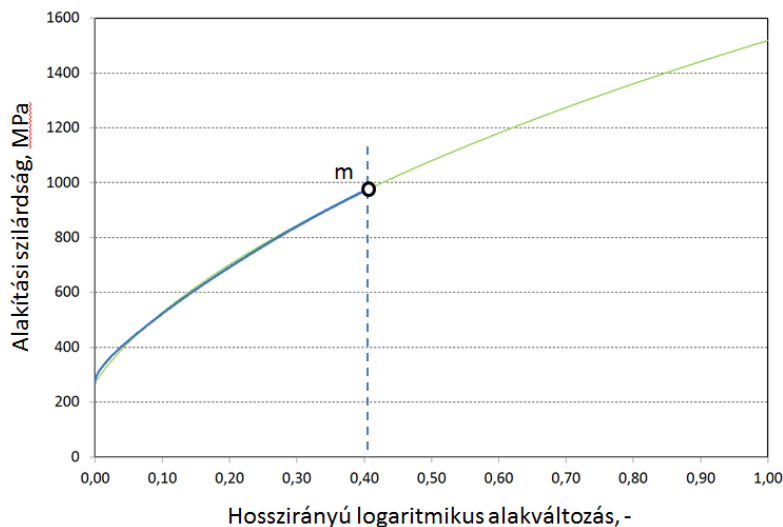
A mindenkori erőérték felhasználásával az (5) összefüggés alapján a valódi feszültséget is meg tudjuk határozni.

$$\sigma_{\text{össz}} = \frac{F_i}{S_0} \frac{l_0}{l_i} \quad (5)$$

A szakítóvizsgálattal történő folyási görbe meghatározás, egyik nagy hátránya, hogy az erő – megnyúlás diagramnak csak a legnagyobb erőhöz tartozó (m) pontjáig lehet viszonylag egyszerű (1)-(5) képletekkel átszámítani a mérőszámokat (3. ábra). Ez lehatárolja a fizikai mérések tartományát, amit legtöbbször matematikai módszerekkel szükséges kiterjeszteni a nagyobb alakváltozási tartományokra. Ehhez az AutoFormban a kombinált Swift-Hockett-Sherby függvényt használjuk

$$\sigma = (1 - \alpha) [C \cdot (\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^m] + \alpha [\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i) e^{\alpha \cdot \varepsilon_{pl}^p}] \quad (6)$$

amelynek paramétereit az AutoForm Material Generator beviteli ablakában a beimportált valódi feszültség-valódi alakváltozás pontsorra illesztett függvénnyel automatikusan meghatározza a szoftver és ennek ismeretében ki is terjeszti az m-ponton túli alakváltozási tartományra is. Ezt szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra. Valódi feszültség- valódi alakváltozás diagram és matematikai kiterjesztése.

3.2 Anizotrópia tényezők meghatározása

A folyási feltételnél figyelembe kell venni a lemezek hideghengerléséből származó, az anyagparaméterek irányfüggőségét okozó ún. anizotrópia jelenséget is. Az anizotrópia legegyszerűbben úgy fogalmazható meg, hogy a lemez hengerlési irányához képest az anyagparaméterek értékeiben változást tapasztalunk. Lemezek anizotrópia tényezőjének meghatározását a lemez hengerlési irányával különböző szöget (0° , 45° és 90°) bezáró lemezszakító próbatestek szakítóvizsgálata során, a próbatesten hossz- és keresztirányban mért méretváltozás arányaiból végezhetjük el, az *MSZ EN 10 139:2000* szabvány útmutatása alapján.

A folyási feltétel ezen irányfüggése kifejezhető az ún. normál anizotrópia tényezők figyelembevételével, ami általánosan az (7) matematikai összefüggéssel származtatható:

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b_i}}{\ln \frac{l_i \cdot b_i}{l_0 \cdot b_0}} \quad (7)$$

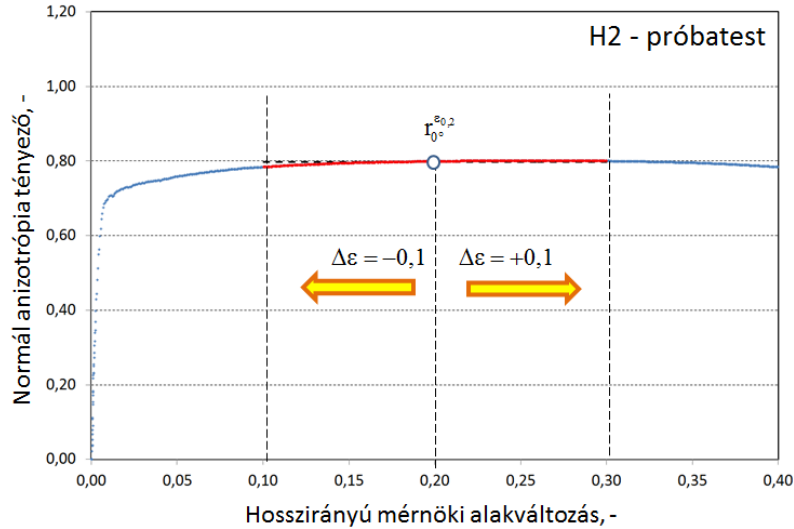
ahol

- b_0 a próbatest kiinduló szélessége (mm),
- b_i a próbatest pillanatnyi szélessége (mm),
- l_0 a hosszirányban mérő extenzométer kiinduló mérési hossza (mm),
- l_i a hosszirányban mérő extenzométer pillanatnyi mért értéke (mm).

A (7) képlet alkalmazásával a folyási feltételhez tartozó további bemeneti paraméterek a lemez hengerlési r_0 irányában, a hengerlési irányra r_{90} merőlegesen és a hengerlési irányhoz képest 45° -ban meghatározott r_{45} normál anizotrópia tényezők.

Az *MSZ EN 10 139:2000* szabvány úgy rendelkezik, hogy a normál anizotrópia tényezőt az $\varepsilon_{0,2}$ alakváltozáshoz tartozó érték jelenti, ha ez az érték még a kontrakciós szakaszt megelőző, egyenletes nyúlás tartományába esik. Mivel ennél az értéknél egyes próbatestek mérési adatai már a kontrakciós

szakaszba esnek ezért az egyenletes nyúlási szakasz 0,15 és 0,2 közötti értékeiből számított átlaggal fejezzük ki a normál anizotrópia értékeket.



4. ábra. Normál anizotrópia változása a mérnöki alakváltozás függvényében.

4. Alakítási határdiagram meghatározása

A lemezalakításban az alakítási határállapot ismerete kulcsfontosságú egy technológiai folyamat elemzéséhez. Az alakítási határállapotot az AutoForm programrendszerben az alakítási határdiagramon meghatározott ún. alakítási határgörbe szemlélteti. Meghatározásának menetét, az ehhez szükséges berendezéseket és vizsgálatokat részleteiben tartalmazza (Kovács et al., 2007) az Intézeti kollégák korábbi publikációja. A vizsgálatra használt lemezvizsgáló berendezést a négykamerás optikai mérőrendszerrel az 5. ábra szemlélteti.

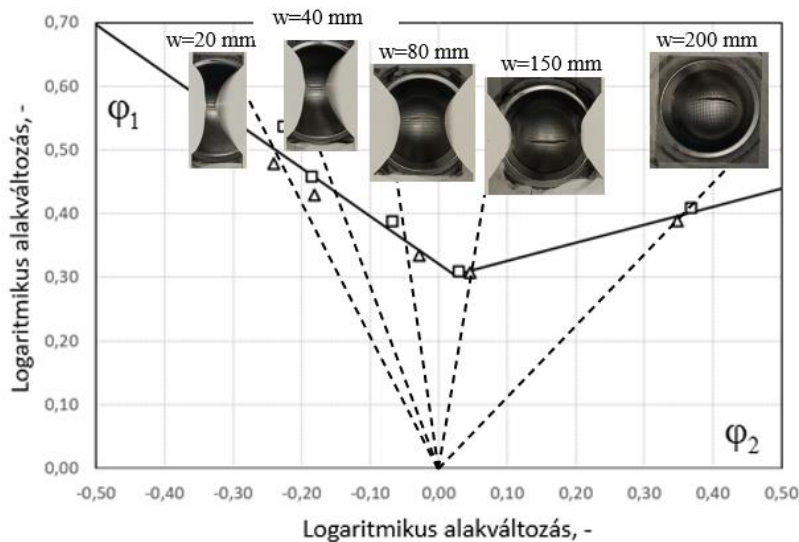


5. ábra. Lemezvizsgáló berendezés optikai mérőrendszerrel felszerelve.

A vizsgálat alapvetően egy 100mm-es átmérőjű bélyeggel végzett lemeznyújtó technológiai vizsgálat. A próbatestet a lekerekített matrica és egy szorítógyűrű közé fogjuk oly módon, hogy a

mélyítési vizsgálat során lemezbehúzásra a vizsgálati térbe nincs lehetőség. A próbatest felszínére egyenkörű osztásközzel rendelkező hálót viszünk fel, szitanyomási technikával. Az egyes vonalkereszteződéseket referencia pontnak használja a kiértékelő rendszer az optikai elven történő alakváltozás méréshez. Az így előkészített próbatestet szakadásig mélyítjük. A mérőrendszer a háló torzulásból meghatározza a lemez síkjába eső főalakváltozások eloszlását és a szakadáshoz tartozó értékeit.

A főalakváltozásokat az alakítási határdiagramban (a lemez síkjába eső főalakváltozások koordinátarendszerében) ábrázolva egy adott alakítási útvonalra jellemző pontfelhőt kapunk, aminek a legnagyobb alakváltozásokhoz tartozó pontja az adott alakváltozási úthoz tartozó alakítási határ. A vizsgálat során a próbatest különböző hídszélességeivel egy-egy jellemző alakváltozási útvonalat jelölünk ki. Az egyes alakváltozási útvonalakhoz tartozó hídszélességeket mutatja be a 6. ábra.



6. ábra. Az alakítási határgörbéhez kapcsolódó alakváltozási útvonalak.

Ezen elv szerint az alakítási határdiagram egy jelenős területe lefedhető. Az egyes alakváltozási útvonalakhoz tartozó határalakváltozási pontokat összekötve kapjuk meg az alakítási határgörbét, amit folytonos vonallal jelöltünk a 6. ábrán.

5. Összefoglalás

A képlékenyalakítás technológiai és szerszámtervezése területén megjelent számítógépi alkalmazások működésének pontosságát alapvetően befolyásolja az anyagmodellek anyagparamétereinek pontossága. Ezek a paraméterek még adott esetben egyazon gyártó azonos anyagminőségű lemezei között is nagymértékben szórhatnak. A területre fókuszáló szoftverek anyagadatbázisa a folyamatos fejlesztésnek köszönhetően megpróbálja követni az autóiipari lemezanyagpaletta szélesedését.

Azonban gyakran fordul elő olyan eset amikor a felhasználó nem rendelkezik az adott anyagminőség un. anyagkártyájával. A Miskolci Egyetem Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézete, mind a klasszikusnak mondható anyagvizsgálati módszerek, mind a technológiaspecifikus vizsgálatok területén több évtizedes tapasztalatával és eszközparkjával rendelkezik a modellező szoftverek anyagkártyáinak meghatározását célzó vizsgálati kompetenciával. Ebben a cikkben az

AutoForm programrendszer anyagadatbázisában nem található anyagminőségek un. anyagkártya meghatározásához szükséges vizsgálatokat, azokhoz szükséges berendezéseket és kiértékelésének menetét foglaltuk össze.

Irodalom

- [1] Banabic, D., Bunge, H.-J., Pöhlandt, K., Tekkaya, A. E. (2000). *Formability of Metallic Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [2] Banabic, D. (2007). *Advanced Methods in Metal Forming*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [3] Budai, D., Danyi, J., Gál, G., Hegedűs, Gy., Kiss, A., Kovács, P. Z., Lukács, Zs., Marosné, B. M., Tisza, M. (2015). *Képlékenyalakítás a járműiparban*. Tisza, M. (szerk.). Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [4] Gál, I., Kocsisné, B. M., Lenkeyné, B. Gy., Lukács, J., Marosné, B. M., Nagy, Gy., Tisza, M. (2001). *Anyagvizsgálat*. Tisza, M. (szerk.). Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc.
- [5] Kovács, P. Z., Tisza, M. (2007). *Komplex mérő és kiértékelő rendszer lemezalakítási határgörbék meghatározására*, MicroCAD 2007, 45-50.

A KORSZERŰ NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSÉNEK KIHÍVÁSAI ÉS MEGOLDÁSAI

Gáspár Marcell

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Sisodia Pratap Singh Raghawendra

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: raghawendra.sisodia@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a járműipar fokozottan igényli a korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazását, amelyekkel jelentős saját tömeg csökkenést lehet elérni. Ebből adódóan az acélgyártók figyelme az új generációs nagyszilárdságú acélok fejlesztésére irányul, amely során a hegeszthetőségi tulajdonságok kiemelt szerepet kapnak. Az ilyen acélok alkalmazásakor az acélszerkezet gyártók gyakran szembesülnek hidegrepedési problémával, a mechanikai tulajdonságok hőhatásövezetben bekövetkező romlásával, valamint a hozaganyag-választás dilemmájával. A közepes- és a vastaglemezek tekintetében a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés a legelterjedtebb hegesztő eljárás, amelynek korszerű eljárásváltozatai, különösen a korlátozott hőbevitelt eredményező impulzusteknológiák, nagyszerű lehetőséget jelentenek a hegesztési feladatok megvalósításához. Nagyszilárdságú acélok esetén a sugaras hegesztő eljárásokon belül mind a lézer-, mind az elektron-sugaras hegesztés speciális technológiai megoldásai kiválóan alkalmazhatók. Ezeknél a korszerű technológiáknál a kis kiterjedésű hőhatásövezetet eredményező koncentrált hőbevitel mellett lehetőség nyílik az előmelegítés, a hegesztés és az utóhőkezelés ugyanazon hőforrással történő megvalósítására. Jelen cikk áttekintést ad a nagyszilárdságú szerkezeti acélok különböző típusairól és hegeszthetőségéről, továbbá sorra veszi azokat a hegesztéstechnológiai megoldásokat, amelyekkel a korszerű nagyszilárdságú acélokra jellemző kimagasló mechanikai tulajdonságok leginkább megőrizhetők.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, hegeszthetőség, hőhatásövezet, sugaras hegesztés, utóhőkezelés

Abstract

Due to the severe environmental protection regulations, the vehicle industry increasingly requires the wider application of advanced high-strength steels (AHSS), which can be used to achieve significant weight reduction. As a result, the attention of steel manufacturers is oriented to the development of new generation AHSS, during which the weldability properties play a prominent role. Steel structure manufacturers regularly face with the problem of cold cracking, the deterioration of mechanical properties in the heat-affected zone (HAZ), and the dilemma of the filler material choice. In the case of medium and thick plates, gas metal arc welding (GMAW) is the most common welding process, and advanced process variants, especially pulse technologies resulting in limited heat input, are a great opportunity for welding AHSS. In the case of AHSS, the special technological solutions of both laser

and electron beam welding are excellently applicable within beam welding processes. With these modern technologies, in addition to the concentrated heat input resulting in a small HAZ, it is possible to implement preheating, welding and post-weld heat treatment with the same heat source. This article provides an overview of the different types of AHSS, including their weldability characteristics, and lists the welding technological solutions that best preserve the outstanding mechanical properties of AHSS.

Keywords: high strength steel, weldability, heat-affected zone (HAZ), beam welding proces, post-weld heat treatment (PWHT)

1. Bevezetés

Az Európai Unióban a közlekedés felelős a teljes uniós szén-dioxid kibocsátás majdnem 30%-áért, amelynek 72%-a a közúti közlekedésből származik (Európai Parlament, 2019). Ráadásul, a járművek jelentős mennyiségben tartalmaznak acélokat, amelyek előállításuk szintén jelentős CO₂ kibocsátással jár, nevezetesen, az Európai Unió CO₂ kibocsátásának 5%-át az acélipar adja (EU Science HUB, 2022). Ebből adódóan a károsanyag kibocsátás csökkentése a fenntartható fejlődés megvalósításának egyik alapvető záloga.

A járműszerkezeteknek sokszor eltérő követelményeket kell kielégíteniük. Egyrészt, a fogyasztás, illetve a károsanyag kibocsátás mérséklése érdekében sajáttömeg csökkenést kell elérni. Másrészt, egy lehetséges ütközés során biztosítani kell a járműben utazó személyek biztonságát, amely az utasokat körülvevő karosszéria ütközéssel szembeni ellenállása mellett számos biztonsági berendezés beépítését teszi szükségessé, amelyek hozzájárulnak a sajáttömeg növeléséhez (Alden et al., 2022). A sajáttömeg csökkentésére vonatkozó igény és a biztonsági előírások egyidejű teljesítése nem valósítható meg korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazása nélkül (Koncsik et al., 2021).

A nagyszilárdságú acélok egyrészt a járművek sajáttömegének, ezáltal pedig fogyasztásának csökkentésével járulnak hozzá a károsanyag kibocsátáshoz, másrészt, a nagyobb teherviselő képesség miatt kisebb szelvényméretekre, ezáltal pedig kevesebb acél előállítására van szükség. Amennyiben az acélok előállítása zöld energia felhasználásával történik, akkor a járművek, ezáltal pedig a közlekedés ökológiai lábnyoma, tovább csökkenthető. A járműipar számára számos nagyszilárdságú acélterméket előállító svéd acélgyártó vállalat, az SSAB például azt tűzte ki célul, hogy a HYBRIT technológia segítségével a világ első olyan acélipari vállalata lesz, amely fosszilis anyagok felhasználása nélkül készülő acéllal jelenik meg a piacon, várhatóan már 2026-ban, és 2045-re gyakorlatilag mentessé válik a fosszilis anyagok használatától (SSAB, 2022). A járműipar mellett a nagyszilárdságú acélok más iparágakban is megjelennek, ahol esztétikus, karcsú szerkezetekre van szükség. Ebből adódóan, napjainkban, például az épületek – különösen a felhőkarcolók – acélszerkezeteiben és a hidakban is találkozhatunk már ilyen acélokkal.

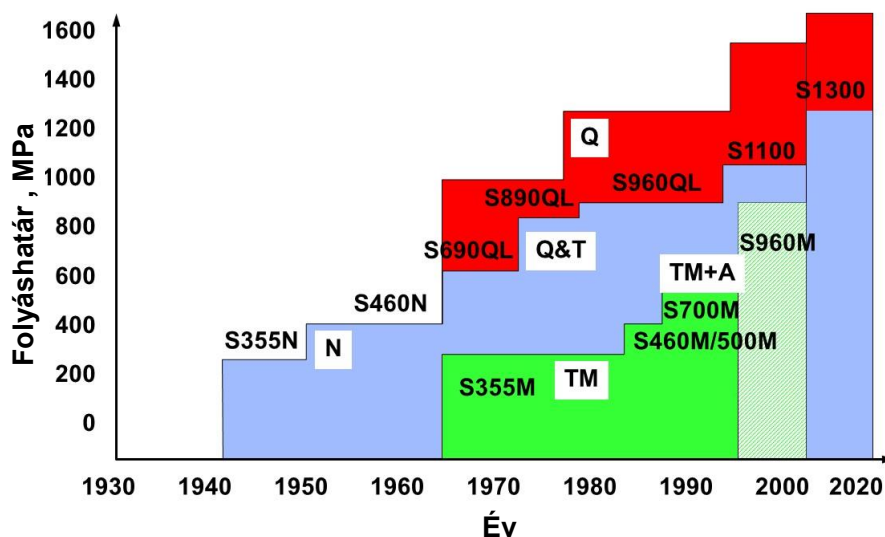
A számos ígéretes lehetőség ellenére továbbra is lényeges körülmények nehezítik a nagyszilárdságú acélok széleskörű alkalmazását:

- tervezési kihívások: nyomóterhelésnek, valamint fáradásnak kitett szerkezeti elemekben a nagyobb folyáshatárból származó előnyök kisebb mértékben használhatók ki (Lukács et al., 2019);
- korlátozott alakíthatóság;
- hegeszthetőségi nehézségek (Porter, 2015; Tümer et al, 2019);
- megmunkálási nehézségek (elsősorban 1000 MPa feletti szilárdsági kategóriák esetén);
- korlátozott lemezvastagság tartomány;
- egységnyi tömegre vetített nagyobb alapanyag és hozaganyag ár.

A fokozódó felhasználói igény ellenére a nagyszilárdságú acélok hegesztése, különösen a nagyobb szilárdsági kategóriák esetén, számos kihívást jelent a hegesztőmérnökök számára. A speciális hengerlési és hőkezelési technológiák, valamint mikroötvözők segítségével az acélgyártók olyan korszerű nagyszilárdságú acélok előállítására törekednek, amelyeknek kedvező alakváltozó képességük és szívósságuk van, valamint elfogadható módon hegeszthetők. Mivel szerkezeti acéloknál a nagy szilárdság alapvetően a finomszemcsés, részben vagy teljesen martenzites szövetszerkezetre vezethető vissza, ebből következően a hegesztési hőbevitel a nem-egyensúlyi szövetszerkezet jelentős megváltozását vonja magával. A hőhatásövezetben kilágyult és rideg részek egyaránt kialakulhatnak a hegesztési hőciklus és a beolvadási vonaltól való távolság függvényében. Jelen cikkben egy áttekintést adunk a nagyszilárdságú acélok fejlődési tendenciáról, a fokozott ridegedési hajlamról és a hőhatásövezetben bekövetkező változásokról, a hozaganyag-választás kérdésköréről, valamint sorra vesszük azokat a hegesztéstechnológiai megoldásokat ($t_{8/5}$ koncepció, impulzus technológiák, sugaras hegesztő eljárások, utóhőkezelések stb.), amelyekkel a hegesztett szerkezetekben a korszerű nagyszilárdságú acélok kimagasló szilárdsági és szívóssági tulajdonságai a leginkább megőrizhetők.

2. Acélkategóriájuk és gyártásuk

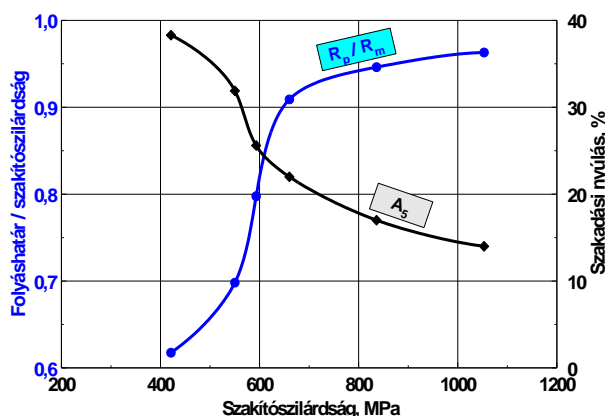
A napjainkban elérhető legnagyobb szilárdságú acélok közel négyszer akkora folyáshatárúak, mint száz évvel ezelőtt (1. ábra). Az edzés (Q: quenching) és nagy hőmérsékletű megeresztés (T: tempering), összefoglaló módon nemesítés (Q&T), szerkezeti acélokban történő megjelenésével kimagasló szívósságú nagyszilárdságú acélokat állítanak elő évtizedek óta. Ezeknek az acéloknak jellemzően megeresztett martenzites, részben bénites a szövetszerkezetük, viszonylag nagy a karbontartalmuk (0,15-0,25) és acélgyártól függően makro- (Cr, Mo, Ni) és mikroötvözőket (Al, Ti, Nb, Zr, V és B) tartalmaznak. A nagy szilárdság a martenzit-bénites szövetszerkezet, a finom szemcseméret, a szubsztitúciós szilárd oldatot alkotó ötvözők és a nagyobb diszlokáció-sűrűség együttes eredménye. A nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése, bár kiváló alapanyagoknak tekinthetők, a nagy karbonegyentékből adódóan számos kihívást jelent a felhasználók számára.



1. ábra. A szerkezeti acélok fejlődése.

A termomechanikus kezelés (TMCP: thermomechanically controlled process) alkalmazásával ugyanakkora folyáshatár érhető el, kisebb karbon tartalom mellett, ugyanakkor a mikroötvözők ezeknél az acéloknál is kiemelt szerepet kapnak. Ezen acélok szövetszerkezete jellemzően bénit-martenzites, esetenként csekély ferrit tartalommal. A szemcseméret – a hengerlési során túlhűtött ausztenitből adódóan – a nemesített nagyszilárdságú acélokhöz képest jellemzően még kisebb. Bár a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélokra jellemző kis karbon egyenérték kedvező hegeszthetőségi tulajdonságokat eredményez, széleskörű alkalmazásuknak korlátot szab az, hogy csak szűkebb lemezvastagság tartományban érhető el, mint a nemesített szerkezeti acélok. Mindkét gyártási mód esetén az acélgyártók fokozottan törekednek a kis szennyezőtartalomra (elsősorban S és P), amellyel a járműipari felhasználás szempontjából is fontos kis átmeneti hőmérséklet érhető el (Sisodia, 2021).

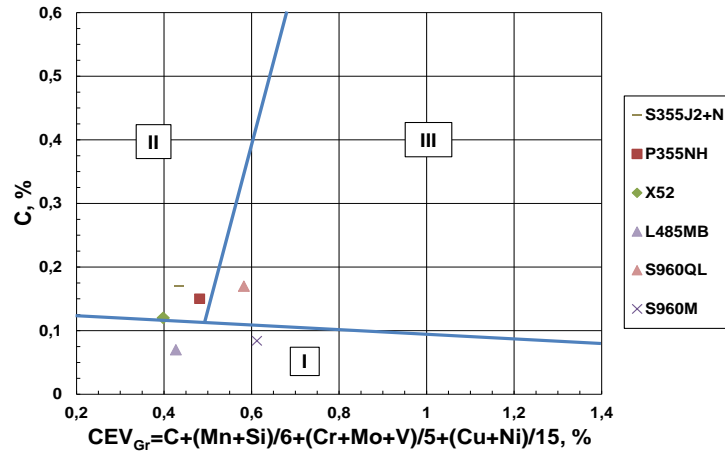
A felhasználás szempontjából nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a folyáshatár növelésével a nagyszilárdságú acélok képlékeny tartaléka csökken, amelyet 600 MPa szakító szilárdság felett az egyhez közeli folyáshatár-szakító szilárdság viszony ($R_{p0,2}/R_m$) is mutat (2. ábra).



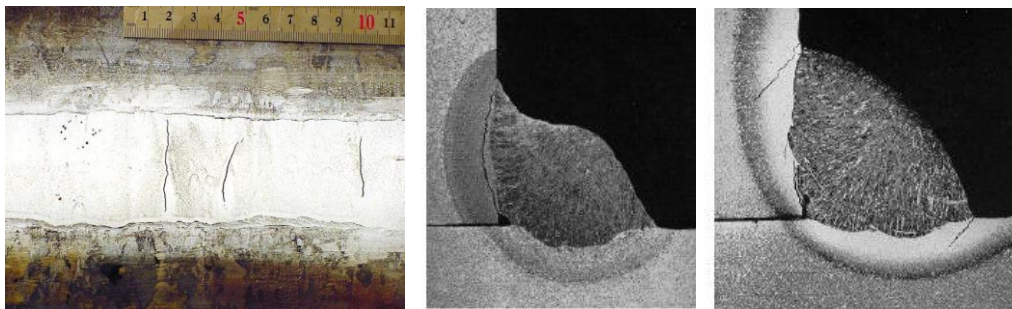
2. ábra. Az acélok szilárdságának hatása a ridegedési hajlamra.

3. Hegesztési kihívások

Amikor egy szerkezeti acél hegeszthetőségi tulajdonságait vizsgáljuk, az első lépés a Graville diagramban (3. ábra) történő elhelyezkedés vizsgálata. A diagram a szerkezeti acélokat a karbon tartalom és a karbon egyenérték függvényében három tartományba sorolja be: az első tartományba tartoznak a jól hegeszthető acélok, a másodikban kapnak helyet azok az acélok, amelyek hegesztésekor már körültekintéssel kell eljárni, a harmadik tartományba pedig a nehezen hegeszthető acélok sorolhatók. A diagram felhívja a figyelmet a karbon egyenértéken túl a karbon tartalom hegeszthetőségre gyakorolt kiemelt hatására. Az ábrán szereplő acélokat az MSZ EN 10204 szabvány szerinti 3.1 besorolású műbizonylatok alapján helyeztük el. A diagram alapján a nemesített nagyszilárdságú acélok jellemzően a legproblémásabb, fokozott hidegrepedési hajlamra utaló, harmadik tartományba esnek, miközben a termomechanikusan kezelt acélok az első tartományban kapnak helyet, amelyből adódóan hidegrepedési veszély és egy adott lemezvastagságig elkerülhető előmelegítés nélkül hegeszthetők. A nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseiben, a martenzit tartalmú rideg szövetszerkezet és a maradó feszültségek miatt, hidrogén jelenlétében, hidegrepedések alakulhatnak ki, amelyek egyaránt előfordulhatnak a varratban (keresztirányban) és a hőhatásövezetben (4. ábra). A nemesített nagyszilárdságú acélok esetén fokozott hidegrepedési hajlamra kell számítani akkor, amennyiben a hegesztés előmelegítés nélkül, túlságosan kis fajlagos hőbevitellel történik.



3. ábra. Szerkezeti acélok elhelyezkedése a Graville diagramban.

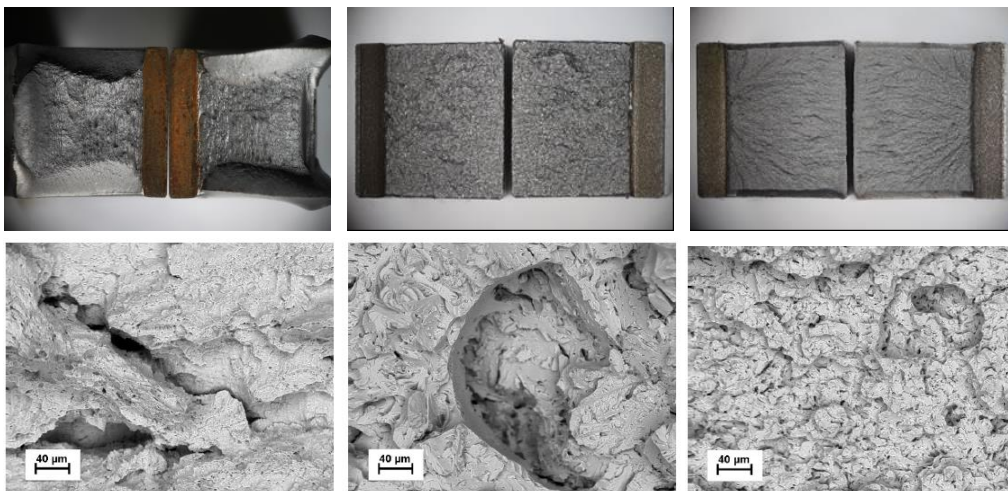


4. ábra. Hidegrepedés a varratban és a hőhatásövezetben (Worldpress, 2016).

A másik jelentős hegesztési problémakör a hőhatásövezetben bekövetkező mechanikai tulajdonságromláshoz kapcsolódik. Az acélcategóriától és a hegesztési hőbeviteltől függően, kemény és kilágyult részek egyaránt kialakulhatnak a hőhatásövezetben. A nemesített nagyszilárdságú acéloknál különösen jellemző a kemény, rideg durvaszemcsés sáv, miközben a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acéloknál csak kis mértékű keményedés figyelhető meg a hőhatásövezetben. Ráadásul ezeknél az acéloknál a keményedett részek gyakran nem is a durvaszemcsés sávban, hanem a finomszemcsés (normalizált) övezetben alakulnak ki. A szilárdsági jellemzők változása mellett jelentős mértékű szívósságcsökkenés következik be a hőhatásövezetben (5. ábra), amely a nemesített nagyszilárdságú acélok esetén a durvaszemcsés sávra és a részleges átkristályosodási (interkritikus) sávra egyaránt jellemző. Többretegű varratfelépítés esetén a szemcsehatárokon kialakuló lokális rideg részek, martenzit-ausztenit (M-A) szigetek miatt, rendszerint az interkritikus durvaszemcsés zóna a hőhatásövezet legkisebb szívósságú része. A termomechanikusan kezelt acélok hegesztett kötéseinek hőhatásövezetében szintén végbemegy szívósságcsökkenés, azonban az átalakult szövetszerkezet rendszerint kevésbé lesz rideg, mint nemesített nagyszilárdságú acéloknál (Sisodia, 2021).

Az, hogy a hidegrepedési hajlam vagy pedig a szívósságcsökkenés jelent nagyobb kockázatot a hegesztett szerkezet szempontjából, részletes vizsgálatokat igényel. Ugyanakkor, a mérlegelés során érdemes azt is figyelembe venni, hogy miközben a hidegrepedések az iparban széles körben alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatokkal nagy valószínűséggel kimutathatók, addig a szívósság-

csökkenés roncsolásmentes kimutatására nem igazán van lehetőség. Alapvetően a megfelelő szintű minőségbiztosítás alkalmazásával (például hegesztési paraméterek és hegesztők ellenőrzése folyamatfelügyelő rendszerekkel) lehet megelőzni a hegesztett kötésben bekövetkező túlzott mértékű szívósságcsökkenést.



5. ábra. Szívós alapanyag és rideg hőhatásövezet töretfelülete nemesített nagyszilárdságú acél ütővizsgálatakor.

A nagyszilárdságú acélok hegesztésével kapcsolatos harmadik problémakör az alapanyaggal megegyező szilárdsági tulajdonságokat eredményező, ún. matching típusú hozaganyagok korlátozott elérhetősége a nagyobb szilárdsági kategóriák esetén. Miközben az acélgyártók az ötvözők, a hengerlés és a hőkezelés optimális kombinációjával állítják elő a kívánt mechanikai tulajdonságokat, addig a hozaganyag gyártók egyedüli lehetősége az ötvözés a megkövetelt varratulajdonság elérése érdekében. Ráadásul, ezt úgy kell megvalósítani, hogy a hozaganyag karbonegyenértéke, azon belül is elsősorban karbontartalma (lásd Graville diagram) ne legyen túlságosan nagy. Matching típusú hozaganyagok, az alapanyaghoz képest jelentősen nagyobb (1,5-3%) nikkeltartalommal, napjainkban egészen az S1100 szilárdsági kategóriáig elérhetők, miközben az S1300 kategóriánál egyelőre csak kisebb szilárdságú, ún. undermatching hozaganyagok alkalmazhatók (Kovács et al, 2022; Kovács et al., 2023). Attól függően, hogy a varrat a hegesztett szerkezet milyen igénybevételű helyére esik, számos kutatás foglalkozik a nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések fáradással szembeni ellenállásával. Vannak olyan alapanyag-hozaganyag-igénybevétel kombinációk, amikor az undermatching típusú hozaganyagok előnyösebbnek bizonyulnak, miközben más esetben a matching hozaganyagok hoznak kedvezőbb eredményt (Lukács et al, 2019).

Mivel az acélszerkezet gyártásban a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés a legelterjedtebb ömlesztő hegesztő eljárás (Kalácska et al, 2016), ezért a technológia jellegéből adódóan a varratban előfordulhat porozitás (Kovács et al., 2022). A konvencionális, kis szilárdságú acélokhoz képest a nagyszilárdságú acéloknál minden szakirodalom kihangsúlyozza a lehető legkisebb hegesztési fajlagos hőbevitel alkalmazásának szükségességét a mechanikai tulajdonságok, elsősorban szívósság megőrzése érdekében. Ugyanakkor, a mindennapi gyakorlatban nem szabad azt figyelmen kívül hagyni, hogy a kis fajlagos hőbevitel megnövelheti a porozitás előfordulásának valószínűségét, amennyiben figyelmen kívül hagyják a megfelelő óvintézkedéseket (felülettisztítás, rétegek/sorok közötti köszörülés, megfelelő tisztaságú védőgáz stb.). Ilyenkor a rövid hegesztési hőciklusból

adódóan végbemenő gyors megszilárdulási folyamat miatt nem áll rendelkezésre elegendő idő a hegfürdőben lévő gázok eltávozására.

4. Technológiai lehetőségek

A nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiáját az adott acél esetén javasolt $t_{8/5}$ hűlési idő tartomány betartásával célszerű megtervezni. A szilárdság növelésével az optimális hűlési időablak rendszerint szűkül (S960QL esetén 6-10 s, S960M esetén 5-15 s). A $t_{8/5}$ hűlési idő koncepció előnye, hogy az előmelegítés és a hegesztési hőbevitel hatását együttesen veszi figyelembe. Az MSZ EN 1011-2 szabványban is megtalálható hűlési idő módszer elméleti háttere mögött alapvetően az áll, hogy a hagyományos, kis vagy közepes szilárdságú szerkezeti acélok esetén a fázisátalakulások alapvetően az A_{c3} hőmérsékletre utaló 800-850 °C és a folyamatos hűtésű átalakulási diagramok orrpontjához tartozó 500 °C között mennek végbe. A legtöbb nagyszilárdságú szerkezeti acél esetén azonban nincs semmilyen elméleti háttere a 800-500 °C tartomány vizsgálatának, mivel a nagyobb karbonegyenérték és a kis hegesztési hőbevitel miatt jellemzően ausztenit → martenzit átalakulás megy vége hegesztéskor, amelynek átalakulási hőmérséklet tartománya 500 °C alatt van.

Napjainkban a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést alkalmazzák leggyakrabban a korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez (Kalácska et al., 2016). Különösen nagy jövő áll azon korszerű eljárásváltozatok előtt, amelyekkel – az előírt beolvadási mélység megtartása mellett – csökkenthető a hegesztési hőbevitel és a hőhatásövezet mérete. Tekintettel arra, hogy a nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a lengetést kerülni kell, ezért a varrat rendszerint több hegesztési sorból épül fel, mint a hagyományos acéloknál. A termelékenység növelése érdekében hatékony megoldást jelentenek a fémportöltetű huzalelektrodák, amelyekkel nagyobb leolvasztási teljesítmény érhető el.

Növekvő igény mutatkozik a lézer- és az elektronsugaras hegesztő eljárások alkalmazására. Mindkét technológia előnye a nagy energiasűrűség, és az ebből adódó mély beolvadás és csekély hőhatásövezet méret. Speciális feladatok esetén mindkét hőforrás alkalmazható a hegesztés mellett előmelegítésre és utóhőkezelésre is. Ezáltal lehetőség nyílik arra, hogy akár az előmelegítés, a hegesztés és az utóhőkezelés ugyanazzal a hőforrással valósuljon meg. Az arra alkalmas elektronsugaras hegesztő berendezések esetén ez akár az elektronsugárnyaláb három részre bontásával is megvalósítható. Korszerű lézersugaras berendezések esetén, különösen a dióda lézereknél, a fókuszált terület nagysága széles tartományok között szabályozható. Ezáltal más fókuszált terület nagyság állítható be a hegesztéshez és a kialakult hőhatásövezet méret függvényében az utóhőkezeléshez (Sisodia, 2021). A nagyszilárdságú acéloknál a hegesztést követő utóhőkezeléssel a hidegrepedési veszély csökkenthető, valamint a varrat és a hőhatásövezet szívóssága jelentős mértékben növelhető.

5. Összefoglalás

Jelen cikkben egy rövid áttekintést adtunk a különböző típusú nagyszilárdságú szerkezeti acélokról, beleértve a gyártástechnológiát, a hegeszthetőségi tulajdonságokat, valamint a hegesztéstechnológiai tervezési szempontokat. Egyértelmű kapcsolat van az acélgyártó eljárás, a hegeszthetőség és az alkalmazott hegesztéstechnológia között. A termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélok a hőhatásövezetben bekövetkező mechanikai tulajdonságrómlás szempontjából kevésbé érzékenyek a hegesztési hőbevitelre, mint a nemesített nagyszilárdságú acélok. A huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéseken belül az impulzustechnológiák és a fémportöltetű huzalelektrodák alkalmazása jelenti a legígéretesebb technológiai kombinációt, miközben a sugártechnológiák alkalmazása a csökkent hőhatásövezeti méret, valamint az utóhőkezelés lehetősége miatt tekinthető előnyös megoldásnak.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka a Magyar Tudományos Akadémia BO/00643/22/6 azonosítószámú Bolyai János Kutató Ösztöndíjának keretében valósult meg.

Irodalom

- [1] Európai Parlament (2019). *Amit érdemes tudni a gépjárművek szén-dioxid-kibocsátásáról az EU-ban*. <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20190313STO31218/amit-erdemes-tudni-a-gepjarmuvek-szen-dioxid-kibocsatasarol-az-eu-ban> (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [2] EU Science HUB (2022). *EU climate targets: how to decarbonise the steel industry*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [3] <https://www.ssab.com/hu-hu/fossil-free-steel> (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [4] Lukács, J., Dobosy, Á. (2019). Matching effect on fatigue crack growth behaviour of high-strength steels GMA welded joints. *Welding in the World*, 63, 1315-1327. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00768-3>
- [5] Porter, D. A. (2015). *Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications*, Portevin lecture, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels – Challenges and Applications, Helsinki, Finland, Paper IIW 2015 0102.
- [6] Tümer, M., Schneider-Bröskamp, C., Enzinger, N. (2022). Fusion welding of ultra-high strength structural steels - A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 203-229. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.049>
- [7] Sisodia, R. P. S. (2021) *High Energy Beam Welding of Advanced High Strength Steels*. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola,.
- [8] <https://inspektorkimpalan.wordpress.com/2015/08/18/welding-imperfection-cracks> (letöltés dátuma: 2016.03.05.)
- [9] Kovács, J., Lukács, J. (2022). *S1300 nagyszilárdságú szerkezeti acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése*. XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Budapest, Magyarország, Magyar Hegesztési Egyesület, pp. 48-56.
- [10] Kovács, J., Lukács, J. (2023). Influence of Filler Metals on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Welded High Strength Steel. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (Eds.) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (1st ed., pp. 995-1005). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_83
- [11] Kalácska, E., Májlinger, K., Fábrián, E. R., Russo Spena, P. (2016). *Nagyszilárdságú vékonylemezek vegyeskötése MIG eljárással*. 28. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Dunaujváros, Magyarország, pp. 276-284.
- [12] Konecsik, Zs., Lukács, J., Nagy, Gy. (2021). *Nagyszilárdságú acélok fizikai szimulációval előállított hőhatásövezeteinek törésmechanikai vizsgálatai*, XXX. Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Online Konferencia, Budapest, Magyarország, Magyar Hegesztési Egyesület, pp. 119-125.
- [13] Abd al al, S.a., Meilinger, Á. (2023). Investigation of Resistance Spot Welded Joints Made on Ultra-high-Strength Steel Sheets. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (Eds.) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (1st ed., pp. 981-994). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_82

ALUMÍNIUM – ACÉL VEGYESKÖTÉS KÉSZÍTÉSE ELLENÁLLÁS- PONTHEGESZTÉSSEL

Meilinger Ákos

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metakos@uni-miskolc.hu

Fodorné Cserépi Mariann

Tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mariann.cserepi@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az ellenállás-hegesztés a mai napig komoly szerepet tölt be a járműipari kötéstechológiák között és, bár több konkurens akadt az elmúlt években, szerepe csak kis mértékben csökkent. Ennek számos, a tömeggyártásból adódó oka van. Emellett a felhasznált alapanyagok komoly fejlődésnek indultak akár acélról, akár alumíniumról beszélünk. A különböző szilárdságú DP acélok manapság teljesen átlagosnak mondhatók egy gépjármű karosszériában, illetve a nagyszilárdságú nemesített/alakított alumínium ötvözetek is folyamatosan terjednek. Ezen speciális anyagpárosítások új kihívások elé állítják a technológusokat, esetenként vegyeskötést kell létrehozni acél és alumínium vékonylemezek között. A legjobb megoldás az, ha a meglévő berendezéssel lehet ezt megtenni. Ebből adódóan érdemes megvizsgálni az alumínium – acél vegyeskötések készítésének lehetőségét ellenállás-hegesztéssel.

Kulcsszavak: alumínium – acél, vegyeskötés, ponthegesztés, hegesztés

Abstract

The resistance spot welding is a preferable joining method in automotive industry, especially in case of thin sheet joining. There are several reasons why this method so useful in mass production. In some cases, aluminium with steel has to be joined, and sometimes really difficult to solve this task by resistance spot welding. Other joining processes (e.g., self-piercing riveting) can solve these problems partly, but these processes have the own limitation, and it can cause problems for manufacturers too (e.g., new machine installation, increased cycle time, etc.). The best solution can be to develop technology for resistance spot welding which can be acceptable for manufacturer. The aim of this paper to develop technology for two types of aluminium – steel joints, and investigate the basic properties of these joints.

Keywords: aluminium – steel, hybrid joint, spot welding, welding

1. Bevezetés

A személygépkocsi karosszériák esetében egyre inkább a kisebb tömeg elérése a cél, amellett, hogy kellő szilárdságot és ezzel együtt védelmet nyújtanak. Ezt a célt többek között a korszerű

nagyszilárdságú acélok és alumínium ötvözetek alkalmazásával lehet elérni. Teljes mértékben acél vagy alumínium gépjármű karosszériával a tömeggyártásban nem lehet találkozni, jellemzően a hibrid (alumínium – acél) anyaghasználat terjedt el. A gyakorlatban a kritikus részek nagyszilárdságú acélokból, míg a kevésbé igénybevett részek és az energiaelnyelő elemek alumínium ötvözetekből készülnek. Ezen elemek között olyan kötést kell létesíteni, amely teljesíti a sokszor szigorú szilárdsági követelményeket, valamint a gyártás későbbi folyamatai károsan nem befolyásolják azt. Emellett fontos, hogy tömeggyártásba jól illeszthető legyen, valamint az alkalmazott technológia toleráns legyen a gyártás során felmerülő eltérésekkel (például alapanyag méret, minőség). Az ellenállás-hegesztés a gyártási kritériumoknak nagy részben eleget tesz, viszont a kötés minőségét illetően vannak kérdések, ezért érdemes az alumínium – acél vegyeskötéseket ezzel az eljárással megvizsgálni, a lehetőségeket felmérni.

2. Alapanyagok

A kísérletekhez a járműiparban gyakran használt alapanyagokat választottuk, acél esetében DP 800 jelű, míg alumíniumnál 5754-H22 és 6082-T6 típust használtunk. Mindegyik alapanyag 1 mm falvastagságú volt, a jobb összehasonlíthatóság érdekében.

Az 5754-H22 alumínium lemez az egyik leggyakrabban alkalmazott anyagminőség, alapvetően a jó alakíthatósága, illetve az ehhez társuló jó szilárdsági tulajdonságai miatt. Fő ötvözőeleme a magnézium, szilárdsága alakítással növelt, majd negyedkeménységűre lágyított (Gáspár, 2019).

A 6082-T6 alapanyag a nemesíthető alumínium ötvözetek közül az egyik leginkább elterjedt, széles körben használt anyag. Ezt az ötvözetípust jó korrózióállóság jellemzi, hegesztés során viszont a hőhatásövezetében számottevő kilágyulás jelentkezhet. Jól megmunkálható ötvözetípus, hidegen alakítható és hőkezelhető (Balogh, 2013; Alessio, 2019).

A duál fázisú (vagy kettős fázisú, dual-phase (DP)) acélok ferrit mátrixba ágyazott, finom, diszperz eloszlású, kemény martenzit szigeteket tartalmaznak (Bouche, 1998). A martenzit mennyisége határozza meg alapvetően az adott alapanyag szilárdságát. A lágy ferrit a jó alakíthatóságot biztosítja, míg a kemény martenzit az acél szilárdságát növeli. Ezt a heterogén szövetszerkezetet általában folyamatos hőkezeléssel (áthúzó kemencében, vagy sófürdőben), vagy a meleg hengerlést követő szabályozott lehűtéssel állítják elő (Bouche, 1998). A kísérlethez a DP800 jelű acélt választottunk, amely a járműkarosszériák egyik gyakori alapanyaga.

Az alapanyagok vegyi összetételét – gyártói műbizonylatok alapján – az 1. és a 2. táblázatok foglalják össze.

1. táblázat. Az alumínium alapanyagok vegyi összetétele [tömeg%].

Alapanyag	Cu	Fe	Mn	Cr	Mg	Ti	Si	Zn	Al
5754-H22	0,055	0,294	0,358	0,009	2,796	0,016	0,193	0,034	maradék
6082-T6	0,09	0,46	0,46	0,02	0,7	0,03	0,9	0,08	maradék

2. táblázat. A DP800 jelű acél alapanyag vegyi összetétele [tömeg%].

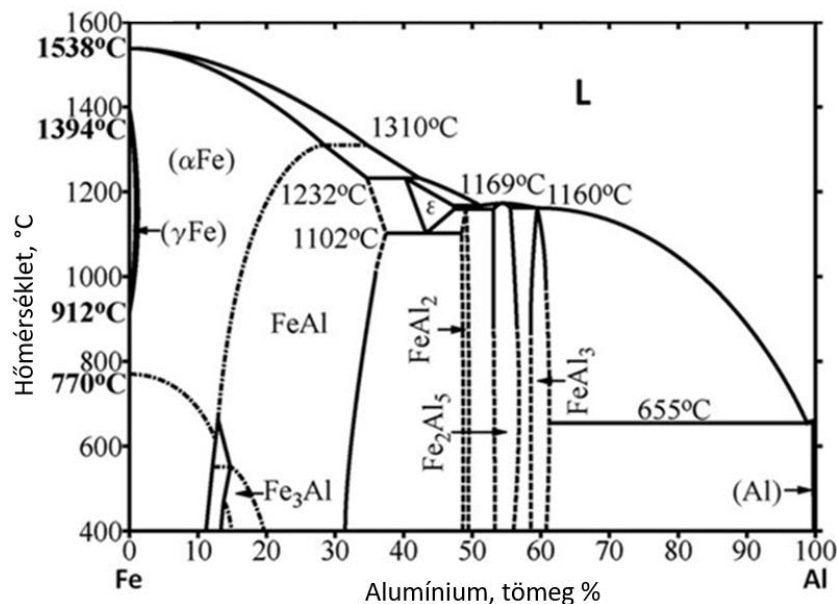
Alapanyag	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B	Fe
DP800	0,129	0,2	1,52	0,014	0,003	0,015	0,02	0,0003	maradék

Az alapanyagok mechanikai tulajdonságait – saját méréseink alapján – a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. Az alapanyagok mechanikai tulajdonságai.

Alapanyag	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_{50} [%]
5754-H22	220	137	22
6082-T6	348	303	15
DP800	873	599	13

Az alumínium – acél vegyeskötés létrehozását, több tényező is megnehezíti. A jelentős mértékben eltérő olvadáspont, hővezetési tényező, elektromos ellenállás is kihívást jelent hegesztéskor, ahogy az alumínium lemez felületén keletkezett oxid is. A hegesztés során intermetallikus vegyületek keletkeznek a kötés síkjában, amelyek rendkívül ridegek, az alakváltozó képességük pedig elhanyagolható. A 3. ábra mutatja a vas – alumínium kétalkotós egyensúlyi fázisdiagramot, amelyből látható, hogy milyen vegyületek keletkezésére lehet számítani.



1. ábra. Vas – alumínium kétalkotós egyensúlyi fázisdiagram [5]

Jelenleg több kísérlet folyik világszerte az alumínium – acél vegyeskötés tulajdonságainak feltérképezésére ellenállás-hegesztésnél. Bouche írt először arról, hogy hegesztéskor valamilyen intermetallikus vegyület (IMC) képződése tapasztalható. Az irodalom alapján ez alapvetően az $FeAl_3$ és a Fe_2Al_5 szokott lenni, eltérő mértékben (Naoi et al., 2007; Gang et al., 2017). A két különböző IMC növekedési sebessége jelentősen eltér: jellemzően a Fe_2Al_5 gyorsan, míg az $FeAl_3$ lassan növekedik (Majid, 2017).

3. Végeleges modellezés

Az alumínium – acél vegyeskötés készítése ellenállás-ponthegesztéssel nem megszokott hegesztési feladat, az alapanyagok jelentősen eltérő tulajdonságai komoly kihívást jelentenek. Jelentős a különbség a fizikai tulajdonságok terén, emellett a mechanikai tulajdonságok is számottevő eltérést

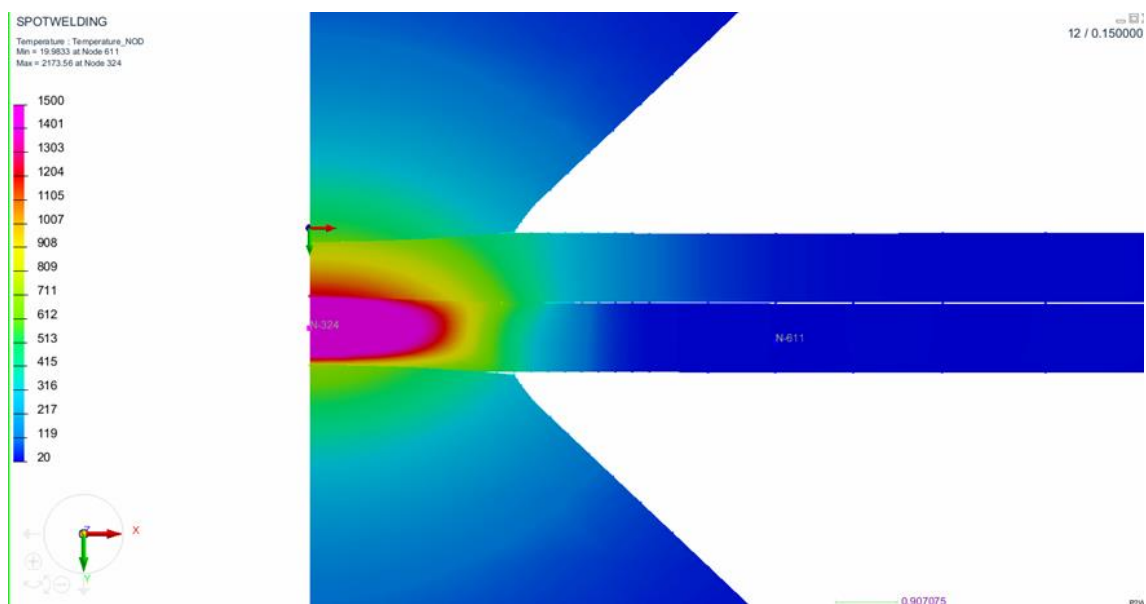
mutatnak (lásd 3. táblázat). Jogosan merül fel a kérdés, hogy melyik alapanyaghoz igazodó paraméterkombinációt válasszuk a kísérletekhez? Esetleg köztes értékekkel dolgozzunk, vagy egy alapjaiban eltérő technológiát dolgozzunk ki? Ennek eldöntéséhez nyújtott segítséget a végeselemes modellezés.

A végeselemes modellezés elvégzéséhez az ESI Group által fejlesztett Visual Environment programot használtuk, amely alkalmas az ellenállás-ponthegesztés modellezésére. Többek között a hegesztés során keletkező hőmérsékletmezőről és az alakváltozás mértékéről is tájékoztatást ad. Az összehegesztendő anyagok minőségét a program anyagkönyvtárából választottuk ki: 5754 alumíniumötvözet és DP800 acél. A technológiatervezés megkönnyítéséhez két különböző paraméterkombinációt modelleztünk, az elektród geometriáját 40 mm átmérőjű félgömb kialakításúra választottuk. A paramétereket a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A végeselemes modellezéshez választott hegesztési paraméterek.

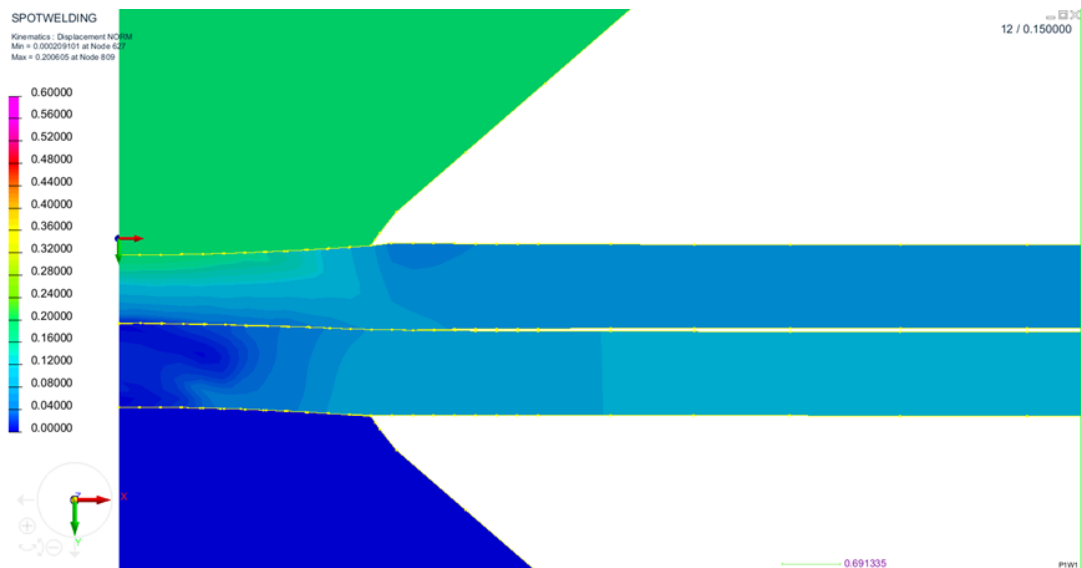
Sorszám	Hegesztési áramerősség [kA]	Hegesztési idő [ms]	Hegesztési erő [kN]
1. paraméter	20	120	2,5
2. paraméter	16	300	2,5

Az 1. paraméterkombinációval (kemény munkarend) készült modellezés hőmérséklet-eloszlását a 2. ábra, alakváltozás-eloszlását a 3. ábra mutatja. Mindkét ábra esetén a felső lemez az alumínium, az alsó pedig az acél.



2. ábra. Hőmérséklet-eloszlás az 1. paraméterkombináció esetén.

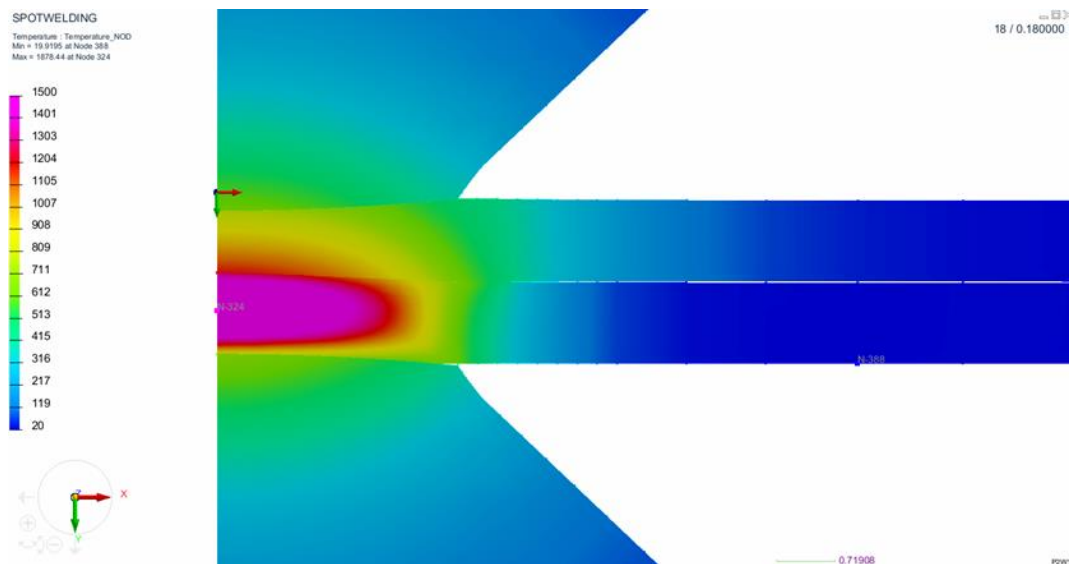
A 2. ábrán látható, hogy mindkét alapanyag eléri az olvadáspontját, a kialakult hőmérsékletmező aszimmetrikus, a DP800-as acél magasabb hőmérsékletre hevül fel, míg az 5754-es alumínium ötvözet alacsonyabbra. Az ábrán könnyen kivehetők a jelentősen eltérő alapanyag tulajdonságok okozta különbségek.



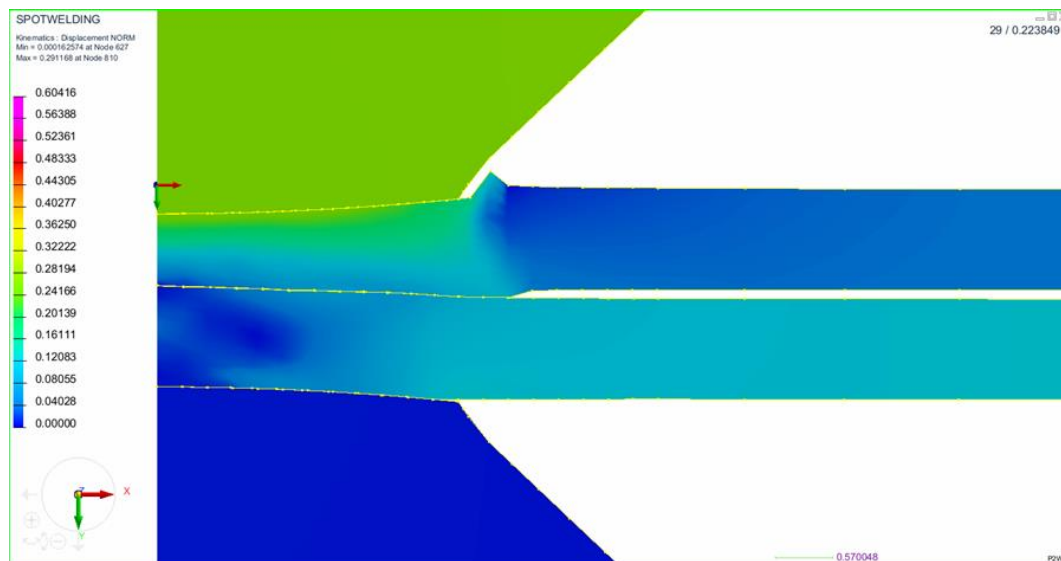
3. ábra. Alakváltozás-eloszlás az 1. paraméterkombináció esetén.

Az alakváltozásokat tekintve megállapítható, hogy az alumínium ötvözet alakváltozása nagyobb az acélénál, de így sem jelentős az alakváltozás mértéke.

A 2. paraméterkombinációval készült modell hőmérséklet-eloszlását a 4. ábra, alakváltozás-eloszlását a 5. ábra mutatja, az ábrákon szintén az alumínium a felső, az acél pedig az alsó lemez.



4. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a 2. paraméterkombináció esetén.



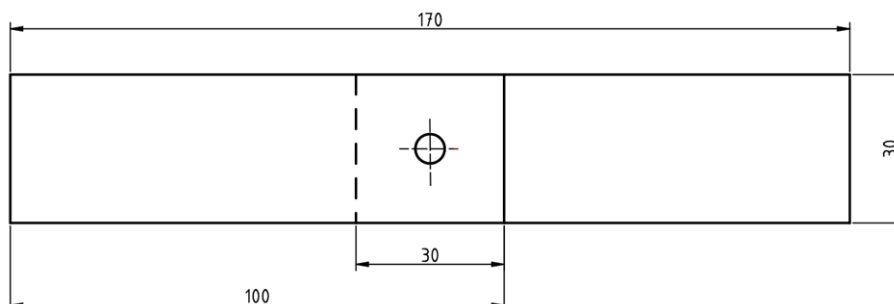
5. ábra. Alakváltozás-eloszlás a 2. paraméterkombináció esetén.

Ennél a munkarendnél a hőmérsékletmező nagyobb kiterjedésűnek mondható, de nem látható számottevő különbség a hőmérséklet értékekben a kemény munkarendhez képest. Az alakváltozás tekintetében viszont már komolyabb eltérések figyelhetők meg. Az alumínium lemez esetében jelentős a keresztmetszet csökkenés, valamint a deformáció mértéke is.

Összességében a kezdeti végeleemes modellezések eredményei alapján elmondható, hogy a kemény munkarend irányában érdemes a paramétereket állítani, ugyanis mind a hőmérséklet, mind az alakváltozás szempontjából ez tűnik kedvezőbbnek. A lágy munkarend komolyabb deformációt fog okozni, mely esztétikailag, valamint valószínűleg mechanikailag is problémás lehet.

4. Kísérleti körülmények

A kísérletekhez 100 mm x 30 mm méretűre daraboltuk az alapanyagokat, amelyeket 30 mm-es átfedéssel illesztettünk egymáshoz a hegesztés megkezdése előtt. A próbatetek kialakítását a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. A vizsgálatokhoz használt próbatetek kialakítása.

A hegesztett kötéselek készítéséhez TECNA 8007 típusú hegesztőgépet használtunk (AC, 50 Hz), TE 550 típusú vezérléssel, a hegesztő erőt pneumatikus munkahenger biztosította. Cu-Al₂O₃ anyagú

elektródot alkalmaztunk, félgömb alakú véggel, amelynek az átmérője 40 mm volt. Ez megegyezett a végeselemes modellezésnél használt elektród kialakítással.

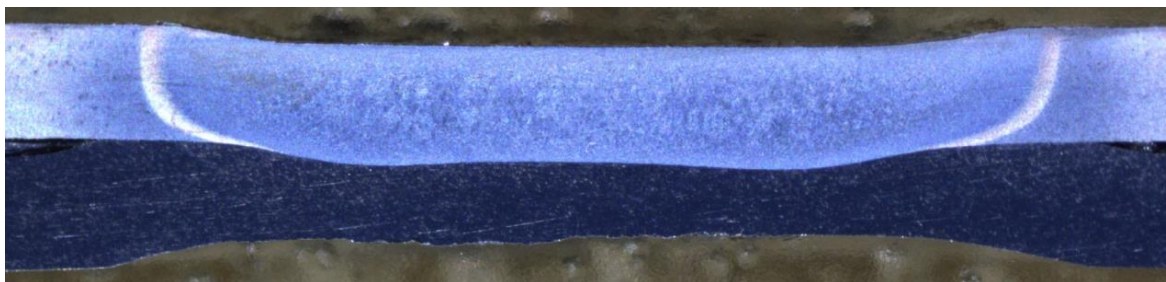
A technológiai paraméterek meghatározásánál figyelembe vettük a végeselemes modellezésnél kapott eredményeket, így elsősorban a kemény munkarend irányában indultunk el, a nagyobb deformációk elkerülése érdekében. A kemény munkarend alapvetően kevés hegesztési időt jelent, 5-6 periódussal próbálkoztunk, de sajnos ezekben az esetekben nem alakult ki kötés és szétestek a lemezek, különböző áramerősségek és hegesztési erők esetén is. A szakirodalmat átolvasva (Wan et al., 2017; Majid et al., 2017) egyértelművé vált, hogy a kötés síkjában intermetallikus vegyületek (IMC) kialakítása cél a hegesztés során és ennek tulajdonságai befolyásolhatják a kötés mechanikai tulajdonságait. Ezen vegyületek kialakulásához pedig időre van szükség, ebből adódóan a lágy munkarend irányába kellett elmozdulni, mégpedig úgy, hogy az komoly deformációkat ne eredményezzen. A végleges paraméterkombinációkat az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat: A végleges technológiai paraméterek.

Alapanyag kombináció	Hegesztési áramerősség [kA]	Hegesztési idő [per]	Hegesztési erő [kN]
5754-H22 / DP800	16,5	11	2,5
6082-T6 / DP800	15	11	2,5

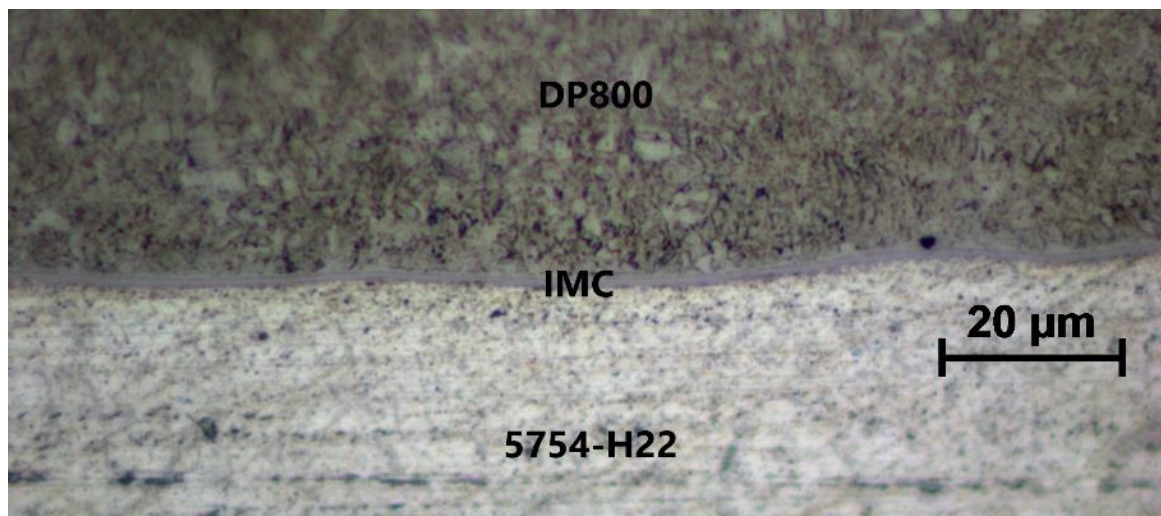
5. Eredmények

A kikísérletezett technológiai paraméterekkel kötéseket készítettünk, amelyeknek először a keresztmetszeti csiszolatát vizsgáltuk meg. A csiszolat maratása meglehetősen nehézkes volt a jelentősen eltérő anyagtulajdonságok miatt. Egy jellemző csiszolati képet mutat a 7. ábra, N = 10x-es nagyításban.



7. ábra. 5754-H22 (alsó lemez) és DP800 (felső lemez) ponthegesztett kötésének makrófelvétele N = 10x-es nagyításban.

Az N = 10x-es nagyítású felvételen nem látszik semmilyen intermetallikus vegyület (IMC) sem a kötés síkjában, ehhez jóval nagyobb nagyításra van szükség. A 8. ábra bemutatja ugyanezen kötés síkját N = 1000x-es nagyításban.



8. ábra. 5754-H22 és DP800 alapanyagok ponthegesztett kötésének kötési síkja.

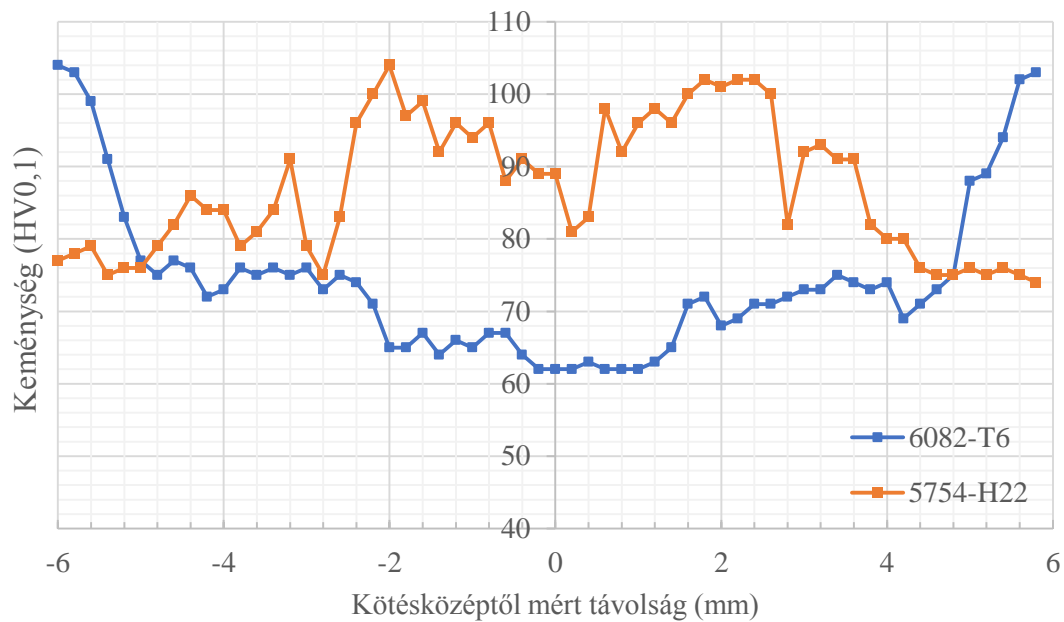
Az ábrán jól látszik, hogy egy nagyon vékony intermetallikus vegyületi réteg (IMC) alakult ki a két lemez között. A szakirodalom szerint (Wan et al., 2017; Gang et al, 2017) ezen réteg tulajdonságai határozzák meg alapvetően a kötés tulajdonságait. Érdemes megvizsgálni a réteg vastagságát, amelynek komoly hatása lehet a mechanikai tulajdonságokra. Ezen réteg vastagsága alapvetően a hegesztési időtől függ, ezért a 6082-T6 / DP800 vegyes kötésből készítettünk nagyobb hegesztési idővel (20 per) is kötések. Ezek után lemértük az IMC vastagságokat a kötés közepén, valamint a két szélétől 1-1 mm-re. Az eredményeket a 6. táblázat foglalja össze, ahol az IMC vastagság1 a kötés bal oldalától 1 mm-re, az IMC vastagság2 a kötés közepén, az IMC vastagság3 pedig a kötés jobb oldalától 1 mm-re lévő IMC vastagságokat mutatja.

6. táblázat. A mért IMC vastagságok

Alapanyag kombináció (hegesztési idő)	IMC vastagság1 [μm]	IMC vastagság2 [μm]	IMC vastagság3 [μm]	IMC vastagság átlag [μm]
5754-H22 / DP800 (11per)	0,53	0,67	0,58	0,59
6082-T6 / DP800 (20 per)	4,83	4,31	4,22	4,45
6082-T6 / DP800 (11 per)	2,83	2,15	2,25	2,41

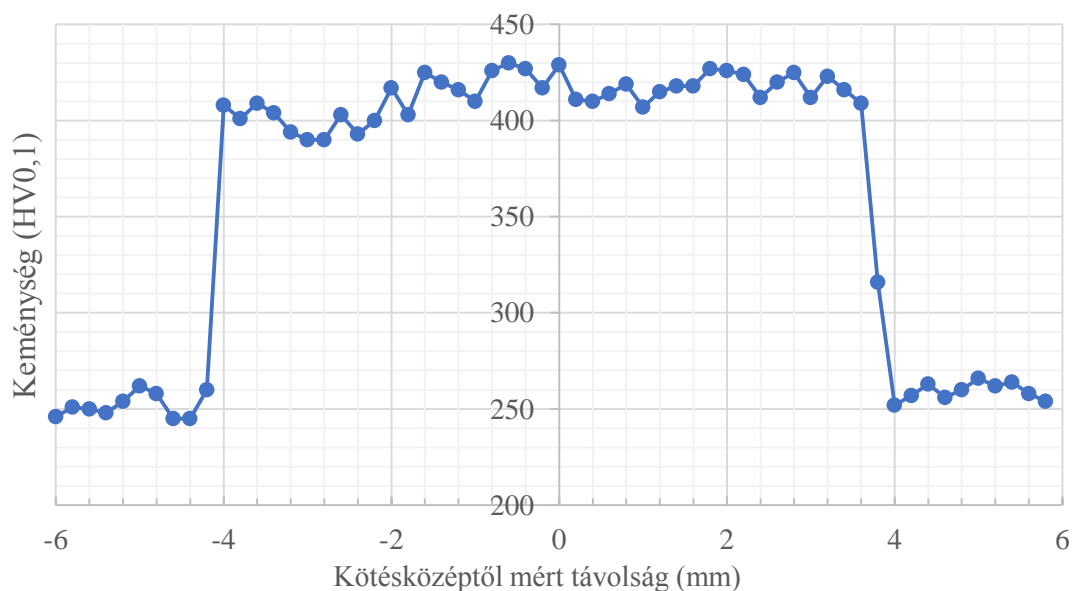
Az értékekből egyértelműen látszik, hogy a 6082-T6 / DP800 anyagpárosításnál az IMC vastagságára jelentős befolyása van a hegesztési időnek. AZ 5754-H22 / DP800 kötésnél jóval kisebb IMC vastagságokat lehetett mérni, mint a másik párosításnál, pedig a hőbevitel értéke még nagyobb is volt ebben az esetben. Az is jól látszik, hogy a mért értékek között komoly különbségek nincsenek egy kötésen belül.

A 11 periódus hegesztési idővel készült 5754-H22 / DP800 és 6082-T6 / DP800 kötések esetében keménységet is mértünk (HV0,1) az alumínium alapanyagban, valamint egy esetben a DP800 acélon is. A keménységeket minden esetben az alapanyag eredeti falvastagságának közepén, azaz a lemezek érintkezési síkjától 0,5 mm-re mértük. Az alumíniumon mért keménységértékeket a 9. ábra, a DP800-as acél esetében mért keménységértékeket pedig a 10. ábra mutatja.



9. ábra. A vegyeskötések alumínium részén mért keménység értékek.

A 6082-T6 ötvözet esetében a várt eredmény született, az alapanyag jelentősen kilágyult, ahogy jellemzően más kötéskombinációnál is ez előfordul (Dobosy et al., 2019; Gáspár et al., 2018). Az 5754-H22 ötvözet esetében inkább keményedésről beszélhetünk, tehát valószínűsíthető, hogy a hőbevitel nem volt annyira nagy, illetve a hegesztési idő nem volt annyira hosszú, hogy kilágyuljon az anyag, viszont az alakítás keményedést okozhatott.



10. ábra. A vegyeskötések DP800 acél részén mért keménység értékek.

A DP800-as acél esetében jelentős keményedés tapasztalható, ahogyan ez egyéb kötéskombinációknál is jellemző (Prém et al., 2017).

Érdekes, hogy a nagyobb vastagságú intermetallikus vegyületben tudunk mérni keménységet, amely a HV 800 – 900 értéktartományban mozog.

Az alumínium - acél vegyeskötéseken nyíró-szakító vizsgálatokat is végeztünk, kvázistatikus terhelés mellett. Mivel a lemezek nem egy síkban helyezkednek el az átlapolt kötés miatt, hajlítófeszültség is fellép a vizsgálat során. Ennek következtében a tönkremeneteli mód lehet kigombolódás, részleges kigombolódás vagy elnyíródás. A kigombolódás során a heglencse teljes mértékben kiszakad az egyik lemezből, míg a harmadik esetben a heglencse elnyíródik a két lemez érintkezési síkjában.

Három kombinációt vizsgáltunk meg a nyíró-szakító vizsgálatok során:

- 5754-H22 / DP800, 11 periódus hegesztési idővel;
- 6082-T6 / DP800, 11 periódus hegesztési idővel;
- 6082-T6 / DP800, 20 periódus hegesztési idővel.

A megbízható eredmények érdekében minden kombinációból 11-11 próbatestet szakítottunk el. Minden esetben mértük a maximális nyíróerőt (F_{TS} [kN]) és a heglencse átmérőjét (d [mm]). A mért adatokból ezt követően kiszámításra került az átlagos nyíróerő (F_{TS}' [kN]) (1), a szórás (SD [kN]) (2) és a szórási együttható (SD_c [%]) (3), valamint a méretezési nyíróerő (F_d [kN]) (4). A számítógépes összefüggések a következők.

$$F_{TS}' = \frac{\sum_{i=1}^n F_{TS}}{n} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{TS} - F_{TS}')^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$SD_c = \frac{SD}{F_{TS}'} \cdot 100 \quad (3)$$

$$F_d = F_{TS}' - 2.23 \cdot \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

A kapott eredményeket a 7. táblázat foglalja össze, összehasonlítva a szakirodalom (Németh et al., 2019; Dobosy et al., 2019) adataival. Az egyes nyíró-szakító értékek mellé zárójelben feltüntettük a tönkremeneteli módokat is (teljes = teljes kigombolódás, részleges = részleges kigombolódás), melyek közül a kigombolódott kötések a 11. ábra is szemlélteti.



11. ábra. Kigombolódott kötések: a.) részleges kigombolódás, b.) teljes kigombolódás.

7. táblázat. A nyíró-szakító vizsgálatok eredményei.

Próbatest	F _{TS} , [kN]				
	5754-H22 / DP800 [11 per]	6082-T6 / DP800 [11 per]	6082-T6 / DP800 [20 per]	6082-T6 (irodalom)	5754-H22 (irodalom)
1	2,5 (részleges)	2,5 (teljes)	2,65 (részleges)	2,55	2,35
2	2,8 (teljes)	2,4 (elnyíródás)	1,7 (elnyíródás)	2,55	2,25
3	2,45 (teljes)	2,8 (részleges)	2,6 (részleges)	2,55	1,8
4	2,3 (részleges)	2,45 (részleges)	2,6 (elnyíródás)	2,45	1,85
5	2,3 (részleges)	2,7 (részleges)	1,6 (elnyíródás)	2,25	2,2
6	2,25 (részleges)	2,5 (elnyíródás)	1,7 (elnyíródás)	2,35	1,85
7	2,5 (elnyíródás)	2,8 (részleges)	2,8 (részleges)	2,35	1,86
8	2,2 (részleges)	2,65 (teljes)	1,3 (elnyíródás)	2,45	2,18
9	2,7 (részleges)	2,2 (részleges)	2,6 (elnyíródás)	2,40	2,17
10	2,3 (elnyíródás)	2,3 (elnyíródás)	2,7 (részleges)	2,35	1,85
11	2,5 (teljes)	2,3 (elnyíródás)	1,75 (elnyíródás)	2,55	2,1
F _{TS} ' [kN]	2,44	2,51	2,18	2,44	2,04
SD [kN]	0,19	0,21	0,56	0,11	0,2
SD _c [%]	7,79	8,21	25,77	4,31	9,85
F _d [kN]	2,31	2,37	1,80	1,94	nincs adat
d [mm]	8,9 – 9,1	8,9 – 9,1	9,1 – 9,4	nincs adat	nincs adat

A 11 periódus hegesztési időt használva mindkét alapanyagkombinációval jó nyíró-szakító erő eredményeket sikerült elérni, amelyek közel azonosak az alumínium-alumínium alapanyag-párosítással kapottal, a 6082-T6 alapanyag esetén. Az 5754-H22 ötvözet hegesztett kötéseivel képest viszont az 5754-H22 / DP800 vegyeskötések jobb eredményeket adtak. A 20 periódus hegesztési idővel készült kötések értékei jellemzően rosszabbak, valamint jelentősebb szórás is mutatkozik. A többi esetben az eredmények szórása a megszokottól kicsit nagyobb, de még elfogadható. A pont átmérője kismértékben szór, a 20 periódus hegesztési idővel készült esetben nagyobb. A hosszabb hegesztési idő nagyobb heglencse átmérőt eredményezett, amelynek a szórása is kicsit nagyobb, mint a többi esetben; a varratméret és a nyíró-szakító erő értékek szórása megnövekszik a nagyobb hegesztési idő alkalmazásával.

A kötések tönkremeneteli módja változó volt, előfordult teljes kigombolódás, részleges kigombolódás, valamint elnyíródás is. Összefüggést a nyíró-szakító erő értékek és a tönkremeneteli módok között egyelőre nem lehetett meghatározni, ez további vizsgálatokat igényel.

6. Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- Az 5754-H22 és 6082-T6 alapanyagok, valamint a DP800-as acél között ellenállás-ponthegesztéssel értékelhető kötések lehet készíteni.
- Az elvégzett vizsgálatok rámutatnak arra, hogy a kötés létrejöttéhez intermetallikus (IMC) vegyületek keletkezésére van szükség a kötés síkjában. A technológiai korlátokat alapvetően ezen vegyületek tulajdonságai adják: a vizsgálatok alapján, ha vastagabb réteg IMC keletkezik, akkor a kötés nyíróereje csökken, de ha nincs ilyen vegyület akkor kötés sincs. Jól beállított technológiai paraméterekkel a lehető legvékonyabb IMC réteg elérésére kell törekedni.
- Az eredmények alapján az is egyértelmű, hogy az IMC képződésének a sebességét/stabilitását befolyásolja az alumínium alapanyag minősége, jelen esetben a 6082-T6 ötvözet alkalmazásával nem sikerült olyan vékony IMC réteget előállítani, mint az 5754-H22 ötvözet esetén.

- Azonos technológiával végzett hegesztés esetén különböző tönkremeneteli módok fordultak elő, aminek oka további vizsgálatokat igényel.

Irodalom

- [1] Németh, G., Kovács, J., Raghawendra, S., Gáspár, M., Jámor, P. (2019). Hőhatásövezeti tulajdonságok fizikai szimulációra alapozott vizsgálata különböző szilárdságú autóiipari alumínium ötvözetek esetén. *Hegesztéstechnika*, 30(2), 41–48.
- [2] Balogh, A., Prém, L. (2013). Ferrit – martensites (DP) acél vékonylemezek ellenállás-ponthegesztetősége. *GÉP*, 64(8), 1–17.
- [3] Alessio, G., Paolo, M., Fabio, D. (2019). Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications. *Metals*, 9(3), 315. <https://doi.org/10.3390/met9030315>
- [4] Bouche, K., Barbier, F., Coulet, A. (1998). Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, (249), 167–75. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00573-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00573-5)
- [5] Wan, Z. X., Wang, H. P., Chen, N. N., Wang, M., Carlson, B. (2017). Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 242, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.017>
- [6] Naoi, D., Kajihara, M. (2007). Growth behavior of Fe₂Al₅ during reactive diffusion between Fe and Al at solid-state temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1-2), 375–82. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.099>
- [7] Gang, Z., Manjiao, C., Yu, S., Jiankang, H., Fuqian, Y. (2017). Analysis and modeling of the growth of intermetallic compounds in aluminum–steel joints. *RSC Advances*, 7, 37797–37805. <https://doi.org/10.1039/C7RA06354G>
- [8] Majid, P. (2017). Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities. *Materials Science and Technology*, 33(15), 1705–1712. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1334310>
- [9] Németh, A., Dobosy, Á., Török, I. (2019). Különböző alumíniumötvözetek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek elemzése. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9(4), 167-181. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.14>
- [10] Gáspár, M., Tervo, H., Kaijalainen, A., Dobosy, Á., Török, I. (2018). The Effect of Solution Annealing and Ageing During the RSW of 6082 Aluminium Alloy. In: Jármái, K., Bolló, B. (Eds), *Vehicle and Automotive Engineering 2. VAE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (1st ed., pp. 694-708). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6_59
- [11] Prém, L., Bézi, Z., Balogh, A. (2017). Development of Complex Spot Welding Technologies for Automotive DP Steels with FEM Support. In: Jármái, K., Bolló, B. (Eds), *Vehicle and Automotive Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (1st ed., pp. 407-423). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51189-4_36
- [12] Gáspár, M., Dobosy, Á., Jámor, P., Kaijalainen, A., Tervo, H., Török, I. (2018). A hőkezelt ségi állapot hatása az AlSi1Mg alumínium ötvözet ellenállás ponthegesztésére. *Hegesztéstechnika*, 29(3), 53–58.
- [13] Dobosy, Á., Török, I. (2019). *Improving the resistance spot welded joint properties on different aluminium alloys*. 72nd IIW Annual Assembly and International Conference, Bratislava, Slovakia, 7 - 12 July 2019.

A GÁZNITRIDÁLÁS IDŐTARTAMÁNAK HATÁSA A KELETKEZETT RÉTEG VASTAGSÁGÁRA

Kuzsella László

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: laszlo.kuzsella@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A vegyi- és a műanyaggyártóipar számos komplex igénybevétel elé állítja az alkalmazott gépalkatrészeket, amelyeket csak komplex felület- és hőkezelő eljárásokkal lehet kielégíteni. Ezen eljárások közül kiemelkednek a termokémiai eljárások, amelyek sorában az egyik legszélesebb körben alkalmazott technológia a gáznitridálás. Jelen publikáció egy olyan vizsgálat sorozat eredményeit mutatja be, amelynek során 34CrAlNi7 jelű, a műanyagiparban széles körben alkalmazott acél gáznitridálása volt a fókuszban. A kutató munka során, azonos további technológiai paraméterek mellett, kétféle kezelési idővel gáznitridált rétegek vastagságát határoztuk meg, mikroszerkezt vizsgálat és keménységmérés segítségével, majd összehasonlítottuk a kétféle módon meghatározott rétegvastagságot.

Kulcsszavak: nitridálás, gáznitridálás, nitridálási idő hatása, 34CrAlNi7 acél

Abstract

The chemical and plastics industries place many complex demands on the machine parts used, which can only be satisfied by complex surface and heat treatment processes. Among these processes, thermochemical processes stand out, of which gas nitriding is one of the most widely used. This publication presents the results of a series of studies in which, investigates the gas nitriding of 34CrAlNi7 steel grade, which is widely used in the plastics industry. The thickness of gas nitrided layers with the same process parameters and two different treatment times is determined by microstructure analysis and hardness measurement, and the depth of the layers determined by the two methods is compared.

Keywords: nitriding, gas nitriding, effect of treatment time on nitriding, CrAlNi7 steel

1. Bevezetés

Gépelemek, gépalkatrészek igénybevétele sok esetben rendkívül összetett. Ezek akár egymásnak ellentmondó többféle szövetszerkeztet is igényelnek. Acélok esetében a kopásállóság általában ridegséggel párosul. A hagyományos, térfogati hőkezelő eljárásokkal, például térfogati edzéssel, vagy martemperálással kopásállóvá tett alkatrészek kevésbé ellenállóak a dinamikus igénybevételekkel szemben. A termokémiai eljárásokkal azonban olyan változó szövetszerkeztet lehet kialakítani, amelynek eredményeként a felületi kopásállóság szívós tömbi tulajdonsággal párosulhat.

2. Termokémiai eljárások

Az acélok felhasználói tulajdonságai a kémiai összetételüktől, szövetszerkezetüktől, valamint a maradó feszültségek nagyságától és eloszlásuk jellegétől függ. A tulajdonságokat ezért valamelyik, vagy egyidejűleg több tényező megváltoztatásával tudjuk módosítani (Kocsisné et al., 2015).

A termokémiai eljárások során ötvöző atomokat juttatunk a tömbanyag felületébe, majd az ötvöző atomok egyedi atommozgással, diffúzióval elindulnak az anyag belsejének irányába.

A termokémiai kezelés során a kéregnövekedés kinetikáját gyakorlati tapasztalatok alapján az (1) egyenlet írja le (Pye, 2003).

$$h = d \cdot \sqrt{t}, \quad (1)$$

ahol,

h : keletkezett kéregvastagság [mm];

d : állandó, értéke függ a hőmérséklettől és a tömbanyag minőségétől [mm/óra];

t : a termokémiai kezelés időtartama [óra].

A termokémiai eljárásokat leggyakrabban a leadó közeg halmazállapota szerint szokás csoportosítani. Eszerint lehet szilárd-, folyékony-, gáz-, és plazmafázisú eljárásról beszélni. Szilárdfázisú eljárások technológiai megvalósításuk szerint a legegyszerűbbek, ezért történetiségüket tekintve ezek alakultak ki a legkorábban, és a legolcsóbb technológiáknak tekinthetők. Folyékony halmazállapotú termokémiai eljárások a legtermelékenyebbek, de a technológia során alkalmazott veszélyes sók következtében, a környezeti terhelés miatt nem túl sok helyen alkalmazzák. A gázközegű eljárások a legelterjedtebbek. Jól szabályozhatók, viszonylag termelékenyek, és környezeti terhelésük sem jelentős. A plazmaállapotú termokémiai eljárások rendkívül gáztakarékosak és jól szabályozhatók, de az üregek és a sarkak, élek dőpolása problémát jelenthet.

Leggyakrabban nemfémes elemeket szoktak a felületbe dőpolni, és ezek közül is szinte kizárólagosan a karbonnal (cementálás), nitrogénnel (nitridálás) és a bórral (boridálás) való kezelés terjedt el.

3. Nitridált anyagminőség

A vizsgált anyagminőség a 34CrAlNi7 acél volt, amelynek számjelölése 1.8550, vagy a BÖHLER szerinti jelölése V820. Króm-nikkel-alumínium ötvöztetésű, nitridálható acél; gyakran használják műanyagfeldolgozó extrudercsigák anyagaként. A vizsgált anyagminőség összetételét a 1. táblázat tartalmazza (Anon., 2022).

1. táblázat. A vizsgált anyagminőség, 34CrAlNi7 kémiai összetétele [tömeg%].

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co	Al
0,36	0,3	0,55	1,7	0,2	1	–	–	–	0,95

4. A vizsgálat során alkalmazott hőkezelések

Termokémiai kezelések esetén a cél, a kopásálló külső kéreg mellett, a szívós belső szövet kialakítása. Ezt egy hőkezeléssel teljesíteni nem lehet. Ezért a termokémiai kezelés mindig komplex hőkezelést, többféle hőkezelési eljárás egymás utáni, tervezett elvégzését jelenti. Nitridálás esetén kétféle hőkezelést szoktak alkalmazni, a feszültségcsökkentő izzítást és a nemesítést. Ebben a vizsgálat sorozatban feszültségcsökkentő izzítás előzte meg a nitridálást.

Az alkalmazott feszültségcsökkentő izzítás során, 2 óra 300 °C/óra-ás hevítést, 2 óra 600°C-os hűntartás követett, majd – a termikus feszültségek elkerülése érdekében – kemencével együtt hűltek a munkadarabok.

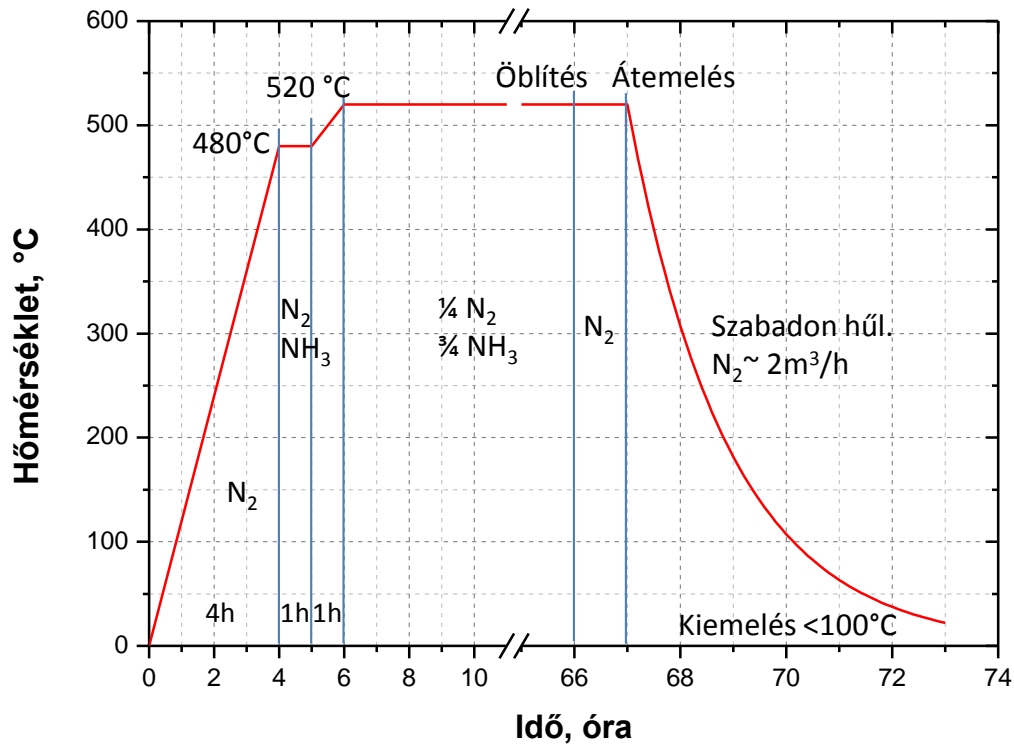
A 60 órás és 120 órás gáznitridálásokra a Csepeli Szerszámedző Kft.-ben, Somogyi János felügyeletével került sor, az 1. ábrán látható aknás retortás kemencékben.



1. ábra. Fűtő és hűtő aknás retortás kemence a Csepeli Szerszámedző Kft.-ben

A 60 órás gáznitridálás hőmérséklet / idő diagramját, a bevezetett gázok típusával és arányával együtt, a 2. ábra mutatja be. A 120 órás gáznitridálás csupán a tényleges gáznitridálás idejében különbözik, sem a hevítés sem pedig a lehűtés időtartama, ideje, az alkalmazott gáz típusa és összetétele nem tért el.

A vizsgálat sorozat során összesen nyolc darab, azonos méretű és korong alakú mintadarabot alkalmaztunk. Ezek hőkezelési állapotuknak megfelelő számjelöléseit a 2. táblázat tartalmazza.



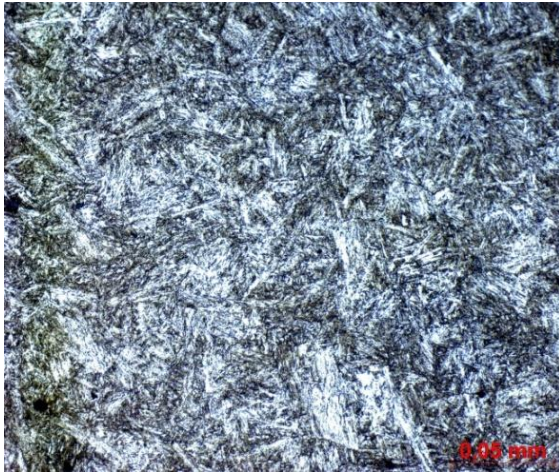
2. ábra. A 60 órás gáznitridálás hőmérséklet-idő diagramja.

2. táblázat. A mintadarabok számjelölése.

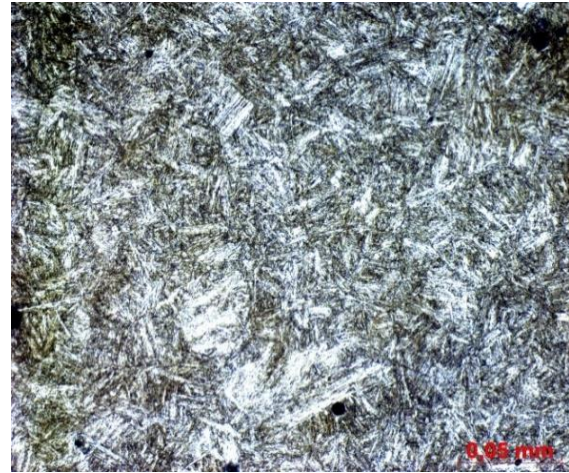
Hőkezeltégi állapot	A mintadarab számjelölése
Alapanyag	1
Feszültségcsökkentő izzítás után	2
Feszültségcsökkentő izzítás és 60 órás gáznitridálás után	3, 4, 5
Feszültségcsökkentő izzítás és 120 órás gáznitridálás után	6, 7, 8

5. Mikroszerkezet vizsgálatok

A feszültségcsökkentő izzítás célja, hogy a szerkezeti elemben lévő feszültséget redukálja úgy, hogy az alkotó anyag szövetszerkezete ne változzon. Ezért, a feszültségcsökkentés eredményének ellenőrzésére érdekében, a szokásos metallográfiai előkészítést, csiszolást, polírozást és maratást követően, fénymikroszkóppal hasonlítottuk össze az alapszövet szerkezetét a feszültségcsökkentett szövetével. Az alapszövetről készült felvétel a 3. ábrán, a feszültségcsökkentett szövetéről készített felvétel pedig a 4. ábrán látható.



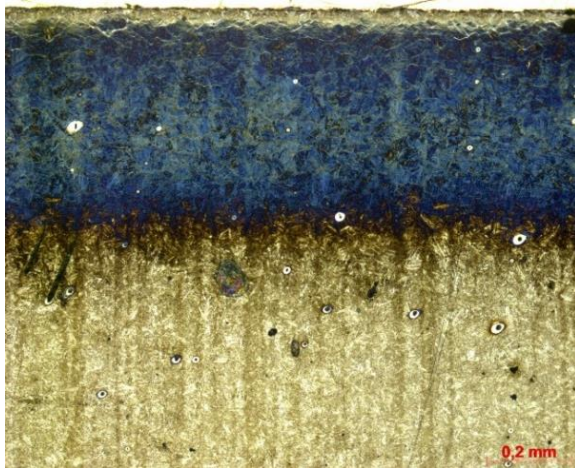
3. ábra. Az alapszövevről készített mikroszkópi felvétel ($N = 500x$, marószerszer: nitál.)



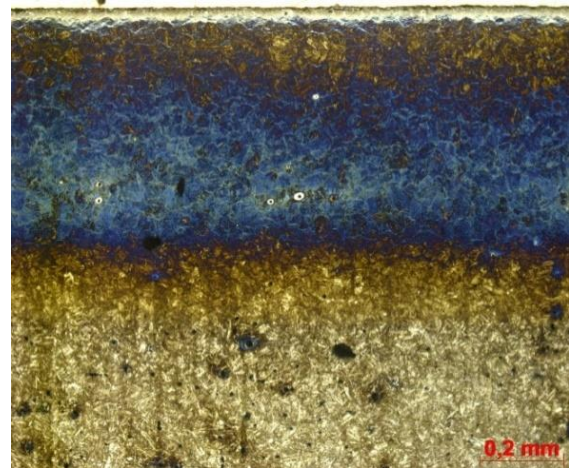
4. ábra. A feszültségcsökkentő izzítás készített mikroszkópi felvétel ($N = 500x$, marószerszer: nitál.)

Nem tapasztalható eltérés az alapszövet és a feszültségcsökkentett szövet mikroszerkezete között a felvételek alapján. Mindkét szövet a vártan megfelelően ferrit – perlites.

Mindkét nitridálás után keresztcsiszolatok készültek a felületekről, és metallográfiai előkészítés után kétféle nagyításban készültek felvételek a mikroszerkezetekről. Kisebb 100x-os nagyításban a teljes nitridált kérget vizsgáltuk, ezeket tartalmazzák a kétféle nitridálási időnek megfelelően az 5. (60 óra) és a 6. (120 óra) ábrák.



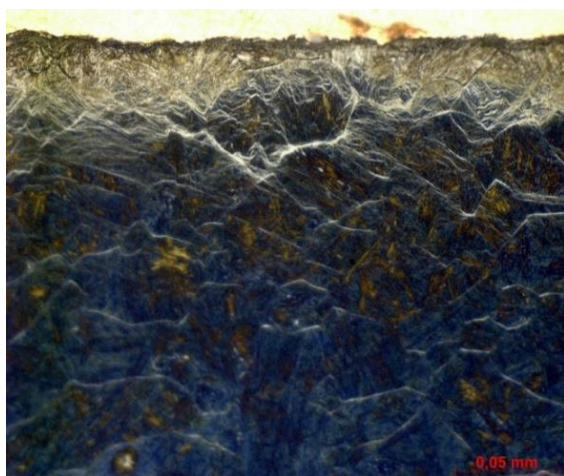
5. ábra. A teljes nitridálódott réteg 60 órás gáznitridálás után ($N = 100x$).



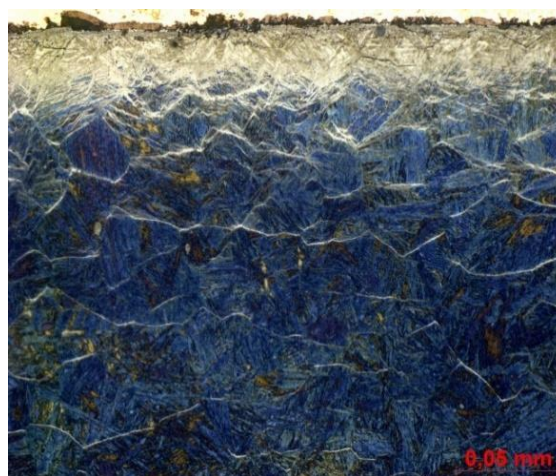
6. ábra. A teljes nitridálódott réteg 120 órás gáznitridálás után ($N = 100x$).

A felvételeken látható, hogy a keresztmetszeteken egyértelműen elkülönülnek az egyes rétegek egymástól. Felül a vegyületi réteg, alatta a színesre maratott diffúziós zóna, ezek együtt alkotják a nitridálódott kéregvastagságot; alattuk pedig az alapszövet.

Nagyobb 500x-os nagyításban a vegyületi réteget vizsgáltuk, ezeket tartalmazzák a kétféle nitridálási időnek megfelelően a 7. (60 óra) és 8. (120 óra) ábrák.



7. ábra. Vegyületi réteg 500 x-os nagyításban 60 órás gáznitridálás után



8. ábra. Vegyületi réteg 500 x-os nagyításban 120 órás gáznitridálás után

Ezekon a nagyobb nagyítású felvételeken megállapítható a vegyületi réteg vastagsága, mind a hat próbatest esetében. A nitridálódott kéreg vastagságának optikai úton való megállapítása nem egy bevett eljárás, helyette a sokkal kevésbé szubjektív, keménységméréssel megállapított nitridálódott kéregvastagság (Nitrided Depth: ND) értéket szokták megadni. Az eljárás egyszerűsége és kézenfekvősége miatt így is megállapítottuk az ND értékét, mind a hat nitridált próbatest (3, 4, 5, 6, 7, 8) esetén. Az eredmények statisztikai feldolgozását tartalmazza a 3. és a 4. táblázat.

3. táblázat. A mikroszerkezet vizsgálattal meghatározott nitridált kéregvastagság és vegyületi kéregvastagság 60 órás gáznitridálás után.

Mintadarabok sorszáma	3		4		5	
Mennyiség	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]
Átlag [mm]	0,60	62,11	0,61	58,51	0,60	57,12
Szórás [mm]	0,017	6,869	0,009	5,687	0,024	6,608
Variancia együttható [%]	2,8	11,1	1,5	9,7	3,9	11,6
Mennyiség	Kéregvastagság				Vegyületi kéreg vastagsága	
Átlag [mm]	0,603				59,25	
Szórás [mm]	0,0058				2,575	
Variancia együttható [%]	0,096				4,35	

4. táblázat. A mikroszerkezet vizsgálattal meghatározott nitridált kéregvastagság és vegyületi kéregvastagság 120 órás gáznitridálás után.

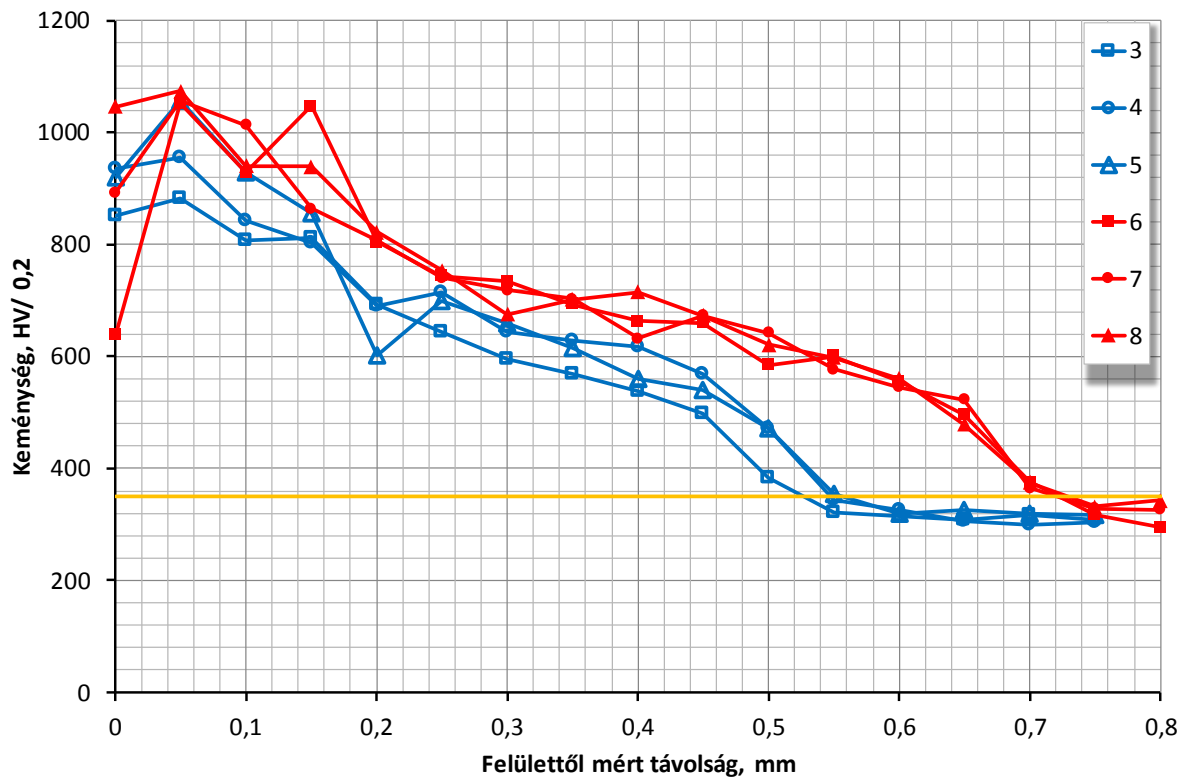
Mintadarabok sorszama	6		7		8	
Mennyiség	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]	Kéregvastagság [mm]	Vegyületi kéreg vastagsága [μm]
Átlag [mm]	0,74	58,17	0,73	58,19	0,76	58,35
Szórás [mm]	0,021	5,161	0,019	6,294	0,047	8,686
Variancia együttható [%]	2,8	8,9	2,6	10,8	6,2	14,9
Mennyiség	Kéregvastagság				Vegyületi kéreg vastagsága	
Átlag [mm]	0,743				58,24	
Szórás [mm]	0,0153				0,099	
Variancia együttható [%]	0,205				0,17	

6. Keménységvizsgálat

A nitridálódott kéregvastagságot objektíven, és a szokásos eljárásnak megfelelően, a nitridált próbatest keresztcsiszolatán, a felülettől mért távolság függvényében, a keménységlefutáson lehet megállapítani. A keménységvizsgálatok során Vickers-típusú keménységvizsgálatot végeztünk, hogy a viszonylag kis terhelőerőnek köszönhetően, egymáshoz közeli lenyomatokat lehessen készíteni, ezáltal nagyobb felbontásban kapható meg a keménységlefutás. Ezért a vizsgálatokat 200g-os terheléssel, 50 μm-es lépésközökkel végeztük. A lenyomatok számát az határozta meg, hogy amikor 3...5 keménységérték közel azonos, az azt jelenti, hogy elértük azt a rétegmélységet amelyben a nitridálásnak már nem volt hatása, vagyis nincs értelme több keménység lenyomat készítésének. Átlagosan húsz lenyomat készült egy keménységlefutás meghatározásához.

A hat próbatesten meghatározott keménységlefutást tartalmazza a 9. ábra. A 60 órán keresztül gáznitridált próbatestek (3, 4, 5 jelű próbatestek) keménységlefutásai kék színnel és üres jelölökkel, a 120 órán keresztül gáznitridált próbatestek (5, 7, 8 jelű próbatestek) keménységlefutásai pedig piros színnel és teli jelölökkel kerültek ábrázolásra.

Az ND értékét az alapanyag keménységétől 50 HV-vel nagyobb keménységérték felülettől mért távolságának függvényében szokás megállapítani. Az alapanyag átlagkeménysége 300 HV/0,2 volt, ezért az átlagkeménység + 50 HV/0,2 = 350 HV/0,2 értékre adódott. Ez az értéket sárga színű vonal jelöli a diagramban.



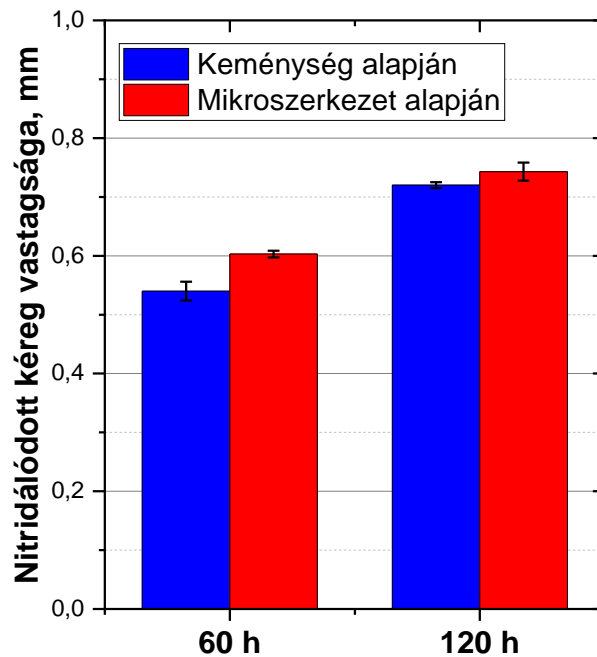
9. ábra. A keménységlefutás a felülettől mért távolság függvényében.

A diagramon megállapított ND értékeket és azok statisztikai kiértékelését az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat. Próbatetek keresztcsiszolatán meghatározott kéregkeménység, alapanyag keménység, illetve ND értékek

Próbatest száma	3	4	5	6	7	8
Kéreg keménység, HV/0,2	852,7	936,1	919,7	638,9	892,6	1047
Alapanyag keménység, HV/0,2	289,6	272,5	303,9	302,4	321,7	320
ND [mm]	0,527	0,547	0,558	0,722	0,72	0,73
ND átlag [mm]	0,54			0,72		
ND szórás [mm]	0,016			0,005		
ND variancia együttható [%]	2,89			0,73		

A keménységmérés alapján és az optikai módon meghatározott nitridálódott kéregvastagság összehasonlítását a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra. A nitridálódott kéreg vastagságának összehasonlítása a kétféle meghatározás alapján 60, illetve 120 órás nitridálás után.

A kéménységmérés és a mikroszerkezet alapján meghatározott nitridálódott kéregvastagság közül a mikroszerkezetből meghatározott érték mind a két esetben nagyobb. Ez abból adódhat, hogy optikai módon a színesre maródott diffúziós zóna aljának és az alapszövet a határának a felülettől mért távolságát határozzuk meg, míg keménységmérésből az alapszövet felett 50 HV/0,2-vel adjuk meg a ND távolságát.

7. Összefoglalás

A gáznitridálás időtartamának hatását vizsgáltuk a keletkezett rétegvastagság nagyságára, 34CrAlNi7 jelű acél esetén.

A termokémiai kezelést megelőzően minden mintadarabot azonos feszültségcsökkentő izzításnak vetettük alá, a megelőző hőkezelések és megmunkálások hatásának csökkentése érdekében. Mikroszerkezet vizsgálattal megállapítható, hogy a szövetszerkezetben nem történt változás a feszültségcsökkentés hatására.

Kétféle nitridálási időt választottunk, egy 60 és egy 120 órás kezelést, és mindkét esetben 3-3 társát nitridáltunk.

A keletkezett kéreg mikroszerkezet vizsgálattal és keménységméréssel lettek minősítve. Mind a két fajta vizsgálat során ugyan olyan mintaelőkészítést, sőt ugyan azokat a próbatesteket használtuk.

A mikroszerkezet vizsgálatból a nitridálódott kéregvastagságot és a vegyületi réteg vastagságát határoztuk meg. 60 óra nitridálás után az ND érték $0,603 \pm 0,006$ mm, a vegyületi réteg vastagsága pedig $59,25 \pm 2,58$ μm . 120 órás nitridálás után az ND érték $0,743 \pm 0,015$ mm, a vegyületi réteg vastagsága pedig $58,24 \pm 0,10$ μm . Vagyis a vegyületi réteg vastagsága nem változott jelentősen, a nitridálódott réteg vastagsága pedig körülbelül 23%-kal növekedett meg.

A keménységvizsgálattal megállapított nitridálódott kéregvastagság 60 óra után $0,54\pm 0,016$ mm, 120 óra nitridálás után pedig $0,72\pm 0,005$ mm. A rétegnövekedés ebben az esetben körülbelül 33%.

A mikroszerkezet vizsgálattal megállapított rétegvastagság mind a két kezelési idő esetében nagyobb volt, mint a keménységméréssel megállapított kéregvastagság.

Irodalom

- [1] Cserjésné, S. Á., Frigyik, G., Kocsisné, B. M., Kuzsella, L., Marosné, B. M., Szabó, E., Szilágyiné, B. A. (2015). *Nitridálás, korszerű eljárások és vizsgálati módszerek*. Kocsisné, B. M., Marosné, B. M., Szilágyiné, B. A. (szerk.). Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [2] Pye, D. (2003). *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*, ASM International.
- [3] Anon. (2022). <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/australia/app/uploads/sites/72/2018/03/V820> (letöltés dátuma: 2022. 12. 07.)

NÖVELT HŐKAPACITÁSÚ, ENERGIATAKARÉKOS BELTÉRI BEVONATOK KVÁZI GRADIENS ÉPÍTŐELEM FEJLESZTÉSÉHEZ – BAZALTSZÁLAS ÁSVÁNYI HIDRÁTOK ÉS LOW-E ANYAGOK

Fülöp Fruzsina

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, fulop.fruzsina@uni-miskolc.hu

Marosné Berkes Mária

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, maria.maros@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az épületek energiafelhasználásának hatékonyságát javító megoldások egyike az ún. kvázi-gradiens épületelemek használata, amelyek fontos elemei a külső- és belső felületeken alkalmazható energiatakarékos szigetelési megoldások. A külső bevonatok tekintetében bőséges a szakirodalom, míg a beltéri alkalmazásokra vonatkozóan jóval kevesebb a tapasztalat és a források száma, amelyek elsősorban angol nyelven érhetők el. A cikk célja, hogy rendszerezett szakirodalmi áttekintést adjon – magyar nyelven – azokról a fejlesztés alatt álló, vagy elterjedőben lévő környezetbarát és energiatakarékos építészeti megoldásokról, amelyeket az épületek belső tereinek végfelületein alkalmazhatunk. Ebben a munkában a bazaltszálalás ásványi-hidrát kompozitok és az alacsony hőkibocsátású anyagok témakörét tárgyaljuk részletesen, míg az újrahasznosított alapanyagok és az egyre népszerűbb fázisváltó anyagok egy kapcsolódó cikk keretében kerülnek ismertetésre.

Kulcsszavak: LCA (Life Cycle Assessment), energiatakarékos beltéri bevonat, bazaltszálalás kompozit, beltéri low-E bevonat

Abstract

One of the architectural solutions that improve the efficiency of energy use in buildings is the so-called quasi-gradient building elements, among the others the energy-saving insulation solutions that can be applied to external and internal surfaces. There is a great choice of literature on exterior coatings, whereas much less experience and literature are available for indoor applications, which are primarily found in English. The current article aims at providing a systematic literature overview – in Hungarian – on the environmentally friendly and energy saving architectural solutions being under development, or spreading, which can be applied to the end surfaces of the interior spaces of buildings. The article discusses the topics of basalt fiber mineral-hydrate composites and low heat emission materials in detail, while recycled materials and the increasingly popular phase change materials are described in a related article.

Keywords: LCA (Life Cycle Assessment), energy-saving interior surface finish, basalt fiber composite, indoor low-E coating

1. Bevezetés

Az energiafelhasználás csökkentésére vonatkozó követelmények kidolgozása és betartása, azt ezt szolgáló műszaki megoldások fejlesztése és innovációja talán még soha nem volt olyan fontos és aktuális, mint napjainkban. Energiamegtakarítást számtalan területen érhetünk el, kezdve a járművek üzemanyag felhasználásának csökkentésétől, az anyagok, termékek előállításával kapcsolatos ipari technológiai folyamatok során felhasznált energia mennyiségének, az elektromos árammal működő használati eszközök, gépek, informatikai rendszerek energiaigényének, a világításra vagy az épületek fűtésére vagy éppen lehűtésére fordítandó energia mennyiségének csökkentéséig.

Az épületekhez társítható energiafelhasználásnak és energiavesztésnek a globális energiafogyasztásra gyakorolt hatása jól ismert, amely hosszú ideje stratégiai jelentőségű szakmai elemzések tárgyát képezi. Az épületeket határoló szerkezeti elemek burkolatának sajátosságai – beleértve azok szerkezeti kialakítását, anyagát, hőfizikai jellemzőit – lényeges szerepet játszanak a fűtésre és hűtésre felhasznált energia mennyiségének alakulásában.

A korszerű építészeti megoldások, mint például az intelligens, előgyártott betonelemek, az energiatakarékos épületszerkezeti elemek iránti igényt sokoldalúan próbálják kielégíteni (Mardiguián–Caron-Fellens, 2017). A fejlesztések két jelentős fókuszterületét képviselik az úgynevezett gradiens, vagy kvázi-gradiens szerkezeti elemek, valamint a környezetbarát módon, természetes- vagy újrahasznosított alapanyagok felhasználásával készülő tartó- és épületszerkezeti elemek.

Kvázi-gradiens tartó- és épületszerkezeti elem fogalma alatt az egy szerkezeti egységen belül változtatható tulajdonságú, inhomogén szerkezeti elemeket értjük. Ezek különféle betontermékek lehetnek. Példa erre a könnyűbeton (Thienel et al., 2020), a hagyományos beton, az idegen anyagú armírozással készülő betontermékek, amelyeket erősíthetünk szénzállal (Chen–Chung, 1993), üvegszállal (Balaguru–Shah, 1992), üveghabbal (Kasza et al., 2019), bazaltszállal (High et al., 2015), vagy mineralizált cellulózfonattal (Balea et al., 2019), továbbá ide sorolhatók a vasalt betonból, vagy vasbeton felhasználásával készülő elemek.

Az épületburkolatok korszerű, energiatakarékos megoldásai kulcsszerepet játszanak az épületek energiahatékonyságának javításában. Emellett jelentős hatással lehetnek a városi környezetre is, befolyásolva a városban kialakuló hőszigetek sajátosságait, módosítva a helyi mikroklímát (Alonso et al., 2017).

A beton szerkezeti elemekből álló épületek beltéri falazatán gyakran bevonatokat, vagy módosított összetételű, szerkezetű és tulajdonságú belső vakolati réteget alkalmaznak, annak érdekében, hogy a felhasználói tulajdonságokat az egyre növekvő igényeknek megfelelően tovább javítsák. Az ezirányú folyamatos anyag- és hozzá kapcsolódó technológia fejlesztés eredményeként új anyagok, technológiai megoldások látnak napvilágot. Bármilyen irányú is legyen a fejlesztés, a munka elméleti megalapozásához ismerni kell a legújabb szakmai trendeket. Ennek legcélszerűbb módszere a vonatkozó szakirodalom áttekintése és a kívánt fejlesztés irányok ez alapján történő kijelölése.

A cikkben közölt szakirodalmi áttekintés célja a betonszerkezetek falazatának belső oldali, korszerű bevonataival szemben támasztott követelmények és az ezek kielégítésére irányuló nemzetközi fejlesztési irányok áttekintésével egy magyar nyelven elérhető szakmai összefoglaló közreadása.

A bemutatott munka szorosan kapcsolódik a Miskolci Egyetem és az Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Kft. (ÉMI) szakembereinek együttműködésével végzett azon kutatásokhoz, amelyek a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” című (GINOP-2.3.4-15-2016-00004) projekt keretében „Az innovatív és környezetbarát beton

szerkezeti elemek LCA-alapú fejlesztése másodlagos nyersanyagok, illetve hulladék újrahasznosításával” témakörben, a Modern anyagtechnológiák (RP2) részprojekt keretében valósultak meg (Marosné Berkes–Fülöp, 2020).

2. Betonból készült szerkezeti elemek beltéri bevonatai

2.1. A beltéri bevonatokkal szemben támasztott követelmények

A kvázi gradiens építőelemek beltérrel érintkező felületén különféle bevonatokat alkalmazunk annak érdekében, hogy a lakótérben élők megfelelő komfortérzetét biztosítsuk. Ennek megfelelően számos felhasználói elvárás kell kielégíteni. Emellett reális elvárás, hogy a bevonatok előállítási technológiája műszakilag könnyen megoldható és gazdaságosan kivitelezhető legyen. Mindezek következtében a bevonatokkal szemben igen összetett követelményrendszert fogalmazzunk meg.

A bevonatok felhasználás szempontjából elvárt legfontosabb tulajdonságai a következők.

- A bevonat növelt, $c_p > 1,2$ kJ/kgK hőkapacitású legyen, ily módon képes legyen a hőt a belső tér irányában visszaverni.
- A száradás után minimális mértékben zsugorodjon, elkerülve a repedések képződését, továbbá a falazóelemek illesztésénél esztétikus, összefüggő felületet alkosson.
- Nagy páratartalmú helyiségekben képes legyen a páraszigetelésre, emellett képezzen vízlepergető és aktív penészedésgátló felületet.
- Az egyre szigorodó biztonsági előírásokat kielégítve megfelelő tűzállóságú legyen, amelyet az A1, A2, B2 tűzállósági kategóriájú termékek elégitenek ki.
- Lehetőség szerint a bevonat képezzen építészeti végfelületet, vagyis ne legyen szükség festésre, utókezelésre. A felület lehet rusztikus, de síkhatású.
- Az esztétikai szempontok kielégítése megoldható a kész felületek utólagos festésével, vagy különféle felületmódosító beavatkozásokkal is.

A kivitelezés során megkívánt technológiai sajátosságok pedig az alábbiak.

- A bevonati réteg kellő mértékű beszívódása a betonba, vagyis képes legyen átítatni a felszínközeli tartományokat, és alkosson összefüggő réteget a látható felületen.
- A bevonat kiválasztásakor figyelembe kell venni a felvitelhez alkalmazott technológiát. A bevonat kiinduló halmazállapota optimális esetben folyékony, amely lehetővé teszi, hogy a felületközeli rétegekbe kellő mélységben behatoljon, kitöltse a pórusokat, majd megszilárdulást követően kellő vastagságú külső réteget képezzen.
- A kívánt teljes rétegvastagságot úgy kell meghatározni, hogy biztosítsuk a bevonat megfelelő mértékű hőtárolását. Az aktív hőtároló zónaként funkcionáló bevonatok vastagsága ideálisan 25-35 mm.
- A bevonat a felhordás után töltse ki a falfelület kisebb egyenetlenségeit, mikroszkopikus hézagait, fedje el és tömítse a jellemzően meglévő hajszálrepedéseket.
- Az elért testűrűség 900-1600 kg/m³ között a legkedvezőbb.
- A bevonattal szembeni további elvárás, hogy az LCA, azaz a termékek teljes élettartamára vonatkozóan fenntartható környezetvédelem és újrahasznosítás szempontjainak is

megfeleljen, azaz ne okozzon számottevő környezeti terhelést (korlátozott vegyianyag tartalom) és a kapcsolódó előállítási technológia is környezetbarát legyen.

2.2. A beltéri bevonatok jellegzetes károsodási módjai

A bevonatok ipari alkalmazása során bekövetkező leggyakoribb hibák és azok megoldási lehetőségei röviden az 1. táblázat szerint foglalhatók össze (Bayer–Zamanzadeh, 2004).

1. táblázat. A betonok beltéri bevonatainak jellegzetes károsodási módjai.

A hiba megnevezése	A hiba oka	A hiba kiküszöbölése
megfolyás	túlzott mértékű festék felvitele a függőleges falfelületre;	csiszolás, szükség esetén újrafestés
leválás (száraz darabokban)	a bevonat gyenge tapadása az alatta lévő réteghez	bevonatolás előtt a felszín érdesítése csiszolással
hólyagosodás (lokális felválás)	levegő vagy víz került a bevonat/festék alá	a festék visszacsiszolása, alapos kiszáritása
foltosodás	festékeknel előforduló esztétikai probléma	foltosodás gátló spray használata
bőrösödés (oldószer alapú festékeknel)	az előző rétegben oldószer maradt a következő réteg felvitele előtt	leccsiszolás, újrafestés

A bevonat anyagának, illetve töltőanyagának kiválasztásakor célszerű figyelembe venni ezeket a károsodási jelenségeket és lehetőség szerint kerülni őket.

2.3. Beton szerkezeti elemek beltéri felületein alkalmazható bevonatok

A beltéri bevonatok áttekintésekor külön figyelmet fordítottunk arra, hogy az alkalmazott töltőanyagok tekintetében is szem előtt tartsuk a környezetvédelmi szempontokat. Ily módon a bevonatok három nagy csoportját különítettük el:

- újszerű anyagok és anyaggárosítások felhasználásával kifejlesztett bevonatok;
- újrahasznosított alapanyagok alkalmazásával készült bevonatok, habarcsok;
- természetközeli anyagok alkalmazásával készült bevonatok.

LCA szempontból mindhárom kategória kiemelt jelentőségű, emellett az alkalmazásukkal elérhető energiamegtakarítás és költségcsökkentés is számottevő.

2.4. Újszerű anyagok és anyaggárosítások a beltéri építészeti végfelületeken

2.4.1. Bazalt szálas ásványi-hidrát kompozit szigetelőanyag

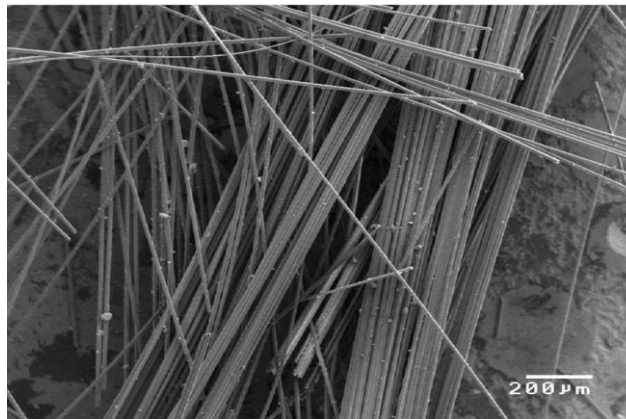
Az épületen belüli hőenergia felszabadulásának szabályozására az épületszigetelő anyagok a legalkalmasabbak. Ezek többsége két nagy csoportba, a szervetlen és a szerves szigetelőanyagok

csoportjába sorolható. Az előzőek kedvező tulajdonságai közé tartozik a kiváló hőszigetelő képesség és az alacsony előállítási költség, míg az utóbbiak előnye a rendkívül korlátozott gyúlékonyság, nagyobb szilárdság, földrengéssel szembeni biztonság, amelyek azonban nagyobb költségekkel és kedvezőtlenebb megmunkálhatósággal társulnak. Ugyancsak hátrányuk, hogy a vízre érzékenyek.

Az ALC (Autoclaved Lightweight Concrete = autoklávozott könnyűbeton) egy tipikus képviselője az épületek külső és belső falazatához használt könnyűbetonoknak (Jae-Wan et al., 2016). A vizsgált ALC beton egy piacon kapható, a kis súly érdekében körülbelül 50-70% pórust tartalmazó beton, amelynél a gyúlékonysággal szembeni ellenállást megfelelő szervesetlen anyagokkal (mész, cement), míg a víztaszítást, és ezzel a szigetelő képességet különféle adalékokkal biztosítják. Az ALC-hez hasonló hidrotermikus szigetelő anyagokat – ásványi-hidrát szigetelőanyagokat – már gyártanak és használnak Európában (Seo, 2013), (Jerman–Černý, 2012).

Az említett szigetelőanyagoknak azonban van egy komoly hátránya, a nagy pórusmennyiség miatt csökken a szilárdságuk. A probléma egyik lehetséges megoldása, ha az alapanyaghoz olyan szervesetlen szálakat adunk, amelyek képesek ellenállni a nagyhőmérsékletű hidrotermikus szintézis körülményeinek, emellett jelentősen nagy a rugalmassági modulusuk és a szakítószilárdságuk is.

Jae-Wan és munkatársai bazaltszálakat alkalmaztak az ásványi-hidrát szigetelőanyagok szilárdságának javítására (Jae-Wan et al., 2016), amely olcsóbb, mint az elterjedten alkalmazott üvegszálak vagy szénszálak, ezért számos olyan területen – például autóiipari alkatrészek, könnyű építőanyagok, nem gyúlékony belső anyagok, tűzfüggönyök – alkalmazzák, ahol megfelelő szilárdság szükséges. A kísérleti anyagot és jellemzőit jelen cikk szerzői tanulmányukban (Marosné Berkes–Fülöp, 2020) részletesen ismertetik, míg az alkalmazott bazaltszál mikroszerkezetét az 1. ábra, mechanikai és hőfizikai tulajdonságait pedig a 2. táblázat mutatja be. Ez utóbbiból kitűnik, hogy a bazaltszál merevebb és szilárdabb, mint az üvegszál, így alkalmas lehet arra, hogy ásványi-hidrát szigetelőanyagok erősítőanyagként hasznosítsák.



1. ábra. A bazaltszál mikroszerkezete (Jae-Wan et al., 2016).

A szerzők különböző mennyiségű erősítőszálakat tartalmazó mintákat készítettek 0,1% és 1% közötti bazaltszál tartalommal, majd vizsgálták azok mikroszerkezetét, mechanikai és hőfizikai tulajdonságait.

Megállapították, hogy az adalékmentes szigetelőanyag mikroszerkezetét főként zárt pórusok alkotják, egyenletes vastagságú pórusfalakkal (2/a) ábrarészlet) és hasonló pórusszerkezetet mutat a 0,4% bazaltszál tartalmú minta is, így az azbesztszálak képesek voltak a pórusfalakhoz kötődni (2/b) ábrarészlet).

2. táblázat. A bazaltszál és az üvegszál tulajdonságai (Jae-Wan et al., 2016), (Li et al, 2018).

Tulajdonság	Mértékegység	Bazalt	Üveg
Alkalmazási hőmérséklet	°C	-260 ÷ 900	-60 ÷ 400
Olvadáspont	°C	1450	1050
Hővezetési tényező	W/(m·K)	0,031 ÷ 0,038	0,034 ÷ 0,04
Szakítószilárdság	MPa	2500 ÷ 4800	2400 ÷ 3400
Szakadási nyúlás	%	3,1-3,2	4,7-4,8
Rugalmassági modulus	GPa	89	77

Ezzel szemben az 1,0% bazaltszál tartalmú minta esetében a beépített rostok már áthatolnak a pórusokon is, és gyakorta agglomerálódnak (összetapadnak), aminek következtében vastag és egyenetlen vastagságú pórusfalak jönnek létre (2/c) ábrarészlet), ugyanis a nagy mennyiségű száladalék gátolja az iszap duzzadását a keverés kezdeti szakaszában és összességében a zárt pórusok helyett egy nyílt pórushálózat alakul ki.



a) Adalékmentes minta b) 0,4% bazaltszál tartalmú minta c) 1% bazaltszál tartalmú minta

2. ábra. Az ásványi hidrátok mikroszerkezetének SEM felvételei (Jae-Wan et al., 2016).

A megfigyelt szerkezettel szoros összefüggést mutatott a minták nyomószilárdsága, amely az adalékmentes mintán mért 0,19 MPa-ról az adalék 0,4%-ig tartó fokozatos növelésével, 0,24 MPa-ra nőtt, majd 0,5%-nál nagyobb mennyiségű száltartalom esetén csökkent és az adalékmentes minta szilárdsága alatt maradt. A jelenség magyarázata, hogy az agglomerációs tartományok egyfajta anyaghibaként viselkednek.

A hővezetési tényező értéke valamennyi minta esetén a 0,043 ÷ 0,048 W/m·K tartományba esett és analóg módon változott a nyomószilárdsággal. Így 0,4% rosttartalomig kedvezően változott, azaz csökkent, majd a szálak ennél nagyobb mennyiségű adalékolása esetén romlott, azaz növekedett. A minták sűrűsége körülbelül 0,11 g/cm³ volt, és a vizsgált határok között változtatva a bazaltszál mennyisége nem befolyásolta számottevően az értékét.

Zhou és munkatársai a bazaltszálak a beton szívósságára és repedéssel szembeni ellenállására gyakorolt jelentős kedvező hatását igazolták (Zhou et al., 2020). Emellett kimutatták, hogy a bazaltszál a nyomószilárdságot kevésbé képes növelni, mint a szakítószilárdságot és a hajlítószilárdságot. Hasonlóan a Jae-Wan és munkatársai által kapott eredményekhez (Jae-Wan et al., 2016), a legkedvezőbb szilárdsági és szívóssági értékeket 0,3% és 0,4%-os bazalt tartalommal érték el.

Egy másik tanulmány szerint (Sim et al., 2005), annak ellenére, hogy a bazaltszál szerkezet erősítő hatása gyengébb lehet, mint a szén- vagy üvegszálaké, a bazaltszálak a betonszerkezetek fontos erősítő anyagai, amikor egyidejűleg mérsékelt szerkezeti megerősítésre és magas tűzállóságra ($T > 600\text{ °C}$) van szükség. Ilyen esetekben ugyanis az üvegszál és a szénszál elveszti a szilárdságát és térfogati integritását.

A bazaltszállal erősített hőszigetelő anyagok nagy hőmérsékletű, ipari alkalmazása esetén pedig az ilyen kompozitokban szokásosan használt szintetikus kötőanyagokat célszerű szaponit tartalmú ásványi kötőanyagra (SCM) cserélni, a hőállóság megtartása érdekében (Drozdnyuk et al., 2016).

Összességében megállapítható, hogy a bazaltszál hatékonyan növelheti az ásványi-hidrát szigetelőanyagok szilárdságát és csökkentheti a hővezetési tényezőjét, de az adalék mennyiségét megfontoltan kell megválasztani a túlzott mennyiségű ásványi szál okozta szerkezeti degradáció elkerülése céljából.

2.4.2. Alacsony hőkibocsátású (low emissivity) anyagok

A különféle anyagok a hőmérsékletük függvényében hőt (infravörös sugárzást) bocsátanak ki magukból. A kisugárzott energia nagysága függ a sugárzás frekvenciájától/hullámhosszától, amit spektrális emisszióképességnek nevezünk.

Az úgynevezett alacsony emisszivitású (low-E) anyagok fő feladata a hősugárzás révén megvalósuló hőátadás csökkentése. Ezenkívül, a napfény- és a teljes napsugárzási energia átteresztőképességére (SHGC= Solar Heat Gain Coefficient: napsugárzás hőnyereségi együtthatóra) is hatással vannak (Jelle et al., 2017). Az alacsony emisszivitás úgy valósul meg, hogy az anyag hővisszaverő képességének növelésével a hőszigetelő-képessége nő, akár kétszeresére is. Az alacsony emisszivitású anyagokba, bevonatokba jutó energia nehezen képes abból sugárzással eltávozni, vagyis a felületről emittálódni. Az alacsony emisszivitású anyagok szinte észrevétlenül teljesítik a hőkomfort-igényeket.

Az anyagok emisszivitását a fekete testéhez hasonlítjuk, amelynek emisszivitása $\varepsilon = 1$, azaz adott hőmérsékleten 100%-ban kibocsátja azt a hőmennyiséget, amely a Planck-féle sugárzási törvény szerint várható. Alacsony emisszivitásról $\varepsilon \leq 0,15 \div 0,2$ értéknél beszélünk (Ibrahim et al., 2018), (Pintér, 2019).

Az építőiparban használt burkolóanyagok emissziós tényezője döntően a 0,85-0,95 tartományba esik, tehát használatuk jelentős hővesztéssel járhat. A legkedvezőbb, azaz legkisebb emissziós tényezőjű anyagok ($\varepsilon = 0,7-0,8$) mint a papír, vagy a bőr viszont csak korlátozottan alkalmasak építészeti feladatokra. A közvetlenül utánuk álló különféle fém-oxidok ($\varepsilon < 0,8$) hasznosításának lehetőségére vonatkozó kutatások a legfrissebb szakirodalmakban már megtalálhatók (Le et al., 2013), (Leftheriotis–Yianoulis, 1999), (Reidinger et al., 2019). Egyes vakolatok emissziós tényezője szintén ezekhez közeli ($\varepsilon = 0,8$), de ilyen hőemisszió mellett a sugárzással elvesztett hő- és energia mennyisége igen jelentős, ezért a kutatások egyik fő iránya az ennél jóval alacsonyabb emissziójú anyagok fejlesztése és gyakorlati felhasználásának elősegítése.

A low-E anyagok az energiafelhasználás csökkentése érdekében az épületek átlátszatlan és transzparens felületein egyaránt felhasználhatók.

2.4.2.1. Transzparens low-E anyagok

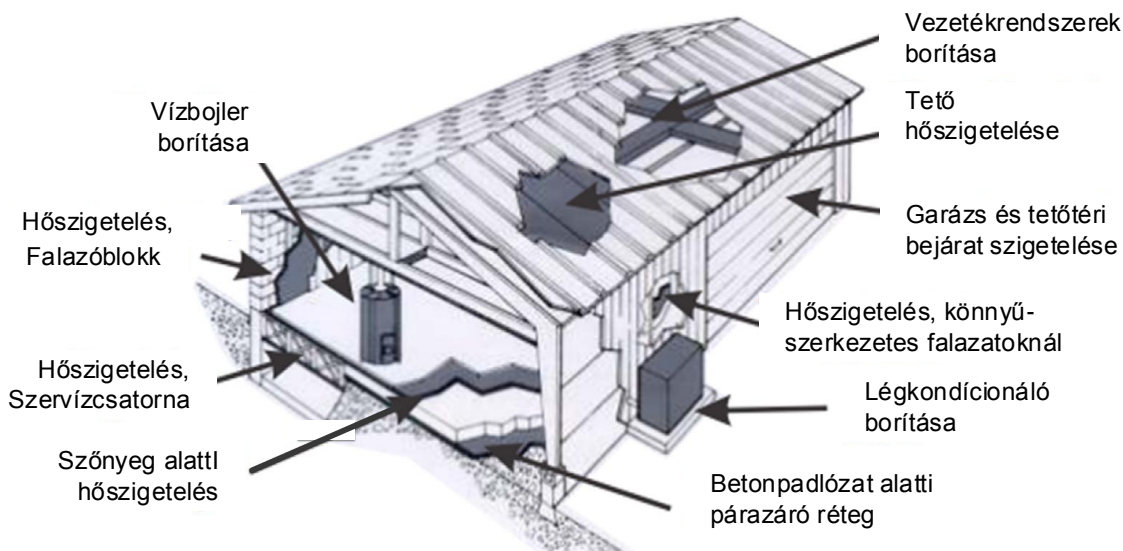
Átlátszó termékek, azaz üvegek esetén az alacsony emissziós anyagokat olyan bevonatok formájában tudjuk hasznosítani, amelyeket az üveghez annak gyártása során vagy azt követően adnak hozzá a

gyártók. Ezek a bevonatok lehetnek vékony ($v < 0,1 \mu\text{m}$) rétegek és vastag ($0,5-0,1 \mu\text{m}$) filmbevonatok (Ibrahim et al., 2018), amelyeket különféle – például szórásos, vákuumporlasztásos, pirolitikus, mágnes-katódos – technológiával hordanak fel gyárilag, vagy a felhasználó által felragasztható fóliák formájában kerülnek forgalomba. A gyári bevonatok emissziója általában kedvezőbb, $\varepsilon = 0,013 \div 0,16$, mint az öntapadó fóliáké, $\varepsilon = 0,07 \div 0,45$.

Az ilyen transzparens, azaz üvegfelületeken használatos termékekre vonatkozóan nagyszámú irodalom és hosszabb idejű gyakorlati tapasztalat áll már rendelkezésre (Jelle et al., 2017), (Gläser–Ulrich, 2013), (Hammarberg–Roos, 2003), Gustavsen et al., 2011), (Manz, 2008), Rosencrantz et al., 2005), Eames, 2008).

2.4.2.2. Átlátszatlan low-E anyagok

Az alacsony hőemissziójú átlátszatlan anyagok építészeti felhasználása terén elért fejlesztések és az ezek eredményeként kidolgozott és gyakorlatban használt termékek ma még valamivel kevésbé elterjedtek. Néhány jellemző alkalmazási példa látható a 3. ábrán.



3. ábra. Alacsony hőemissziójú átlátszatlan anyagok felhasználásának lehetőségei épületekben (Jelle et al., 2017).

Az épületek kültéri vízszintes (Jelle et al., 2017), (Pisello, 2017), (Testa–Krarti, 2017), Park–Krarti, 2016), (Bianco et al., 2015), (Bianco et al., 2017) és függőleges (Guo et al., 2013), Zinzi, 2016), (Alonso et al., 2017) felületeinél már sok helyen alkalmazzák a fényvisszaverő, ezáltal energiavisszaverő felületeket az energiatakarékos működés érdekében. Hatékonyságukat mára számos kutatás igazolta (Medina, 2012), (Uvsløkk et al., 2017). Ezzel szemben az alacsony hőemissziójú, low-E burkolatok beltéri alkalmazására, főként a falazatokra felvihető változatok vonatkozásában alig találunk szakirodalmi utalásokat.

Ezt a hiányt igyekezve pótolni, a továbbiakban áttekintünk néhány idevonatkozó munkát, amelyek alapján igyekeztünk rendszerezni ezeket a low-E típusú anyagokat és bemutatni a már használatban lévő, illetve kidolgozás alatt álló különféle típusok jellemző képviselőit. A cikk fő célkitűzésének

megfelelően a beltérben alkalmazható megoldásokra fókuszálunk, ugyanakkor a bemutatott termékek számos esetben mind kültéri, mind beltéri alkalmazásokban is előfordulnak.

Az egyik legátfogóbb és legkorszerűbb idevonatkozó mű (Ibrahim et al., 2018) a függőleges felületeken alkalmazott bevonatokkal kapcsolatos legújabb szakirodalmi eredményekről táblázatos formában is áttekintést ad (**3. táblázat**).

3. táblázat. *Függőleges felületeken alkalmazott bevonatok legújabb képviselői (Ibrahim et al., 2018).*

Forrás	Tanulmány típusa	Alkalmazás módja	Anyagok	Célok
(Shi–Zhang, 2011)	szimuláció	függőleges külső	($\epsilon = 0,1 - 0,9$)	a város éves hűtési energiaterhelése
(Guo et al., 2012)	kísérleti és szimulációs	függőleges külső	öregedés előtt alkalmazott bevonatok ($\rho_s = 0,84$)	energiatakarékosság a nyári és téli időszakban
(Zinzi, 2016,a)	szimuláció	függőleges külső	hűvös hatású anyagok: ($\rho_s = 0,15 - 0,35 \div 0,55 - 0,75$)	energiatakarékosság és hőkomfort
(Zinzi, 2016,b)	kísérleti és szimulációs	függőleges külső	újyszerű akril alapú festék kvarc töltőanyaggal	energiatakarékosság és hőkomfort
(Alonso et al., 2016), (Alonso et al., 2017)	kísérleti és szimulációs	függőleges külső	madridi épületekre jellemző ($\rho_s = 0,26 - 0,31 \div 0,36$)	energiatakarékosság és hőkomfort
(Principi–Fioretti, 2012)	kísérleti és szimulációs	függőleges belső üreges téglá	kereskedelmi alumínium festék ($\epsilon = 0,5$)	összetevők jellemzése
(Marino et al., 2015)	szimuláció	vízszintes és függőleges belső	belső fehér vakolat kerami-kus nanogömbökkel ($\epsilon = 0,6$)	energiatakarékosság és hőkomfort
(Joudi et al., 2011,a), (Joudi et al., 2013)	kísérleti és szimulációs	függőleges belső és külső	belső végfelület ($\epsilon = 0,25$) + fényvisszaverő külső bevonat ($\rho_s = 0,39$)	energiatakarékosság és hőkomfort
(Joudi et al., 2017)	kísérleti és CFD** szimulációs	függőleges belső	($\epsilon = 0,25; 0,91$)	energiatakarékosság és hőkomfort
(Buckmaster–Abramson, 2015)	CFD szimuláció	vízszintes és függőleges belső	($\epsilon = 0,1; 0,5; 0,95$)	energiamegtakarítás a helyiség légzárása szerint

* ρ_s : napfény visszaverő képesség

**CFD: Computational Fluid Dynamics = Folyadék-dinamikai modell alapú számítógépes szimuláció

A továbbiakban az átlátszatlan low-E anyagok főbb típusait tekintjük át.

Hővisszaverő fóliák:

A jól ismert hővisszaverő fóliák két nagy csoportja a sugárzást akadályozó vékony fóliák és a sugárzást visszaverő vastagabb rétegek, amelyeket üvegszállal, habosított anyaggal, vagy

légbuborékokkal kialakított szigetelőréteggel is ellátanak. Ilyen termékekre vonatkozóan széleskörű információkkal szolgál Jelle és munkatársaink tanulmánya (Jelle et al., 2017), amelyben a bemutatott anyagok emissziós tényezője döntően az $\varepsilon = 0,03\div 0,06$ tartományba esik. Ezeket leginkább olyan területeken alkalmazzuk, ahol a túlzott melegedéssel szemben kell védekeznünk, vagy a tetők, falazatok vastagságának csökkentése, hőállóságának növelése a cél (Joudi et al., 2011,a), (Saber et al., 2011), (Shi–Zhang, 2011), Pasztory et al., 2011).

Festékek, bevonatok

A felhordható festékek emissziós tényezője jellemzően nagyobb, $\varepsilon = 0,15\div 0,49$, viszont igen hasznosak, amikor a fóliák alkalmazása nehézségekbe ütközik. Előnyük, hogy rugalmasabbak, és felvitel előtt olyan anyagokon is alkalmazhatók, ahol a fóliák nem jöhetnek szóba, például üreges téglák belsejében, vagy az épületek külső felületén. Esztétikai szempontból kifogásolható, hogy fémes megjelenésűek, amit a felhasználóknak el kell tudni fogadniuk. A kereskedelmi forgalomban jelenleg kapható legtöbb low-E alapanyag statikus anyag, vagyis ahhoz képest, ahogyan legyártották, kiválasztották és beépítették őket emissziós képességük nem változtatható meg – eltekintve az öregedés és a degradáció okozta tulajdonságváltozásokról, például emisszivitás növekedéstől (Jelle et al., 2017). A jövő low-E anyagai az úgynevezett szabályozható emisszivitású anyagok lesznek, amelyek az aktuális klimatikus viszonyok szerint szabályozzák emissziós tényezőjüket. Ilyen viselkedésű, úgynevezett kromogén anyagok már kaphatók kereskedelmi forgalomban is. A különféle kromogén anyagok három fő csoportja az elektrokróm anyagok (Baetens et al., 2011), Jelle–Breivik, 2012), (Jelle, 2013), a fotokróm anyagok és a termokróm anyagok (Karlessi, 2009). Az elektrokróm anyagok elektrokémiai reakció, a fotokróm anyagok fényabszorpció, míg a termokróm anyagok hőmérsékletváltozás hatására módosítják az olyan tulajdonságaikat, mint például a sugárzás áteresztő-, vagy visszaverő képesség, emisszivitás.

2.4.2.3. Elméleti és gyakorlati megoldások low-E festékbevonatok alkalmazására

Hőszigetelő téglák kísérleti fejlesztése

Principi és Fioretti kísérleteik során $\varepsilon = 0,5$, alacsony emisszivitású festékkel vonták be az üreges falazótégla belső üregeit (Principi–Fioretti, 2012). A vizsgálatok a low-E bevonatos téglák hővezetőképességének 20%-os csökkenését igazolták. Megállapították továbbá, hogy a low-E bevonatok könnyű és olcsó technológiák lehetnek az üreges téglák hőállóságának javítására, mivel a téglák gyártástechnológiai folyamatának lényegesebb módosítása nélkül alkalmazhatók.

Low-E bevonatok kül- és beltéri alkalmazásának szimulációs vizsgálata

Joudi és munkatársai szimulációs módszerrel vizsgálták fényvisszaverő bevonatok viselkedését falazatok kültéri, illetve beltéri oldalán, vagy mindkét felületen egyidejűleg alkalmazva (Joudi et al., 2011,b). Megállapították, hogy hideg éghajlaton a fényvisszaverő bevonatok egyidejű alkalmazása a külső és belső felületeken megtakarítást jelent a teljes energiafelhasználás szempontjából, mivel a szükséges fűtési terhelés csökkenthető, azonban ezzel párhuzamosan a hűtési igény megnövekedett a nyári időszakokban. Hideg éghajlaton ugyanis a külső reflexiós bevonatok alkalmazása mellett az összenergia felhasználás növekszik a hasonló jellegű, bevonat nélküli épületekhez képest, tehát ez a megoldás ilyen éghajlati viszonyok között nem javasolt. Meleg éghajlaton az eredmények ellentétes módon változtak, vagyis a külső felületen alkalmazott fényvisszaverő bevonat energiamegtakarítást eredményezett, míg a beltéri fényvisszaverő bevonat növelte az összenergia felhasználást. Egyértelmű

tehát, az alacsony e-tartalmú anyagok tényleges felhasználása és energiamegtakarítási potenciálja a különböző éghajlati viszonyok esetén eltérő lesz (Guo et al., 2016).

Marino és munkatársai szimulációs vizsgálatokkal 5-20% energiamegtakarítást prognosztizáltak az éghajlati viszonyoktól függően $\varepsilon = 0,6$ emissziós tényezőjű low-E beltéri vakolat használata esetén (Marino et al., 2015).

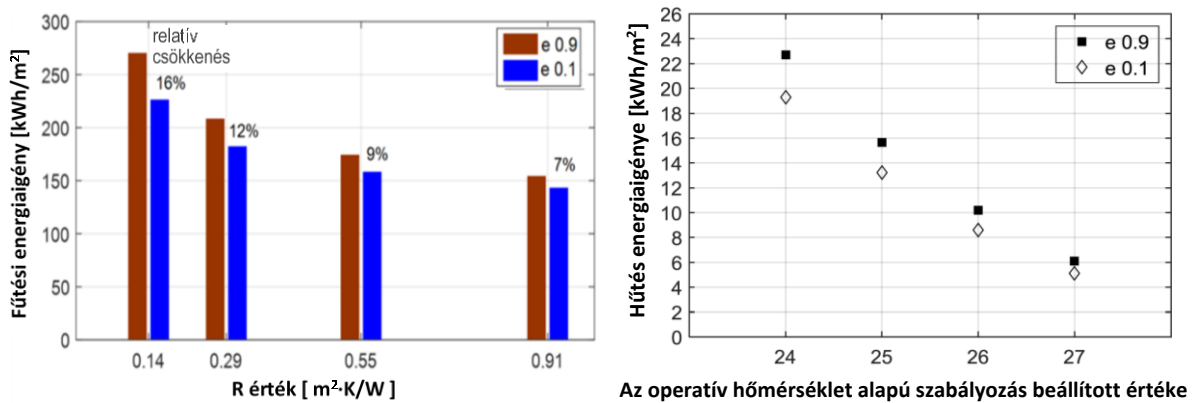
Joudi és munkatársai a különféle bevonatrendszerekkel elérhető hőenergia megtakarítást az épületek energiaállapotának dinamikus szimulációjával határozták meg kis emisszivitású ($\varepsilon = 0,25$) beltéri, valamint nagy reflexivitású ($\rho_s = 0,39$) kültéri bevonat együttes alkalmazásakor (Joudi et al, 2011,a), hasonlóan jelentős különbségeket kimutatva a helyi időjárási viszonyoktól függően.

Mavromatidis és munkatársai multiréteges, kettős légréteggel kombinált hőszigetelések vizsgálatára numerikus modellt fejlesztettek ki, amely a hőátadást összetett hőszigetelés/hővezetési jelenségként kezeli (Mavromatidis et al., 2012,a), (Mavromatidis et al., 2012,b). A módszer igen újszerű, az építészeti burkolatokkal foglalkozó innovatív kutatások egyik fontos képviselője, amely az üregek közvetítésével zajló, kapcsolt természetes hőáramlás/hőszigetelés útján megvalósuló hőátadást a legkorszerűbb eszközökkel vizsgálja. Alkalmazása különösen az olyan burkolatok esetén hasznos, amelyekben integráltan alkalmaznak hővisszaverő, hőszigetelést akadályozó anyagokat.

Mavromatidis részletes elméleti és kísérleti tanulmányokat végzett alacsony emissziójú felületek közelében lévő, függőleges és ferde helyzetű, négyszögletes üregeken keresztül természetes hőáramlás és kapcsolt hőszigetelés útján megvalósuló hőátadás elemzése céljából (Mavromatidis et al., 2016). Numerikus modell segítségével az infravörös sugárzás és a konvekciós hőátadást együttesen szimulálták egy innovatív épületburkolat prototípuson, amelynek szerkezetét nagy porozitású, félig átlátszó, optikailag vékony anyagok és ezüst bevonattal ellátott, alacsony emissziójú fóliák alkották. A szerző két új, továbbfejlesztett korrelációs összefüggést javasolt az alacsony emissziójú felületek közelében lévő, kis l/d viszonyú, légáteresztő üregeken keresztül megvalósuló természetes hőáramlás modellezésére.

Low-E anyagok és (szuper) szigetelőanyagok kombinált alkalmazásának hatása

A szuper szigetelőanyagok kategóriájába azok a szigetelőanyagok tartoznak, amelyek R hőellenállása közel $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Különböző hőátadási ellenállású, külső falazóanyagok hatását a fűtési energiaigényre 0,9 és 0,1 emissziójú beltéri végfelület esetén a 4/a) ábrarészlet illusztrálja.



4. ábra. A low-E borítás hatása a különféle falazatok energiaigényére (Ibrahim et al., 2018).

Látható, hogy az R érték növelésével a megtakarítás egyre nagyobb, de a low-E burkolat hatékonysága, ahogyan az várható, ezzel párhuzamosan csökken. Ugyanezen falazatok beltéri hűtésének energiaigénye – szimulációs vizsgálatok alapján – low-E borítással szintén hatékonyan csökkenthető, és az elérhető energianyereség a hőmérséklet szabályozáskor beállított operatív hőmérséklet csökkenésével növekszik (4/b ábrarészlet) (Ibrahim et al., 2018).

Low-E bevonatok hagyományos és aerogél bázisú vakolattal kombinálva

Egy ígéretes megoldás az alacsony emissziós bevonatok párosítása aerogélekkel, amelyekkel energiahatékony belső felületeket képezhetünk. Ezek részben a hőkomfort javítása, részben a penészesedés kockázatának csökkentése révén biztosítanak kedvezőbb tulajdonságokat.

Ibrahim és munkatársai tanulmányukban egy új szimulációs módszert mutatnak be, amelynek újdonsága, hogy a hőkomfortérzet értékelése során képes figyelembe venni a belső felület alacsony emissziós jellemzőit akár az átlagos sugárzási hőmérséklet, akár az operatív hőmérséklet meghatározásakor (Ibrahim et al., 2018). Az általuk kidolgozott esettanulmányban egy kísérleti háznak egy korábbi munkájukban validált numerikus modelljét alkalmazták (Ibrahim et al., 2015). A modell az energiamegtakarítás elérhető mértékét és a hőkomfortérzet javulását nemcsak az alacsony emissziós bevonatokkal burkolt felületek esetén képes kiszámítani, hanem azokban az esetekben is, amikor a low-E anyagokat hőszigetelő, vagy szuperhőszigetelő anyagokkal, például speciális vakolattal kombinálva viszik fel a falburkolat belső felületére. Kimutatták, hogy az alacsony hőemissziójú végfelületek kialakítása akkor a leghatékonyabb, ha ezt a belső, low-e típusú réteget szigetetlen, vagy gyengén szigetelt felületeken alkalmazzák, különösen, ha a hőkomfort biztosítása az elsődleges cél.

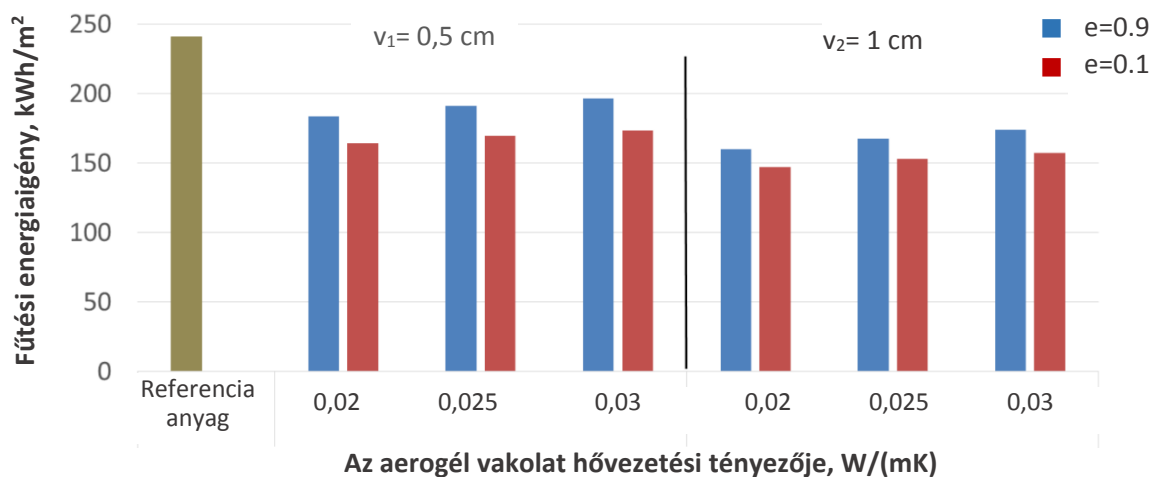
Aerogél alapú vakolatok és low-E végfelületek kombinált alkalmazásának hatása

A szimulációs programok nemcsak a jelenleg alkalmazott építészeti megoldások vizsgálatában jelentenek hatékony segítséget, de olyan perspektivikus alkalmazási lehetőséget is jelentenek, amelyek az épületek átalakítása, felújítása során szóba jöhető új, korszerű és hatékony megoldásokat feltárását is elősegíthetik. Egy ilyen újszerű megoldás az aerogél-alapú vakolatok kombinálása low-E alapú beltéri végfelületekkel.

Ibrahim és munkatársai korábbi tapasztalataik alapján (Ibrahim et al., 2015,b), (Ibrahim et al., 2016), (Ibrahim et al., 2017) háromféle – 0,020 W/m·K, 0,025 W/m·K és 0,030 W/m·K – hővezetési tényezőjű és kétféle – $v_1 = 0,5$ cm és $v_2 = 1$ cm – vastagságú aerogél alapú vakolatot választottak ki elemzésre. A különféle esetekre számított fűtési energiaigényt az 5. ábra tünteti fel. Látható, hogy például egy $v = 0,5$ cm vastagságú, 0,025 W/m·K hővezetési tényezőjű beltéri aerogél vakolatos végfelület kialakításával, a vizsgált esetben választott 17 °C-os operatív hőmérsékletre szabályozott helyiségben, a fűtési energiaigény 50 kWh/m²-rel csökkent, ami 21%-os energiamegtakarítást jelent a viszonyítási alapul szolgáló, hagyományos szigetelésű falazati megoldáshoz képest. Abban az esetben, ha ezt az aerogél alapú vakolati réteget low-E végfelülettel kombináljuk, akkor a megtakarítás 71 kWh/m², ami már 30%-os energiamegtakarítást eredményez. Az aerogél vakolat vastagságát kétszeresére (1 cm-re) növelve a megtakarítás low-E bevonat nélkül 73 kWh/m² (31%), míg low-E végfelülettel eléri a 88 kWh/m²-t, azaz a 37%-ot.

Összegezve elmondható, hogy a beltéri függőleges felületeken alkalmazott low-E bevonatok és végfelületek jelentősen csökkenthetik az épületek fűtési és hűtési energiaigényét, és javíthatják a hőkomfort érzetet. Régi épületek gyenge hőátadási ellenállású ($R = 0,144$ m²·K/W) külső burkolatai

esetén a beltéri low-E bevonatokkal az emissziót 0,9-ről 0,5, illetve 0,05 értékre csökkentve 7-16% energiamegtakarítás érhető el.



5. ábra. Az épület fűtési energiaigénye aerogél vakolat esetén low-E végfelülettel kombinálva, illetve anélkül (Ibrahim et al., 2018).

A beltéri low-E bevonatokkal elérhető energiamegtakarítás hatékonysága jelentősen függ a külső felület hőátadási ellenállásának értékétől. Annak javulásával ugyanis a beltéri bevonattal elérhető megtakarítás csökken. Erős kültéri szigeteléssel ($R > 2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) ellátott épülethatároló szerkezetek esetén a beltéri low-E bevonatok hatékonysága elhanyagolhatóan kicsiny.

Hagyományos hőmérséklet szabályozás esetén a low-E burkolatok alkalmazásával a szükséges alaphőmérséklet – azonos hőkomfort biztosítása mellett – csökkenthető.

Egy közeljövőben megvalósítható energiatakarékos megoldás, ha a low-E burkolatok alkalmazását összekapcsoljuk egy operatív hőmérséklet alapú beltéri hőmérséklet szabályozási rendszerrel, amelynek révén a teljes energiamegtakarítás akár a 22%-ot is elérheti.

Aerogél bázisú szuperszigetelő vakolat hozható létre, ha az aerogél vakolatot low-E bevonattal kombináljuk. A hagyományos anyagokra jellemző, $\epsilon = 0,9$ körüli emissziójú végfelület esetén is jelentős, 20% fölötti fűtési energiamegtakarítás érhető el egy 0,5 cm vastag aerogél vakolat alkalmazásával. Ez a megtakarítás tovább növelhető egy low-E ($\epsilon = 0,1$) végfelülettel kiegészítve és/vagy a vakolat vastagságának növelésével, illetve a hővezetési tényező csökkentésével. Ily módon akár 37%-kal is csökkenthető egy felújításra kerülő, régi ($R = 0,144 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) épület fűtési energiaszükséglete.

A beltéri bevonatok LCA alapú tervezése során figyelembe vehető környezetbarát megoldások további jelentős képviselői a fázisváltó anyagok, az újrahasznosított mesterséges és természetközeli alapanyagok, valamint a mezőgazdasági hulladékok, amelyekről egy következő cikkben adunk áttekintést.

3. Összefoglalás

Az épülethatároló szerkezetek végfelületeinek kialakítása és hőfizikai jellemzői meghatározó szerepet játszanak a fűtésre és a hűtésre felhasznált energiamennyiség tekintetében.

A külső felületeken alkalmazható energiatakarékos szigetelési megoldások szakirodalma széleskörű, ugyanakkor a beltéri végfelületeken hatékonyan alkalmazható anyagok, anyagkombinációk viselkedéséről kevés tapasztalat áll rendelkezésre. Az itt közölt tanulmány célja ezeknek az építészeti anyagoknak és megoldásoknak az áttekintése és rendszerezése volt, bemutatva legjellemzőbb és legkorszerűbb képviselőiket.

Ezek közül a cikkben két fő csoport – az ásványi-hidrát kompozitok, és az alacsony emisszivitású (low-E) anyagok kerültek bemutatásra. Ez utóbbiak irányában rendkívül intenzív kísérleti és szimulációs kutatások, fejlesztések folynak. Az így fejlesztett rendszerek leghatékonyabb megoldásai között említhetők a low-E bevonattal ellátott hőszigetelő téglák, vagy a low-E bevonatokkal kombinált hagyományos és aerogél bázisú vakolatok. Amellett, hogy ezek környezetbarát építészeti anyagok, költséghatékony, gyors, könnyen, és utólagosan is alkalmazható megoldást jelentenek a meglévő épületek fűtése és hűtése miatti energiafogyasztás csökkentésére.

A téma magas szintű elméleti kutatásainak eredményei, a kapcsolt hőszigeteléses-hőáramlásos hőátadási feladatok numerikus megoldásai egyre megbízhatóbb támpontot adnak a tervezőknek a jövő technikai színvonalát képviselő korszerű, energiatakarékos és intelligens szigetelési rendszerek kifejlesztésére.

Ugyancsak az újszerű anyagok között kell megemlíteni az ún. fázisváltó (PCM) anyagokat, amelyek szakirodalma napról-napra bővül. A beltéri végfelületeken alkalmazott anyagok közül az LCA filozófiának leginkább megfelelő csoportot pedig az újrahasznosított hulladékok – mesterséges-, valamint természetközeli anyagok – képviselik, amely két anyagsoport sajátosságairól és a vonatkozó legújabb kutatások eredményeiről egy következő cikkben adnak számot a szerzők.

Az áttekintett nagyszámú szakirodalmi forrásmunka alapján megállapítható, hogy – bár a kültéri falfelületeken alkalmazható bevonatok félesége, száma és a vonatkozó ismereteink, tapasztalataink jóval bőségebbek – mára a beltéri végfelületek korszerű hővédelme tekintetében is számos olyan energia- és költséghatékony megoldást, anyagot és anyagkombinációt találunk, amelyek egyúttal megfelelnek korunk egyik legfontosabb elvárásának a teljes életciklusra vonatkozóan fenntartható környezetvédelem, és újrahasznosítás szempontjainak, vagyis az LCA alapú tervezés, gyártás és felhasználás legszigorúbb követelményeinek.

4. Köszönetnyilvánítás

„A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.”

A szerzők ezúton mondanak köszönetet Velősy Andrásnak és Józsa Zsuzsannának (ÉMI), értékes és fáradhatatlan szakmai támogatásukért, valamint Dr. Kocserha Istvánnak (Miskolci Egyetem) a hasznos konzultációkért.

Irodalom

Alonso, C., Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Asensio, E., Pérez, G., Martínez, I., Frutos, B. (2017) Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation. *Solar Energy*, 146, 470–483. doi:10.1016/j.solener.2017.03.009

- Alonso, C., Oteiza, I., García-Navarro, J., Martín-Consuegra, F. (2016). Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid. *Energy and Buildings*, 126, 252–262. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.034
- Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 87–105. doi:10.1016/j.solmat.2009.08.021
- Balaguru, P. N., Shah, S. P. (1992). *Fiber-Reinforced Cement Composites*, 1st ed.; McGraw Hill International Editions: New York, NY, USA
- Balea, A., Fuente, E., Blanco, A., Negro, C. (2019). Nanocelluloses: Natural-Based Materials for Fiber-Reinforced Cement Composites. A Critical Review. *Polymers*, 2019, 11, 518. doi.org/10.3390/polym11030518
- Bayer, G. T., Zamanzadeh, M. (2004). *Failure Analysis of Paints and Coatings*, Matco Associates, Inc. Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 1-37.
- Bianco, L., Cascone, Y., Goia, F., Perino, M., Serra, V. (2017). Responsive glazing systems: Characterisation methods and winter performance. *Solar Energy*, 155, 372–387. doi:10.1016/j.solener.2017.06.029
- Bianco, L., Goia, F., Serra, V., Zinzi, M. (2015). Thermal and Optical Properties of a Thermotropic Glass Pane: Laboratory and In-Field Characterization. *Energy Procedia*, 78, 116–121. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.124
- Buckmaster, D. J., Abramson, A. R. (2015). The effects of interior emissivity and room layout on forced air space-conditioning power usage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 216–228. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.059
- Chen, P.-W., Chung, D. D. L. (1993). Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Materials and Structures*, 2(1), 22–30. doi:10.1088/0964-1726/2/1/004
- Drozdyuk, T., Aizenshtadt, A., Tutygin, A., Frolova, M. (2016). Basalt fiber insulating material with a mineral binding agent for industrial use. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 124, 012123. doi:10.1088/1757-899x/124/1/012123
- Eames, P. C. (2008). Vacuum glazing: Current performance and future prospects. *Vacuum*, 82(7), 717–722. doi:10.1016/j.vacuum.2007.10.017
- Gläser, H. J., Ulrich, S. (2013). Condensation on the outdoor surface of windowglazing—calculation methods, key parameters and prevention with low-emissivity coatings. *Thin Solid Films*, 532, 127–131. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.110
- Guo, S., Walsh, T. M., Peters, M. (2013). Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: A global analysis. *Energy*, 61, 447–454. doi:10.1016/j.energy.2013.08.040
- Guo, W., Qiao, X., Huang, Y., Fang, M., Han, X. (2012). Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone. *Energy and Buildings*, 50, 196–203. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.035
- Gustavsen, A., Grynning, S., Arasteh, D., Jelle, B. P., Goudey, H. (2011). Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames. *Energy and Buildings*, 43, 2583–2594. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.010
- Hammarberg, E., Roos, A. (2003). Antireflection treatment of low-emitting glazings for energy efficient windows with high visible transmittance. *Thin Solid Films*, 442, 222–226. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00986-6

- High, C., Seliem, H. M., El-Safty, A., Rizkalla, S. H. (2015). *Use of basalt fibers for concrete structures. Construction and Building Materials*, 96, 37–46. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.138](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.138)
- Ibrahim, M., Bianco, L., Ibrahim, O., Wurtz, E. (2018). Low-emissivity coating coupled with aerogel-based plaster for walls' internal surface application in buildings: Energy saving potential based on thermal comfort assessment. *Journal of Building Engineering*, 18, 454–466. [doi:10.1016/j.jobe.2018.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.008)
- Ibrahim, M., Biwole, P. H., Achard, P., Wurtz, E., Ansart, G. (2015,a). Building envelope with a new aerogel-based insulating rendering: Experimental and numerical study, cost analysis, and thickness optimization. *Applied Energy*, 159, 490–501. [doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.090](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.090)
- Ibrahim, M., Biwole, P. H., Achard, P., Wurtz, E. (2015,b). Aerogel-Based Materials for Improving the Building Envelope's Thermal Behavior: A Brief Review with a Focus on a New Aerogel-Based Rendering. *Green Energy and Technology*, 163–188. [doi:10.1007/978-81-322-2337-5_7](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_7)
- Ibrahim, M., Wurtz, E., Anger, J., Ibrahim, O. (2017). Experimental and numerical study on a novel low temperature façade solar thermal collector to decrease the heating demands: A south-north pipeembedded closed-water-loop system. *Solar Energy*, 147, 22–36. [doi:10.1016/j.solener.2017.02.036](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.036)
- Ibrahim, M., Wurtz, E., Biwole, P. H., Achard, P. (2016). Performance evaluation of buildings with advanced thermal insulation system: a numerical study. *Journal of Facade Design and Engineering* 4(1-2), 19–34. <https://doi.org/10.7480/jfde.2016.1-2.1112>
- Jae-Wan, P., Yong-Sik C., Sung-Kwan S., Jae-Hyen J. (2016). A Study on the Physical Properties of Mineral Hydrate Insulation Material Mixed with Basalt Fiber, *Journal of the Korean Ceramic Society, Basic Science and Classical Ceramics*, 53(1), 63–67. doi.org/10.4191/kcers.2016.53.1.63
- Jelle, B. P. (2013). Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings—measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 116, 291–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032>
- Jelle, B. P., Breivik, C. (2012). State-of-the-art Building Integrated Photovoltaics. *Energy Procedia*, 20, 68–77. [doi:10.1016/j.egypro.2012.03.009](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.009)
- Jelle, B. P., Kalnæs, S. E., Gao, T. (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives. *Energy and Buildings*, 96, 329–356. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.024>
- Jerman, M., Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>
- Joudi, A., Cehlin, M., Svedung, H., Rönnelid, M., Moshfegh, B. (2016). Numerical and experimental investigation of the influence of infrared reflective interior surfaces on building temperature distributions. *Indoor and Built Environment*, 26(3), 355–367. [doi:10.1177/1420326x15609966](https://doi.org/10.1177/1420326x15609966)
- Joudi, A., Svedung, H., Bales, C., Rönnelid, M. (2011,a). Highly reflective coatings for interior and exterior steel cladding and the energy efficiency of buildings. *Applied Energy*, 88(12), 4655–4666. [doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.002](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.002)
- Joudi, A., Svedung, H., Cehlin, M., Rönnelid, M. (2013). Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*, 103, 562–570. [doi:10.1016/j.apenergy.2012.10.019](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.019)

- Joudi, A., Svedung, H., Rönnelid, M. (2011,b). Energy efficient surfaces on building sandwich panels – A dynamic simulation model. *Energy and Buildings*, 43(9), 2462–2467. [doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.026](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.026)
- Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., Livada, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83(4), 38–551. [doi:10.1016/j.solener.2008.10.005](https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005)
- Kasza M. I., Bodnár B. (2019). Üveghab-adalékos könnyűbeton, az őszinte szerkezet. *Beton*, 37(3). <https://www.betonujsag.hu/lapszamok/254/2019-junius-xxvii-efolyam-iii-szam>
- Le, M., Ding, G., Schweigert, D., Y. Xu, Lu, Y., Lingle, P., Imran, M. (2013). Combinatorial optimization of nanoscale film stacks for low-e glass coatings, *Proceedings of the Glass Performance Days*, June, 2013 Tampere, Finland
- Leftheriotis, G., Yianoulis, P. (1999). Characterisation and stability of low-emittance multiple coatings for glazing applications, *Solar Energy Materials. Solar Cells*, 58, 185–197. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00202-5)
- Li, Z., Ma, J., Ma, H., Xu, X. (2018). Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 186, 012052. [doi:10.1088/1755-1315/186/2/012052](https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/2/012052)
- Manz, H. (2008). On minimizing heat transport in architectural glazing. *Renewable Energy*, 33(1), 119–128. [doi:10.1016/j.renene.2007.01.007](https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.007)
- Mardiguian, M., Caron-Fellens, J. (2017). The intelligent concrete: a new, economical technique for architectural shielding of buildings. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 6(2), 50–54. [doi:10.1109/memc.0.7989998](https://doi.org/10.1109/memc.0.7989998)
- Marino, C., Minichiello, F., , Bahnfleth, W. (2015). The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings. *Energy and Buildings*, 95, 70–79. [doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.036](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.036)
- Marino, C., Minichiello, F., Bahnfleth, W. (2015). The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings. *Energy and Buildings*, 95, 70–79. [doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.036](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.036)
- Marosné Berkes, M., Fülöp, F. (2020). *Korszerű környezetbarát betonelemek belső bevonatai – TANULMÁNY az Innovatív és környezetbarát beton szerkezeti elemek LCA-alapú fejlesztése másodlagos nyersanyagok, illetve hulladék újrahasznosításával (ME_15-142) c. témakörben.* Miskolci Egyetem, Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen projekt (GINOP-2.3.4-15-2016-00004), pp. 1-65.
- Mavromatidis, L. E. (2016). Study of coupled transient radiation-natural convection heat transfer across rectangular cavities in the vicinity of low emissivity thin films for innovative building envelope applications. *Energy and Buildings*, 120, 14–134. [doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.053](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.053)
- Mavromatidis, L. E., Bykalyuk, A., El Mankibi, M., Michel, P., Santamouris, M. (2012,b). Numerical estimation of air gaps' influence on the insulating performance of multilayer thermal insulation. *Building and Environment*, 49, 227–237. [doi:10.1016/j.buildenv.2011.09.029](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.029)
- Mavromatidis, L. E., El Mankibi, M., Michel, P., Bykalyuk, A., Santamouris, M. (2012,a). Guidelines to study numerically and experimentally reflective insulation systems as applied to buildings. *Advances in Building Energy Research*, 6(1), 2–35. [doi:10.1080/17512549.2012.671495](https://doi.org/10.1080/17512549.2012.671495)
- Medina, M. A. (2012). A Comprehensive Review of Radiant Barrier Research Including Laboratory and Field Experiments. *ASHRAE Transactions*, 118(1). <https://link.gale.com/apps/doc/A295268239/AONE?u=anon~c5896092&sid=googleScholar&xid=e523f9e1>

- Park, B., Krarti, M. (2016). Energy performance analysis of variable reflectivity envelope systems for commercial buildings. *Energy and Buildings*, 124, 88–98. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.070
- Pasztory, Z., Peralta, P. N., Peszlen, I. (2011). Multi-layer heat insulation system for frame construction buildings. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 13–717. doi:10.1016/j.enbuild.2010.11.016
- Pintér, J.: *Üveg külső térelhatárolók az épületenergetikában*, Doktori disszertáció, Gödöllő, 2009, pp. 1-205. https://www.szie.hu/file/tti/archivum/Pinter_Judit_ertekezes.pdf
- Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities, *Solar Energy*, 144, 660–680. doi:10.1016/j.solener.2017.01.068.
- Principi, P., Fioretti, R. (2012). Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks. *Energy and Buildings*, 51, 131–142. doi:10.1016/j.enbuild.2012.04.022
- Reidinger, M., Rydzek, M., Scherdel, C., Arduini-Schuster, M., Manara, J. (2009). Low-emitting transparent coatings based on tin doped iniumoxide applied via asol–gel routine, *Thin Solid Films*, 517, 3096–3099. doi:10.1016/j.tsf.2008.11.078
- Rosencrantz, T., Bülow-Hübe, H., Karlsson, B., Roos, A. (2005). Increased solar energy and daylight utilisation using anti-reflective coatings in energy-efficient windows. *Solar Energy Materials, Solar Cells*, 89, 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.12.007>
- Saber, H. H., Maref, W., Swinton, M. C., St-Onge, C. (2011). Thermal analysis of above-grade wall assembly with low emissivity materials and furred airspace. *Building and Environment*, 46(7), 1403–1414. doi:10.1016/j.buildenv.2011.01.009 .
- Seo, S.-K., Chu, Y.-S., Lee, J.-K., Song, H., Park, J.-W. (2013). A Study on Fabrication and Characterization of Inorganic Insulation Material by Hydrothermal Synthesis Method. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(3), 219-224. doi:10.14190/JRCR.2013.1.3.219
- Shi, Z., Zhang, X. (2011). Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates. *Solar Energy*, 85(1), 28–37. doi:10.1016/j.solener.2010.11.009
- Sim, J., Park, C., Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>
- Testa, J., Krarti, M. (2017). A review of benefits and limitations of static and switchable cool roof systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 451–460. doi:10.1016/j.rser.2017.04.030
- Thienel, K-C., Haller, T., Beuntner, N. (2020). Lightweight Concrete – From Basics to Innovations. *Materials*, 13(5), 1120. doi.org/10.3390/ma13051120
- Uvsløkk, S., Schlemminger, C., Asphaug, S. (2017). Thermal insulation performance of reflective foils in floor cavities – Hot box measurements and calculations. *Energy Procedia*, 132, 333–338. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.742
- Zhou H, Jia B, Huang H, Mou Y. (2020). Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Materials*, 13(6), 1362. doi.org/10.3390/ma13061362
- Zinzi, M. (2016,a). Exploring the potentialities of cool facades to improve the thermal response of Mediterranean residential buildings. *Solar Energy*, 135, 386–397. doi:10.1016/j.solener.2016.06.021
- Zinzi, M. (2016,b). Characterisation and assessment of near infrared reflective paintings for building facade applications. *Energy and Buildings*, 114, 206–213. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.048

NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK NAGYCIKLUSÚ FÁRADÁSRA ÉRVÉNYES FÁRADÁSI SZILÁRDSÁGI GÖRBÉI

Kovács Judit

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkjudit@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A különböző szerkezetek, szerkezeti elemek többségét hosszú üzemeltetésre tervezik, igénybevételük gyakran ciklikus. Ha a terhelés viszonylag kicsi, a tönkremeneteli ciklusszám pedig viszonylag nagy, akkor nagyciklusú fáradásról beszélünk. Nagyciklusú fáradásra érvényes határgörbék (fáradási szilárdsági görbék) több előírásban találhatóak, a nagyszilárdságú és az ultra-nagyszilárdságú acélokra (és hegesztett kötéseikre) azonban még nem ismertek ilyenek. A kutatás és jelen cikk célja, hogy bemutassuk egy-egy, az 1100 MPa-os és az 1300 MPa-os szilárdsági kategóriába tartozó acélon végzett nagyciklusú fáradástvizsgálatok eredményeit, a meghatározott határgörbéket, összevetve azokat korábbi, alacsonyabb szilárdsági kategóriákba tartozó acélokon kapott eredményekkel.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, nagyciklusú fáradás, határgörbe, fáradási szilárdsági görbe

Abstract

Most of the various structures and structural elements are designed for long periods of operation, often under cyclical loads. If the load is relatively low and the number of failure cycles relatively high, we speak of high cycle fatigue. Limit curves (fatigue strength curves) for high-cycle fatigue are given in several specifications, but none are yet known for high-strength and ultra-high-strength steels (and their welded joints). The aim of the research and of this paper is to present the results of the high cycle fatigue tests on steels in the 1100 MPa and 1300 MPa strength categories, the limit curves determined, and to compare them with results obtained earlier on steels in lower strength categories.

Keywords: high strengths steel, high cycle fatigue, limit curve, fatigue strength curve

1. Bevezetés

A különböző szerkezetek, szerkezeti elemek többségét hosszú, gyakran több évtizedes üzemeltetésre tervezik, igénybevételük pedig számos esetben ismétlődő (jellegű). Ez hatványozottan jellemző a járművekre, a járműipari szerkezeti elemekre, amelyek esetében a terhelések (igénybevételek) száma a teljes élettartam során több millió, illetve több tízmillió is lehet. Ha a terhelés viszonylag kicsi, a tönkremeneteli ciklusszám pedig viszonylag nagy ($5 \cdot 10^4$ - 10^8 ciklus), akkor nagyciklusú fáradásról beszélünk. Az alkatrészek, szerkezeti elemek és szerkezetek ismétlődő igénybevétele igen sokféle

lehet, a mechanikai igénybevétel mellé (ismétlődő) termikus és/vagy (ismétlődő) környezeti igénybevétel is párosulhat. Mivel a különböző anyagok teherbíró képessége az állapot tényezőktől is függ, így az ismétlődő igénybevételű terhelhetőséget rögzített vizsgálati feltételek mellett kell tanulmányozni.

A nagyciklusú fárasztás során a próbatest makroszkopikusan csak rugalmas alakváltozást szenved, keresztmetszete állandónak tekinthető, a számított feszültség pedig gyakorlatilag valódi feszültség. Ugyanakkor, a repedéskeletkezést (helyi képlékeny alakváltozás) és a repedésterjedést – ezekkel pedig a mérési eredményeket – számos tényező és jelentős mértékben befolyásolja. Ez egyértelműen azt jelenti, hogy ugyanazon feltételek esetén több próbatestet kell fárasztani az eredmények várható szórása miatt, a mért adatokat pedig matematikai-statisztikai módszerekkel kell értékelni (Zsáry, 1965; Lukács et al., 2012).

Ennek alapján is természetesnek mondhatók azok a törekvések, amelyek a különféle változatok egységes megközelítésű összefoglalására törekednek, méghozzá olyan formában, hogy azok a mérnöki gyakorlat számára (közvetlenül) alkalmazhatók legyenek. A nagyciklusú fáradás területén az egyik ilyen törekvés a határgörbék megalkotása. Nagyciklusú fáradásra érvényes határgörbék (tervezési görbék vagy fáradási szilárdsági görbék) több előírásban találhatók, továbbá, újabb és újabb elképzelések jelennek meg ilyen görbék fárasztóvizsgálatokon, illetve más mechanikai, tehát nem fárasztóvizsgálatokon alapuló származtatására. A szándék, az alkalmazhatóság mellett, egyértelmű: a vizsgálati idő és azon keresztül a vizsgálati költségek csökkentése. A teljesség igénye nélkül, néhány, szélesebb körben használt előírás, illetve határgörbe a következő:

- Eurocode 3 (Anon., 2009): acélokból készülő épületek és építőmérnöki szerkezetek tervezésére;
- BS 7608 (Stephens et al, 2001): hegesztett szerkezetekre vonatkozó, átfogó jellegű rendelkezéseket tartalmaz, amelyek a műszaki élet több területére (közúti és vasúti hidak, daruk, tengeri szerkezetek) vonatkozó előírásokban jelennek meg;
- BS 7910 (Anon., 1999): alapvetően ferrites és ausztenites acélokból, továbbá alumínium-ötvözetekből készült hegesztett szerkezetekre és szerkezeti elemekre alkalmazható, de használható nem hegesztett esetekre és más fém anyagokból készült szerkezetekre, szerkezeti elemekre is;
- AASHTO előírás (Barsom et. al., 1999): az American Association of State Highway Officials előírása, amely acél hidak szerkezeti elemeire alkalmazható;
- empirikus összefüggések alapján származtatott görbék (Lee et al., 2005): próbatestes vizsgálatok adataira és a különböző anyagi mérőszámok között meglévő (statisztikus) kapcsolatokra alapozva, fém alapanyagokra és az azokból készült szerkezeti elemekre.

A címszerűen érintett előírások egyik sajátossága az, hogy azok a nagyszilárdságú és az ultra-nagyszilárdságú acélokra (és hegesztett kötéseikre) vonatkozóan még nem tartalmaznak határgörbéket.

A kutatás és jelen cikk célja, hogy bemutassuk egy-egy, az 1100 MPa -os és az 1300 MPa -os szilárdsági kategóriába tartozó acélon végzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit és a meghatározott határgörbéket, összevetve azokat korábbi, 700 MPa -os és 960 MPa -os szilárdsági kategóriákba tartozó acélokon kapott eredményekkel.

2. Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok

2.1. Anyagminőségek

A korábbi kutató munkákban és a jelen munkában vizsgált acélok megnevezéseit, a lemezvastagságokkal együtt, az 1. táblázat foglalja össze. A táblázat utolsó oszlopában megadtuk azt a két forrásmunkát, ahonnan a 700 MPa -os és 960 MPa -os szilárdsági kategóriákba tartozó acélokon

kapott eredmények származnak. (Ez a további táblázatok és ábrák esetére is igaz, megismétlésétől azonban eltekintünk.)

1. táblázat. A vizsgált acélok megnevezései.

Szabványos jel	Gyártó	Gyártói jelölés	Lemezvastagság [mm]	Forrás
S690QL	Ruukki	Optim 700QL	30	(Dobosy, 2017)
S690QL	SSAB	Weldox 700E	15	(Dobosy, 2017)
S960QL	SSAB	Weldox 960E	15	(Gáspár, 2016)
S960M	voestalpine	Alform 960M	15	(Dobosy, 2017)
S1100M	voestalpine	Alform 1100M x-trem	15	jelen munka
S1300	N/A	S1300	10	jelen munka

A 2. táblázatban a vizsgált acélok kémiai összetétele, a 3. táblázatban pedig azok mechanikai tulajdonságai találhatóak. Az adatok, az S1300 jelű anyagminőség kivételével, gyártói műbizonylatokból származnak, a kivételt képező minőség esetében pedig saját méréseinkből.

2. táblázat. A vizsgált acélok kémiai összetétele [tömeg%].

Anyagminőség	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Optim 700QL	0,160	0,310	1,010	0,010	0,001	0,610	0,210	0,205
Weldox 700E	0,140	0,300	1,130	0,007	0,001	0,300	0,040	0,167
Weldox 960E	0,17	0,23	1,23	0,011	0,001	0,20	0,04	0,588
Alform 960M	0,084	0,330	1,650	0,011	0,0005	0,610	0,026	0,290
Alform 1100M x-trem	0,1270	0,3190	1,6200	0,0090	0,0015	0,6300	0,3200	0,6200
S1300	0,23	0,45	1,86	0,012	0,001	0,85	2,43	0,360
Anyagminőség	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Zr
Optim 700QL	0,10	0,16	0,15	0,041	0,001	0,002	0,003	N/A
Weldox 700E	0,011	0,009	0,010	0,034	0,001	0,002	0,003	N/A
Weldox 960E	0,041	0,004	0,01	0,061	0,017	0,001	0,002	N/a
Alform 960M	0,078	0,014	0,016	0,038	0,035	0,0015	0,006	N/A
Alform 1100M x-trem	0,0660	0,0110	0,0470	0,0350	0,0370	0,0014	0,0042	N/A
S1300	0,030	0,002	0,093	0,063	<0,001	N/A	N/A	<0,001

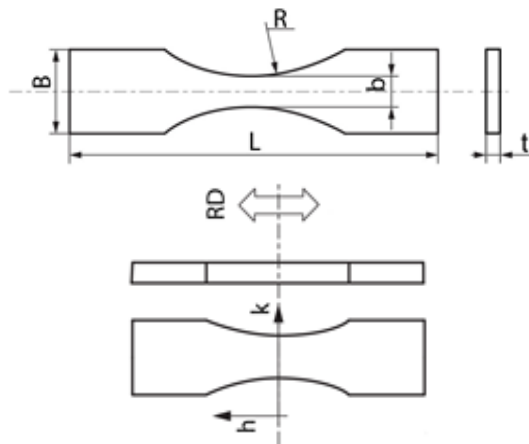
A 3. táblázat adatai, a növelt szilárdság és a megfelelő szívósság együttese, szemléletesen mutatják azoknak az anyag- és anyagtechnológiai fejlesztéseknek az eredményeit, amelyek a nagyszilárdságú és az ultra-nagyszilárdságú acélok területén a közelmúltban végbementek, illetve jelenleg is zajlanak.

3. táblázat. A vizsgált acélok mechanikai tulajdonságai.

Anyagminőség	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}/R_m$	A_5 [%]	$KV_{-40^\circ C}$ [J]
Optim 700QL	809	850	0,952	17	106
Weldox 700E	791	836	0,946	17	166
Weldox 960E	1014	1053	0,963	14	75
Alform 960M	1051	1058	0,993	17	177
Alform 1100M x-trem	1193	1221	0,977	11,6	88
S1300	1300	1560	0,833	12	78

2.2. Vizsgálati körülmények

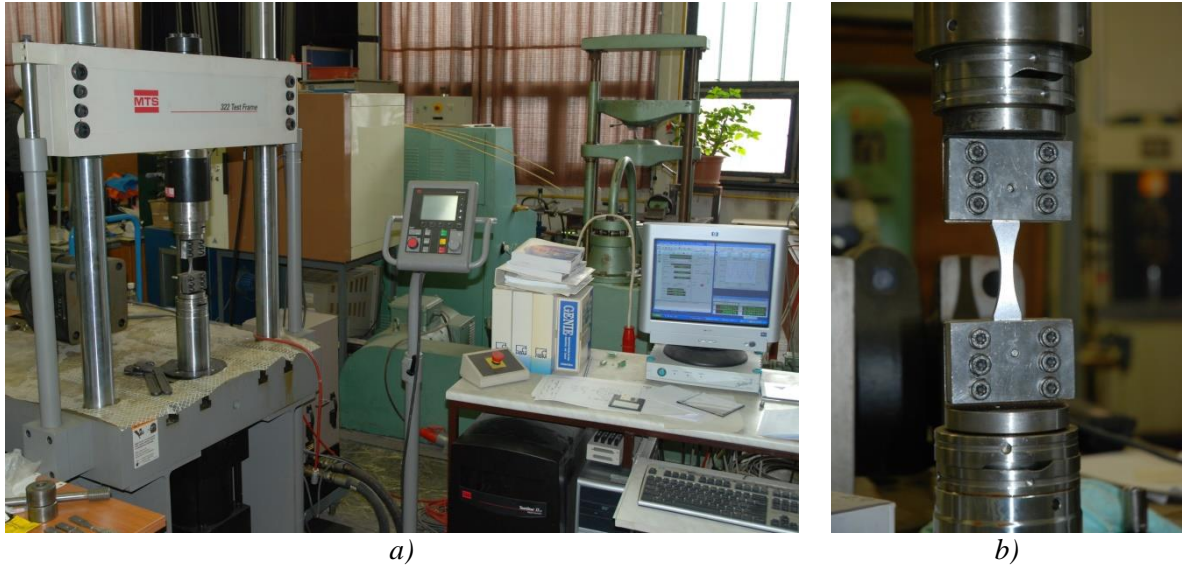
A fárasztóvizsgálatokhoz alkalmazott lapos próbatetek geometriáját az 1. ábra felső, kimunkálásukat az alapanyagokból pedig az 1. ábra alsó ábrarészlete mutatja be. Az alsó ábrarészleten RD jelöli a lemezek hengerlési irányát, ebből következően h a hossz-, k pedig a keresztirányt; a lemez vastagság iránya (v) a rajz síkjára merőleges. A vizsgált próbatetek orientációja h/v , illetve h/k volt, ahol az első betű a próbatest hossz tengelyének, a második betű pedig a repedéskeletkezés majd a törés várható irányát jelenti.



1. ábra. A fárasztóvizsgálatokhoz használt próbatetek geometriája és elhelyezkedése a hengerlési irányhoz (RD) képest: h = hosszirány, k = keresztirány.

A vizsgálatokra a JSME S 002 (Anon., 1981) előírásban megfogalmazottakat (Nakazawa et al., 1987) szem előtt tartva (lásd később, a 4. ábrát), MTS gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszereken (MTS 312 és MTS 810) került sor. A vezérlési mód állandó terhelésamplitúdójú, a terhelés aszimmetria tényező pedig a teljes vizsgálatsorozatban állandó értékű, $R = 0,1$ volt. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten, laboratóriumi közegben és szinusz alakú terhelési függvénnyel végeztük. A terhelési frekvencia a 15-25 Hz-es tartományban változott, a jellemző érték az $f = 25$ Hz volt, amelytől csak akkor tértünk el a kisebb értékek irányába, amikor a vizsgálat

stabilitása azt megkívánta. A terhelési frekvencia ilyen tartományban történő változtatása nincs szignifikáns hatással a vizsgálati eredményekre (Lukács et al., 2012). A 2. ábra az egyik anyagvizsgáló rendszert és a próbatestek befogását szemlélteti.



2. ábra. Nagyciklusú fárasztóvizsgálat az MTS 810 univerzális anyagvizsgáló rendszeren:
a) a terhelő keret és a számítógépes vezérlés, b) a próbatest befogása.

3. Az eredmények és értékelésük

A 3. ábra bemutatja a fárasztóvizsgálatok eredményeit, ahol a ferde nyilakkal megjelölt adatok olyan próbatestek, amelyek az 5 000 000 ciklus, illetve a 10 000 000 ciklus eléréséig nem károsodtak (túlélő próbatestek).

A hivatkozott előírásokban található határgörbék különböző próbatesteken, hegesztett kötéseken és szerkezeti elem részleteken elvégzett vizsgálatokon alapulnak, a görbék élettartam szakaszra vonatkozó egyenlete pedig a Basquin összefüggés szerinti:

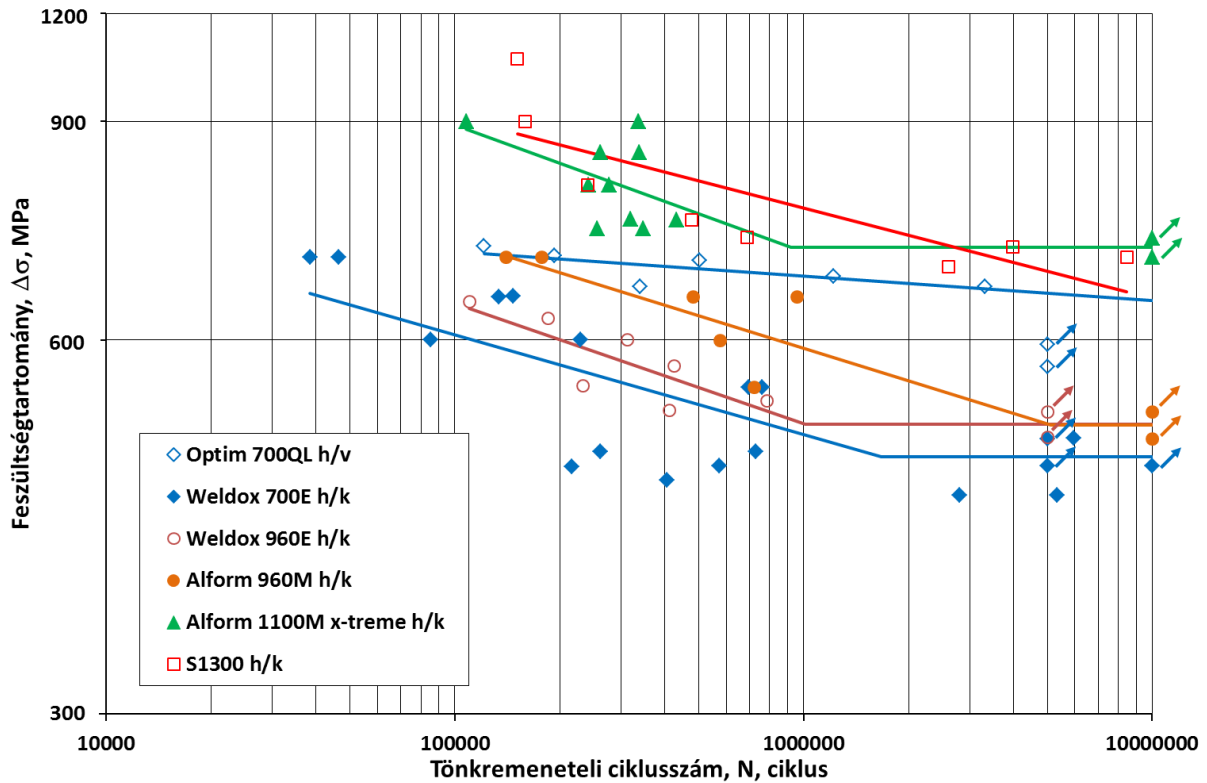
$$N(\Delta\sigma)^m = a, \quad (1)$$

ahol az összefüggésben szereplő m és a az anyagminőségtől és a körülményektől függő állandók. Az (1) összefüggés logaritmálása és átrendezése után a

$$\log(\Delta\sigma) = \frac{\log(a)}{m} - \frac{1}{m} \log(N) \quad (2)$$

alakhoz jutunk, amely kettős logaritmusos rendszerben egy egyenes, esetünkben a határgörbe élettartam szakaszának az egyenlete. A határgörbe kifáradási határ szakaszának az egyenletét, vagyis a kifáradási határ értékét, a túlélő próbatestek átlagértékei segítségével számítottuk, azokban az

esetekben, amikor voltak túlélő próbatetek. Ezeket a határgörbék szemléltetik a 3. ábrán látható egyenesek és ezeknek a görbéknek a paramétereit foglalja össze a 4. táblázat.



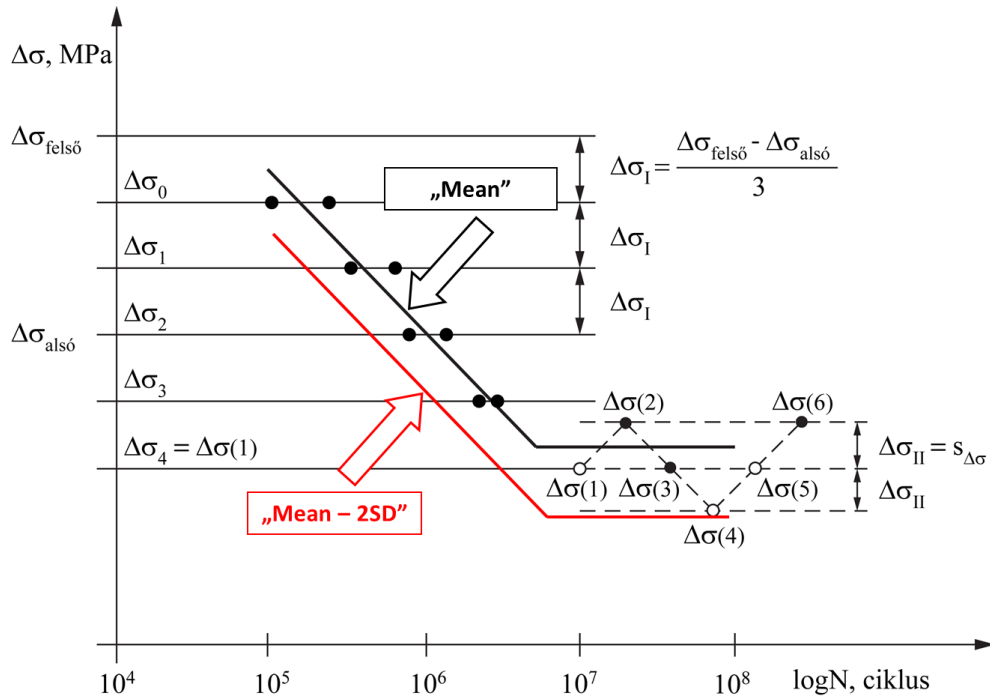
3. ábra. A fárasztóvizsgálatok eredményei.

3. táblázat. A vizsgált acélok nagyciklusú fáradására meghatározott határgörbéinek a paramétereit.

Anyagminőség	m [-]	$\log(a)$ [-]	N_k [ciklus]	$\Delta\sigma_D$ [MPa]	$\Delta\sigma_{1E07}$ [MPa]
Optim 700QL	51,282	151,109	–	–	646
Weldox 700E	12,453	39,650	1,677 E06	483	–
Weldox 960E	10,288	33,887	1,014 E06	513	–
Alform 960M	11,494	37,855	5,122 E06	513	–
Alform 1100M x-trem	9,775	33,849	0,922 E06	712	–
S1300	13,755	45,679	–	–	–

A 3. ábrán szemléltetett határgörbék, felépítésükből következően, az 50%-os valószínűséghez tartozó görbék, egyes előírások megnevezésével „Mean” görbék. A határgörbék közül a műszakilag szükséges biztonság figyelembevételével úgy kapunk fáradási szilárdsági görbét, hogy a határgörbét két szórás („2SD”) tartománnyal lefelé toljuk („Mean – 2SD”). Ezt szemlélteti a 4. ábra, amelyen

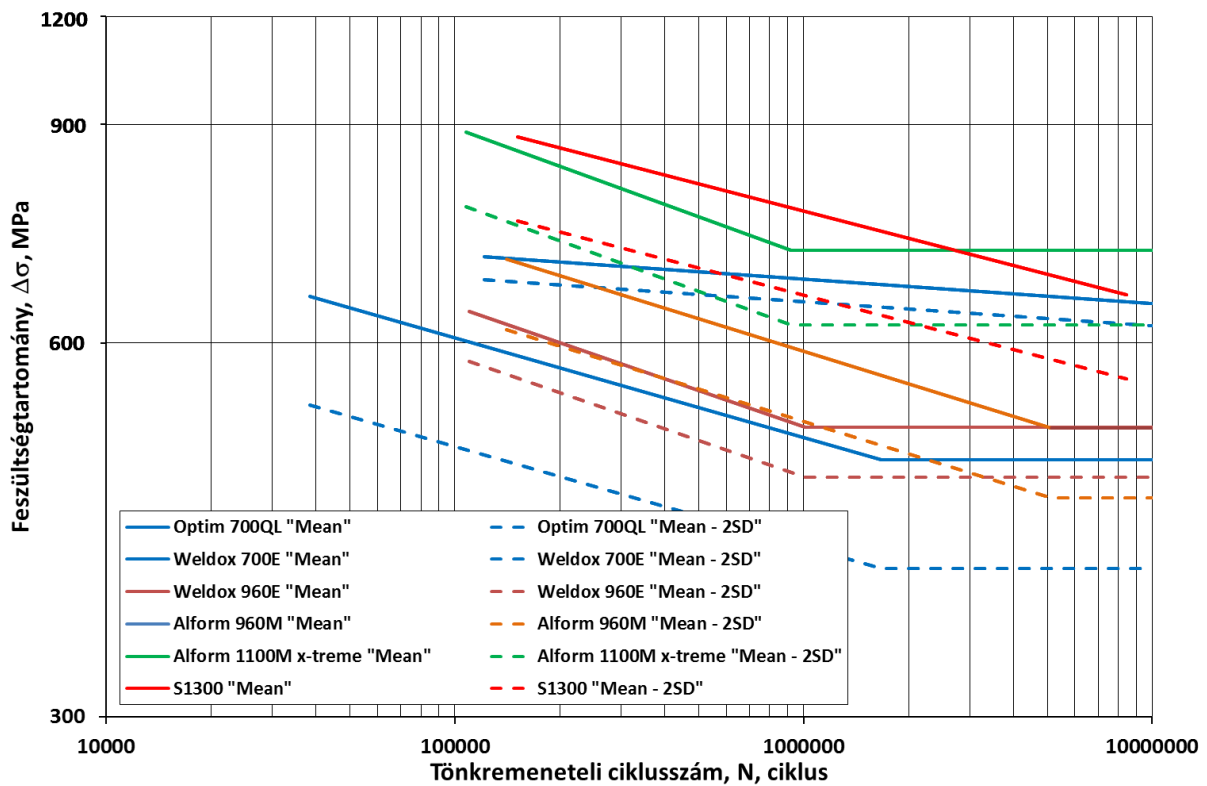
láthatjuk a fárasztóvizsgálatok elvégzésének a logikáját is, amelynek a részletezésétől most eltekintünk. Annyit azért megemlítünk, hogy az élettartam és a kifáradási határ szakasz (fárasztási) feszültségszintjeit egymással összefüggésben, de eltérő filozófiával kell meghatározni.



4. ábra. A fárasztóvizsgálatok elvégzésének logikája, a határgörbék („Mean”) és a határgörbékéből származtatott fáradási szilárdsági görbék („Mean – 2SD”).

Az 5. ábra bemutatja a határgörbéket („Mean”, 3. ábra), valamint a fáradási szilárdsági görbéket („Mean – 2SD”), a 4. táblázat pedig összefoglalja a meghatározott fáradási szilárdsági görbék paramétereit.

Összevetve a 4. ábra görbéit, amelyeket nevezhetünk klasszikus Wöhler görbéknek, az 5. ábrán látható görbékkel, megállapíthatjuk, hogy nem minden esetre sikerült ilyen alakú, két szakaszra bontható görbét meghatározni. Négy esetben, a *Weldox 700E*, a *Weldox 960E*, az *Alform 960M* és az *Alform 1100M x-trem* anyagminőségek esetén, mind a vizsgálati eredmények számossága, mind azok elhelyezkedése lehetővé tette az élettartam szakaszból és kifáradási határ szakaszból álló görbék meghatározását. Az *Optim 700QL* anyagminőség esetében a túlélő próbatetek alacsony feszültségszintje „eltolta” volna a töréspontot a *10 000 000 ciklus* feletti igénybevételi szám tartományba, ezért annak megadásától eltekintettünk, helyette az élettartam szakaszra jellemző egyenes *10 000 000 ciklus*hoz tartozó értékét ($\Delta\sigma_{1E07}$) szerepeltetjük a 3. és a 4. táblázatokban. Az *SI300* anyagminőség vizsgálata során mindegyik próbatest eltört a *10 000 000 ciklus* elérése előtt, itt tehát nem volt túlélő próbatestünk. Erre az esetre csak az élettartam szakaszt leíró egyenes paramétereit adtuk meg, az eredmények által lehetővé tett értelmezési tartományban. A próbatetek számának növelése, nagy valószínűséggel, ezeket a nehézségeket feloldja. A görbékre és azok paramétereire tekintve szembevetendő, hogy a *h/k* orientációjú próbatetek nagyon hasonlóan viselkedtek az élettartam szakaszban, ugyanakkor eltérően a *h/v* orientációjú próbatestektől.



5. ábra. A vizsgált acélokra meghatározott határgörbék („Mean”) és a határgörbékéből származtatott fáradási szilárdsági görbék („Mean – 2SD”).

4. táblázat. A vizsgált acélok nagyciklusú fáradására meghatározott fáradási szilárdsági görbéinek a paraméterei.

Anyagminőség	m [-]	log(a) [-]	N_k [ciklus]	$\Delta\sigma_D$ [MPa]	$\Delta\sigma_{1E07}$ [MPa]
Optim 700QL	51,282	150,186	–	–	620
Weldox 700E	12,453	38,557	1,677 E06	395	–
Weldox 960E	10,288	33,473	1,014 E06	467	–
Alform 960M	11,494	37,207	5,122 E06	450	–
Alform 1100M x-trem	9,775	33,263	0,922 E06	620	–
S1300	13,755	44,746	–	–	–

4. Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján a következő összegző jellegű megállapítások tehetők, illetve következtetések fogalmazhatók meg.

- A JSME S 002 (Anon., 1981) előírás alkalmazásával megalapozottan tervezhetők meg a nagyciklusú fásztóvizsgálatok és jól kézben tarthatók a szükséges próbatest számok. Ezek együttese lehetőséget ad a vizsgálatok nagy idő igényének reális keretek között tartására.
- A fásztóvizsgálatok eredményeinek értékelésével, az élettartam szakaszban a legkisebb négyzetek elvével számított egyenes egyenlete, a kifáradási határ szakaszban pedig a túlélő próbatestek átlaga, nagyciklusú fáradásra érvényes határgörbék értelmezhetők, illetve határozhatók meg („Mean”).
- A határgörbék biztonság irányába történő eltolásával, ami kisebb élettartamot és alacsonyabb kifáradási határt jelent, nagyciklusú fáradásra érvényes fáradási szilárdsági görbék értelmezhetők, illetve határozhatók meg („Mean – 2SD”).
- Az általunk vizsgált 1100 MPa-os és 1300 MPa-os szilárdsági kategóriába tartozó acélok fásztási eredményei azt mutatták, hogy az élettartam szakasz és a kifáradási határ szakasz találkozásánál kis feszültségtartomány változáshoz nagy fáradási ciklusszám változás tartozhat. Ez utal arra, hogy a nagyobb szilárdság esetén nehezebben keletkezik repedés, de az gyorsabban képes terjedni.
- Az általunk vizsgált 1100 MPa-os és 1300 MPa-os szilárdsági kategóriába tartozó acélok eredményei teljes összhangban vannak a korábban vizsgált (Gáspár, 2016; Dobosy, 2017), 700 MPa-os és 960 MPa-os szilárdsági kategóriákba tartozó acélokon kapott eredményekkel.
- Az a tény, hogy a kifáradási határ környezetében nagy a fáradási ciklusszámok szórása, felveti azt a metodikai kérdést, hogy a klasszikus Wöhler görbe (eső és vízszintes egyenes) helyett két eső egyenessel írjuk le az ultra-nagyszilárdságú acélok nagyciklusú fáradási viselkedését. Ez a határozott kifáradási határ eltűnését is jelenti, amelynek méretezési aspektusai is lehetnek, illetve vannak.
- Az 1100 MPa-os és az 1300 MPa-os szilárdsági kategóriába tartozó acélok vizsgálatait folytatni kell, mindenek előtt az ilyen acélokból készült hegesztett kötések vizsgálataival, hasonlóan az alacsonyabb szilárdsági kategóriájú acélok hegesztett kötésein végzett korábbi vizsgálatokhoz (Gáspár, 2016; Dobosy, 2017; Mobark, 2020).

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

Irodalom

- [1] Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., Koritárné, F. R., Kuzsella, Lné. K. Zs. (2012). *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*. Lukács, J. (szerk.). Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [2] Zsáry, Á. (1965). *Méretezés kifáradásra a gépészetben*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [3] Anon. (2009). MSZ-EN 1993-1-1: *EUROCODE 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-1 rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok*.
- [4] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Anon. (1999). BS 7910: *Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures*. British Standards Institution, London, U. K.
- [6] Barsom, J. M., Rolfe, S. T. (1999). *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*. ASTM manual series: MNL41. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

- [7] Lee, Y.-L., Pan, J., Hathaway, R., Barkey, M. (2005). *Fatigue Testing and Analysis. (Theory and Practice.)* Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [8] Dobosy, Á. (2017). *Tervezési határgörbék nagyszilárdságú acélokból készült, ismétlődő igénybevételű szerkezeti elemekhez.* PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc.
- [9] Gáspár, M. (2016). *Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott fejlesztése.* PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc.
- [10] Anon. (1981). JSME S 002: *Standard Method of Statistical Fatigue Testing.*
- [11] Nakazawa, H., Kodama, S. (1987). Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. In T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa (Eds.), *M. Statistical research on fatigue and fracture. Current Japanese materials research – Vol. 2.* (1st ed., pp. 59-69). Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan.
- [12] Mobark, H. F. H. (2020). *Fatigue strength and fatigue crack propagation design curves for high strength steel structural elements.* PhD Theses, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc.

SOME EXPERIENCES WITH POLYCRYSTALLINE DIAMOND COATINGS ON A STEEL SUBSTRATE DURING DRY SLIDING BALL-ON-DISC WEAR TEST CONDITIONS

Pusta Jalalova

PhD student, Department of Structural Integrity, Institute of Materials Science and Technology, University of Miskolc, H-3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, jalalova.pusta@student.uni-miskolc.hu

Fruzsina Fülöp

PhD student, Department of Structural Integrity, Institute of Materials Science and Technology, University of Miskolc, H-3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, fulop.fruzsina@uni-miskolc.hu

Maria Berkes Maros

Full professor, Department of Structural Integrity, Institute of Materials Science and Technology, University of Miskolc, H-3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, maria.maros@uni-miskolc.hu

Abstract

Polycrystalline diamond (PCD) coatings are the hardest, most wear-resistant coatings available today. Their application properties, like the grain size, the surface microgeometry characteristics, or the thickness of the coating, are greatly influenced by the characteristics of the coating. When designing wear-resistant PCD coatings, it is essential to be acquainted with the effect of these parameters on the wear behavior, which can be evaluated with tribological tests. This kind of testing of innovative coatings made with new technology is a fundamental condition for the effective and economical production and application of coatings. In this article, the authors report on their first experiences of the wear test performed on CVD-produced PCD coatings with the purpose of mapping the appropriate test parameters for targeted wear tests planned on the tested high-cost advanced coatings.

Keywords: *PCD coating, friction, ball-on-disc wear test, tribochemical wear, abrasive wear.*

Absztrakt

A polikristályos gyémánt bevonatok (polycrystalline diamond = PCD) a napjainkban elérhető legkeményebb, legkopásállóbb bevonatok. Felhasználói tulajdonságaikat nagymértékben befolyásolják a bevonat olyan jellemzői, mint a szemcseméret, az ezzel összefüggő felületi mikrogeometriai jellemzők, vagy a bevonat vastagsága. A kopásálló PCD bevonatok tervezésekor nélkülözhetetlen, hogy ismerjük ezeknek a paramétereknek a kopási viselkedésre gyakorolt hatását, amelyet tribológiai vizsgálatokkal értékelhetünk. Az új technológiával készült újszerű bevonatok ilyen jellegű vizsgálata alapvető feltétele a bevonatok hatékony és gazdaságos előállításának és alkalmazásának. A cikkben CVD eljárással készült polikristályos gyémánt bevonatok kopásvizsgálatai kísérleteinek tapasztalatairól számolunk be, amelyek célja a rendkívül költséges bevonatok célirányos kopásvizsgálataihoz megfelelő vizsgálati paramétereket feltérképezése volt.

Kulcsszavak: *PCD bevonat, súrlódás, ball-on-disc kopásvizsgálat, tribokémiai kopás, abrazív kopás*

1. Introduction

Diamond is the hardest, most wear-resistant material found in nature. However, natural diamond single crystal is very expensive, and its application properties are not as favourable for engineering applications as those of polycrystalline diamond [1].

PCD is an artificially created diamond produced in laboratory circumstances by powder metallurgy involving a sintering process. In a polycrystalline diamond structure, the randomly oriented diamond crystals are attached to a matrix. The matrix constitutes a bonding phase (e.g., Co, Sn, Ni) to hold the diamond grains together and a filling phase (e.g., α -bronzes) to fill the pores [2].

Its extraordinary hardness and wear resistance make PCD an ideal tool material for cutting operations. Due to its rigidity, dimensional stability, and electrical conductivity, it is efficiently used in measuring devices, e.g., as a sensor head of an atomic force microscope (AFM).

An essential characteristic of polycrystalline diamond is that it readily reacts chemically with certain metals, which causes damage to the tool. These metals can be classified into two groups. Metals of the first one – Si, W, Ti – form their stable carbides. The elements of the second group, including Fe, Co, C, and Ni, are solvents for carbon and exhibit poor or no adhesion via graphitised interfaces [3]. Due to its tendency for chemical reactivity, PCD is mainly used for machining non-ferrous metals (e.g., Al alloys) and non-metallic materials (e.g., wood or ceramics).

In machining, where the characteristic wear mechanism is the abrasion, PCD, produced by synthesis at high pressure and high temperature (HPHT), is already a proven and widely used tool material. In recent decades, its use has been widespread in the mass production of hypereutectic aluminum-silicon alloys in the automotive industry, for the machining of non-ferrous copper alloys, or printed circuit boards made of abrasive plastics and fiber-reinforced plastic composites (GFRP, CFRP, etc.), as well as the bulk machining of wood-based composites, like chipboards [4]. PCD is utilised increasingly in the precision machining of ultra-high-strength aluminum alloys (7000 series) in the automotive industry, where surface finish is a crucial factor in properly operating these lightweight components.

Several efforts have been made in the last decades to solve the problem caused by the chemical reactivity of the PCD resulting in considerable tribochemical wear during the machining of the different metallic alloys. An overview of the methods applied to overcome this shortcoming is provided by a recent review [5] giving a systematic description of the currently existing solutions.

Application of PCD as a coating material provides cutting tools, plastic injection mould tools, and biomedical tools with improved mechanical and thermal fatigue resistance, furthermore outstanding tribological performance [6]. Due to their high thermal conductivity and biocompatibility, PCD coatings are also used as heat sink substrates and biosensors [7]. In the tool industry, PCD coatings are produced by the HPHT method and by Chemical Vapour Deposition (CVD).

Both types of coatings meet the most stringent requirements for cutting and machining materials for the aeronautical sector. These are the high hardness (50–100 GPa), high wear resistance, extremely low coefficient of friction (0.05 ÷ 0.2), chemical inertness, high thermal conductivity (800 W/m-K), good resistance to high temperature, low thermal expansion, and adjustable electrical conductivity [5]. Despite these promising properties, their high cost remains a significant limitation in this sector. Therefore, efforts to find the most appropriate methods for processing diamond coatings with optimum features for a given application are evident.

Regarding the performance of CVD-processed PCD coatings in tribological applications, the most important factors influencing the wear resistance are grain size, film thickness, residual stresses, the

surface roughness of the coating, surface roughness of the substrate, graphitization effect of the steel, etc. [8, 9, 10, 11].

One of the primary reasons for lower wear and scratch resistance is the weak adhesion of the coating to the substrate. In the tool industry, the most important tool materials are steel. Besides the coating characteristics, the adherence of the PCD coatings to the steel substrate depends, among others, on the substrate microgeometry.

In the current work, we introduce our first experiences obtained during the tribological investigation of CVD-produced polycrystalline diamond coatings with different surface microgeometry of the substrate. With this aim, we performed trial wear tests in dry sliding ball-on-disc configuration and considered the possibility of an instrumented scratch test of the coatings.

Ball-on-disc wear tests on PCDs are more widely used and reported in the literature [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Nevertheless, further improvement of the coating performance is still an actual object, and new efforts are being made to achieve an even more favourable combination of the influencing factors. Another essential tribological test procedure is represented by the instrumented scratch test. In this regard, the available research reports are limited [20, 21]. This latter aspect is explained by the fact that during scratch testing of PCD coatings, the applied stylus, a Rockwell diamond cone, would suffer a considerable material loss due to wearing. Regarding the high costs of such tools, scratch testing would be unavoidably expensive. The current paper also considers the possibility of coping with this problem.

2. Test materials and methods

The test samples were provided by the research cooperation partner at Friedrich-Alexander University (FAU), Erlangen-Nürnberg.

The test pieces were rectangular samples with dimensions of 10×20×4 mm (type A) and 6 mm thick discs with a diameter of 30 mm (type B). The coating was a polycrystalline diamond with an identical grain size (not defined in the test) and a coating thickness of 11 μm. The R_z roughness was 4 and 6 μm for type-A samples, whereas it was 6.5 and 8.4 μm for the type-B samples. The substrate was a hardened tool steel with a hardness of 420HV.

Due to the high costs of such kind of PCD coatings, the tests samples and the trial nature of the experiments, traces of other tests previously performed by the cooperating partner (e.g., hardness indentations, worn craters from the ball-cratering test, etc.) existed on the surface of the test pieces. These damages were taken into account when selecting the test area.

The tests were accomplished on a multi-functional surface tester type UNMT-1 (producer CETR, CA, USA) in the Tribology and Surface Testing Laboratory of the Institute of Materials Science and Technology at the University of Miskolc.

The general test parameters (hold for all measurements) were as follows. Ball-on-disc wear tests without lubrication were performed at room temperature and ambient air. The nominal value of the sliding radius was $R = 1.5$ mm. The unusually small radius was to utilize the limited test area available on the test pieces. The counterparts were ceramic balls with a diameter of $\phi 5.95$ mm.

The main objective of the tests was to find the appropriate test conditions to obtain relevant and reliable tribological characteristics, which is a great challenge with the tested diamond coatings representing the hardest material in nature. The test variables were chosen as follows: ball materials were SiC, Al₂O₃, and Si₃N₄ (all of them Sintertechnik grade [22]). The applied normal load values were $F = 5, 10, \text{ and } 20$ N. The rotational speed, n , was chosen as 10, 200, 300, and 700 1/min, resulting in sliding speed, v values of 15.7, 31.4, 47.1, and 110 mm/s. The pre-defined total sliding distance was

$L = 800$ m. However, due to intolerable vibrations, its realized value was sometimes considerably reduced (e.g., down to 10 – 80 m). The tests were planned to continue until steady-state conditions were reached. However, due to pairing PCD coatings (discs) with ceramic counterparts (balls) of much lower hardness, an unusual material loss of the ball was characteristically observed in most cases. Therefore, the test had to be stopped occasionally after a very short running-in period – e.g., 5–10 m sliding distances – without the steady-state would have been reached.

The exact values of the applied test variables are given in the description of each measurement. All test samples and balls were wiped with alcohol-soaked cotton wool, and the test samples were subjected to an additional ultrasonic cleaning in alcohol for 10 minutes.

3. Results

3.1. Trial_1

The specimen was of type A (i.e., rectangular plate). The ball material was SiC; the rotational speed was $n=200$ 1/min (sliding speed was $v=31.4$ mm/s). The normal load was $F=20$ N, and the test duration was $t=3.6$ min. The friction coefficient diagram is shown in Figure 1. A visible wear track with massive debris of ball origin was obtained (Figure 2), and a large wear scar was produced on the ball.

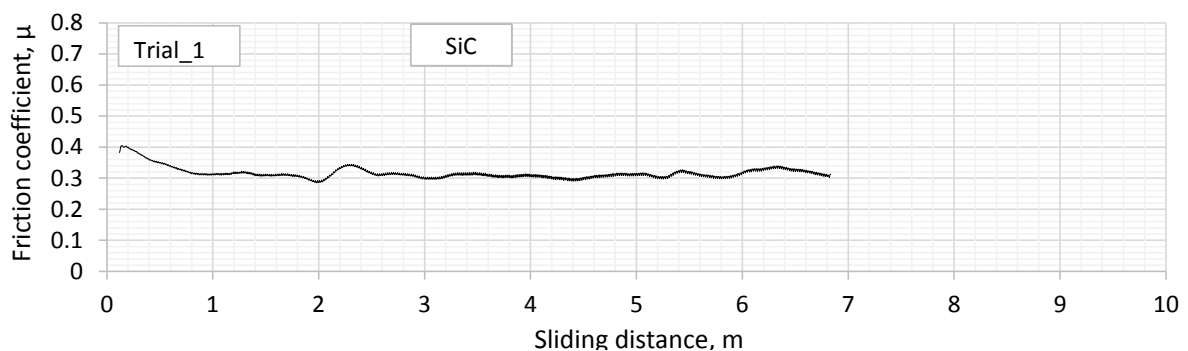


Figure 1. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_1 test.

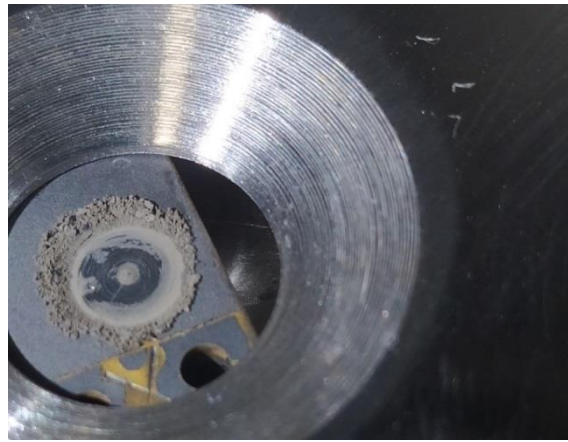


Figure 2. The worn area on the specimen in the case of the Trial_1 with the wear debris; (note the excessive wear debris after 7 m of sliding distance).

The excessive wear of the ball prevented the test from being continued. It should be mentioned that SiC ceramics show a characteristic tribochemical wear mechanism during testing at ambient air (containing water vapour). The features (amount, strength, toughness, etc.) of the developed tribofilm highly depend on test circumstances. However, tribofilm formation unambiguously consumes the SiC ball material during friction.

Based on these experiences, Al_2O_3 was chosen as the ball material for the second test to reduce the ball wear. The idea is supported by the results of Qin et al. obtained with various mating materials [14].

3.2. Trial_2

The specimen was a rectangular A-type one. We used an alumina ball, a rotational speed of $n = 200$ 1/min (sliding speed of $v = 31.4$ m/s), and a normal load of $F = 10$ N. The duration of the test was $t = 2.9$ min.

The corresponding friction diagram is found in Figure 3, and the worn area is shown in Figure 4.

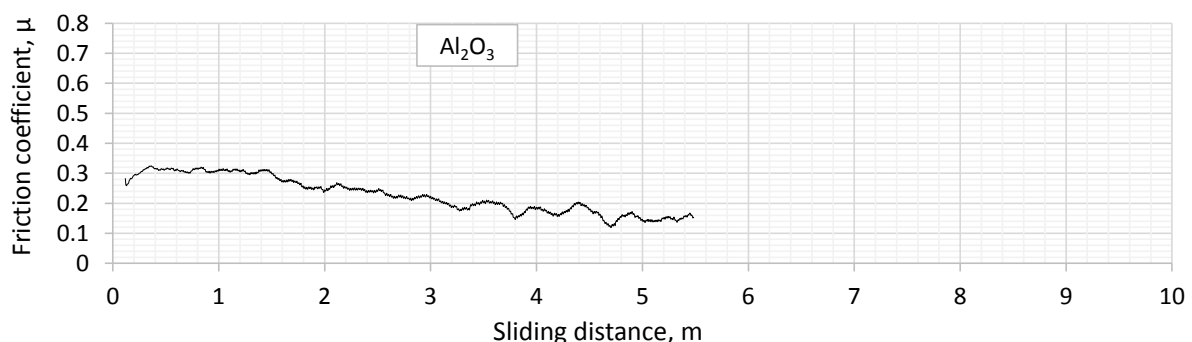


Figure 3. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_2 test.

Excessive wear on the ball was observed, and a visible wear track on the disc appeared. The powdered alumina debris was partially burnished into the wear track. A vast noise accompanying the test from the beginning and the considerable ball-material loss prevented us from continuing the test.

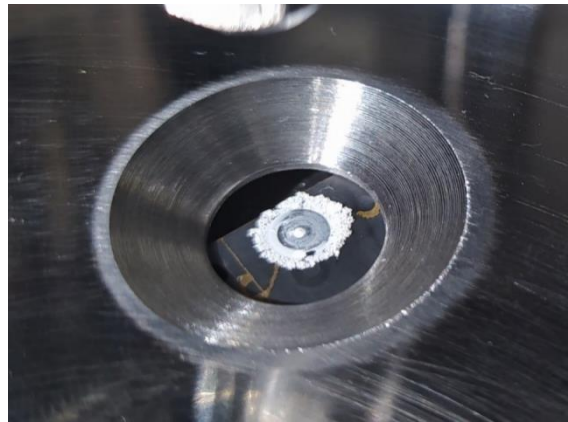


Figure 4. The worn area of the Trial_2 probe with the alumina wear debris.

Based on the observations, we established that the Al_2O_3 ball used is unsuitable for a frictional counterpart during wear testing of the investigated PCD coating. The possible reasons may be as follows. Alumina is a highly brittle, low-toughness ceramic material that is prone to abrasive wear and forms wear debris of high hardness. Another possible reason is that the porosity of the applied ceramic ball was considerably high. Thus pores and cracks of processing origin in the ball material represented a significant stress-concentration effect leading to premature ball failure due to intensive abrasive wear.

The normal load and the sliding speed were decreased during the Trial_3 test to reduce the ball wear.

3.3. Trial_3

The applied specimen was a round B-type disc. The other test parameters were Al_2O_3 ball, a rotational speed of $n = 100$ 1/min (sliding speed of $v = 15.7$ mm/s), a normal load of $F = 5$ N, test duration of $t = 3.4$ min.

The related friction coefficient diagram is illustrated in Figure 5. Excessive wear was found on the ball, but no visible wear track on the disc appeared (Figure 6).

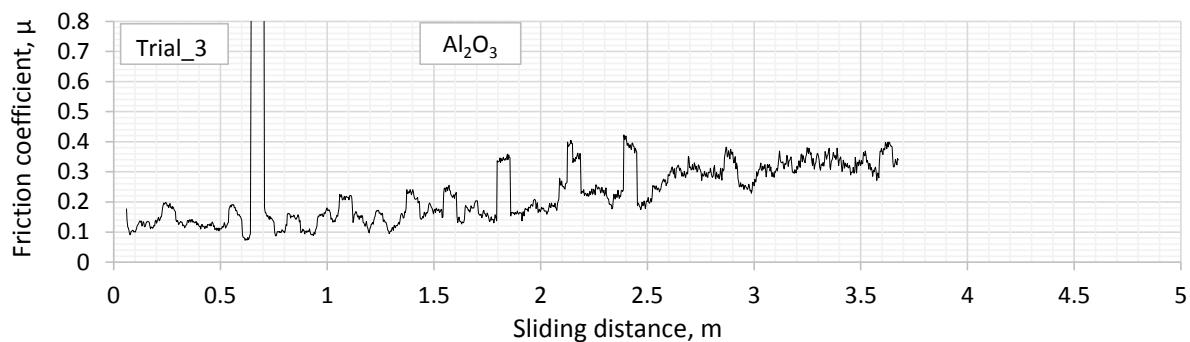


Figure 5. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_3 test.

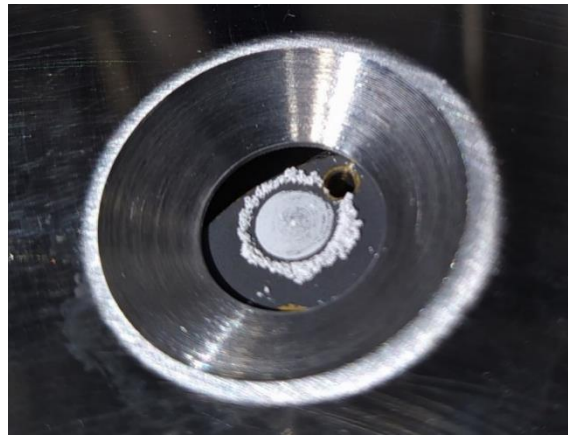


Figure 6. The extremely wide wear track with debris on the tested surface after the Trial_3 test.

Despite the milder loading conditions, a robust and periodic fluctuation of the friction coefficient was observed. It suggests that the load control was not satisfying. It is generally observed for this machine at extremely low loads since the optimal loading range falls between 10-180 N. Due to this force control problem, the test was interrupted when an evident and monotonic increase in the friction coefficient was observed.

The normal load and sliding speed were even further reduced to get further experience with the SiC ball used in the previous trial.

3.4. Trial_4

The specimen was a rounded B-type specimen. Further parameters were as follows: SiC ball, a rotational speed of $n=100$ 1/min (sliding speed of $v=15.7$ mm/s), a normal load of $F=10$ N, and test duration of $t=1$ h. The friction coefficient diagram is shown in Figure 7, and the worn track is visualised in Figure 8.

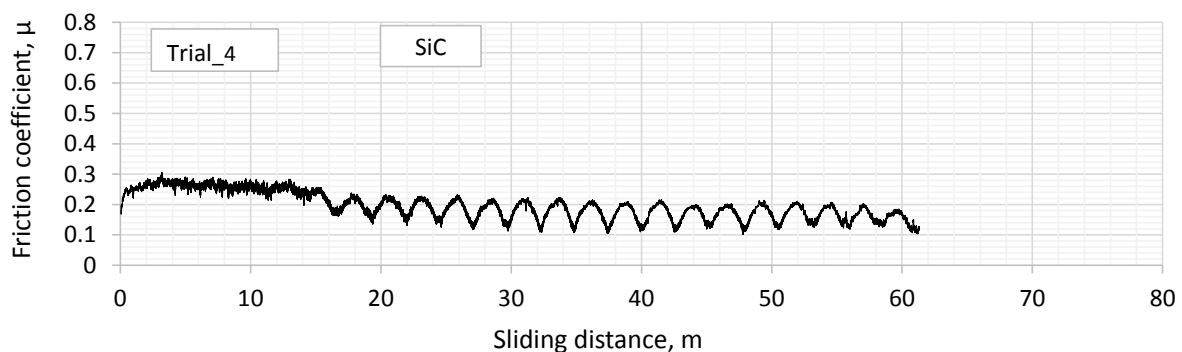


Figure 7. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_4 test.



Figure 8. The worn area on the specimen for the Trial_4 with the wear debris; (note the amount of wear debris after 60 m of sliding distance).

After a one-hour of rubbing (at ~56 m sliding distance), a metallic, periodic creaking noise started to be heard. At the very beginning, it was loud, then quieter and loud again. It is supposed that reaching a critical tribofilm thickness, the competing processes of the delamination and tribofilm formation get balanced, leading simultaneously to a continuous supply of wear debris in the wear track. The periodic increase in the friction coefficient can be due to a growing amount of wear debris accumulating in front of the ball and impeding its movement. At a certain amount, the compacted powder was pushed out of the wear track by the tool, and thereby temporarily, it could advance with less obstruction.

Despite the periodic fluctuation of the friction coefficient, its value shows a continuously decreasing trend which is also a general feature of the friction processes accompanied by tribofilm formation.

Another possible reason for the decrease in the coefficient of friction may be the detachment of particles from the PCD coating involved in the tribofilm formation process. The literature review should be continued, and fine-scale microstructural analyses for proving the phenomenon should be performed to substantiate this hypothesis.

Altogether a high amount of wear debris was formed during the test, most of which remained around the wear track, as shown in Figure 8. After removing the wear debris, crack-like damage cannot be recognized by the naked eye. Only the ball material was consumed during the process, while the material of the disc remained virtually intact. Revealing any damage on the disc requires microscopic examinations that were not applied in the trial test series, aimed at providing tribological characterisation at the possible lowest time and costs.

For utilising the assumed beneficial effect of the tribochemical nature of the SiC ceramics – occurring above a critical sliding rate [23] –, we attempted to increase the speed further.

3.5. Trial_5

The test conditions were: rounded B-type specimen, SiC ball, a rotational speed of $n=300$ 1/min (sliding speed of $v=47.1$ mm/s), a normal load of $F=10$ N, test duration of 2 h.

The complete friction coefficient diagram is illustrated in Figure 9. The worn area of the disc with a large amount of wear debris is shown in Figure 10.

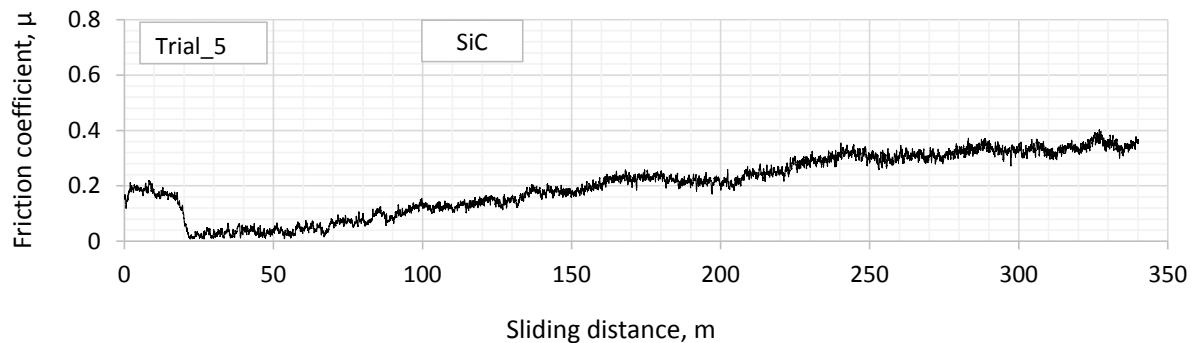


Figure 9. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for Trial_5 test.

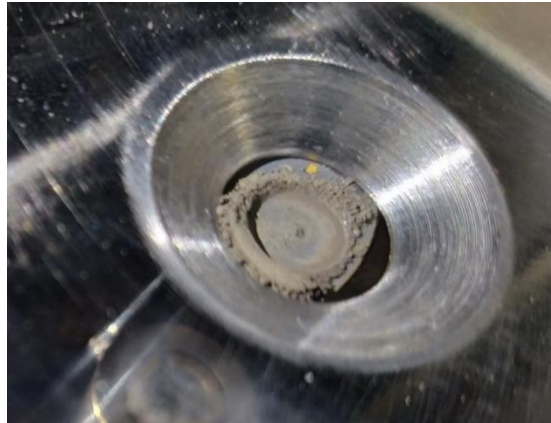


Figure 10. The worn area of the specimen with a large amount of wear debris after the Trial_5 test.

We successfully performed a two-hour study without critical damage to the ball. However, no steady-state condition was achieved during the wear test. A loud, squeaking sound initially accompanied the friction process, which became quieter after 7 minutes, corresponding to ~20 m sliding distance. When analysing the diagram in the first 20% (70 m) of the total sliding distance, it is seen that the friction coefficient is significantly reduced between distances of 20–50 m. While the average friction coefficient is 0.17 in the first 20 m, it drops to 0.03 in the 20–50 m region of the sliding distance, i.e., it is reduced by one order of magnitude. A tribochemical process occurs here, and particles originating from the coating material are also involved.

It is also seen in Figure 9 that the beneficial tribochemical effect is limited to a certain period, and for sliding distances greater than 50 m, a significant and monotonic increase of the friction coefficient starts. This increase is continued for the remaining total sliding distance, i.e., up to 350 m, when it approaches the value of $\mu = 0.3$. The physical background of the observed low-friction behaviour and its dependence on the loading conditions are suggested to be studied during future experimental work.

We decided to increase the sliding speed significantly based on the results obtained.

3.6. Trial_6

The test conditions were adjusted: rounded B-type specimen, SiC ball, a rotational speed of $n=700$ 1/min (sliding speed of $v=110$ mm/s), and a normal load of $F=10$ N. The test duration was 9.8 min.

The friction coefficient diagram is illustrated in Figure 11, and the worn area on the disc with a large amount of wear debris is shown in Figure 12.

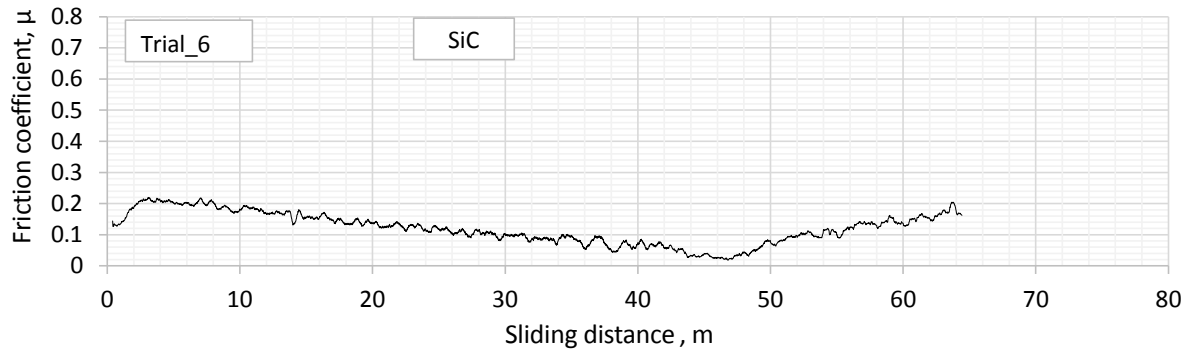


Figure 11. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_6 test.



Figure 12. The worn area of the specimen with the massive wear debris at the end of the Trial_6 test. The debris partially drifted out of the worn area, then fell into the container below the specimen due to the high rotational speed.

The investigation was accompanied by a frighteningly loud, sharp, squeaking sound from the beginning. The experiment was stopped within 10 min due to the powerful sound effects and because the coefficient of friction began to increase sharply, presumably due to the intensification of the abrasive debris formation. Analysing the friction coefficient values, the low, i.e., $\mu = 0.2$ initial value and its continuous decrease along the first 50 m of sliding distance suggest a tribochemical process retaking place. It is also supported by the fact that the friction coefficient value becomes extremely low, $\mu = 0.04$ along the section of 42-45 meters of the sliding distance.

However, the damage process – appearing in the form of tribochemical wear combined with fatigue – is accelerated after that due to the applied extremely high rotational (sliding) speed resulting in the formation of a high amount of wear debris (Figure 12). It changes the controlling wear mechanism into abrasive wear and increases the friction coefficient.

The applied combination of the loading parameters is not suitable for accomplishing systematic wear tests with the given tribosystem. Based on the experiences revealing the beneficial tribochemical processes with the SiC friction counterpart, we also decided to test the Si_3N_4 ball as a friction pair.

Si_3N_4 is also well-known for its self-lubricating nature due to tribochemical processes during friction in water vapour.

3.7. Trial_7

The test conditions were: B-type specimen, Si_3N_4 ball, a rotational speed of $n=300$ 1/min (sliding speed of $v=47.1$ mm/s), and a normal load of $F=10$ N. The planned test duration was 2 h.

The friction coefficient diagram is seen in Figure 13. The worn surface of the specimen, with wear debris, is illustrated in Figure 14.

We successfully performed a two-hour experiment reaching a steady-state friction coefficient. Compared to the previous test with the SiC counterpart, the friction coefficient is characteristically higher, i.e., $\mu=0.4$ in the steady-state condition, a feature of Si_3N_4 ceramics [24].

No loud noise accompanied the test, and it was quiet throughout the whole sliding time. The formation and the delamination of the tribofilm were probably balanced. The tribofilm could absorb the vibrations, leading to this low noise friction phenomenon. In addition, the tribofilm provided continuous lubrication between the contact surfaces of the friction counterparts.

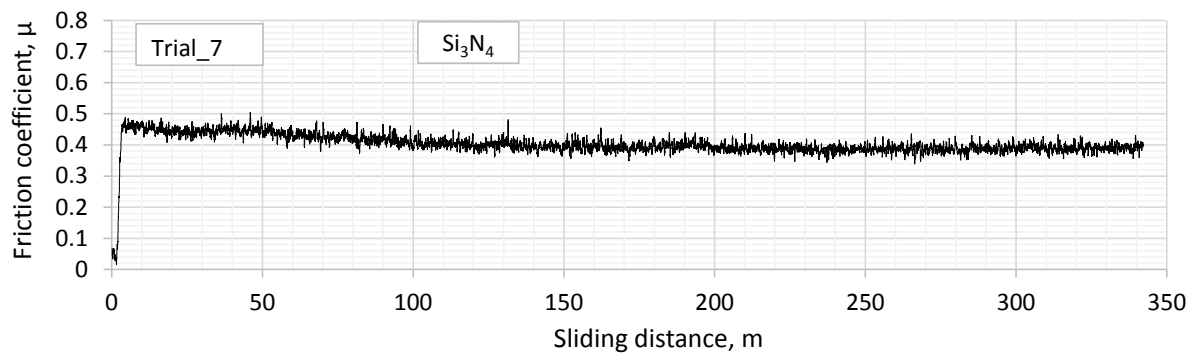


Figure 13. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_7 test.

Based on the obtained results, we decided to continue the wear testing with an increased rotational speed of 700 1/min, to compare the behaviour of the tribosystems under the same loading conditions when using SiC and Si_3N_4 balls.

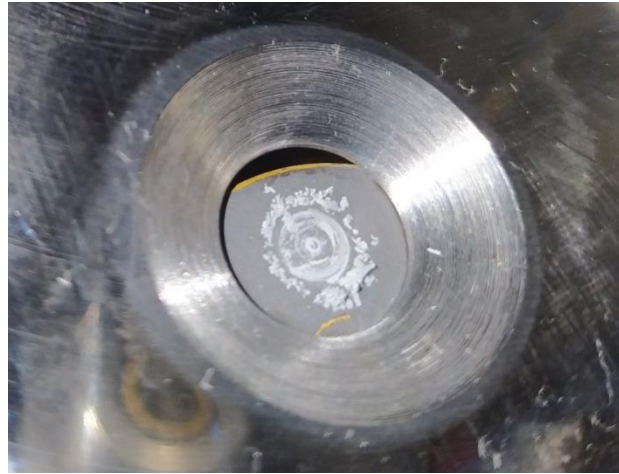


Figure 14. The worn area of the specimen with the wear debris after the Trial_7 test.

Besides, we intended to increase the load time, i.e., the total sliding distance, if it is allowed by the resulting ball wear.

3.8. Trial_8

The test conditions, being very similar to those of the Trial_7 test, were as follows: B-type specimen, Si_3N_4 ball, a rotational speed of $n = 700$ 1/min (sliding speed of $v = 110$ mm/s), and a normal load of $F = 10$ N. The planned test duration was 2 h.

The test was quiet throughout the whole procedure. The friction coefficient values were higher along the entire sliding distance than those obtained for the Trial_7 test (Figure 15). The difference was slight but held for the entire test. The friction coefficient value stabilized after ~ 200 m, at an average steady-state value of $\mu_{ss} \sim 0.4$, and held for the remaining part of the sliding distance, which was the longest among the 10 executed trial tests.

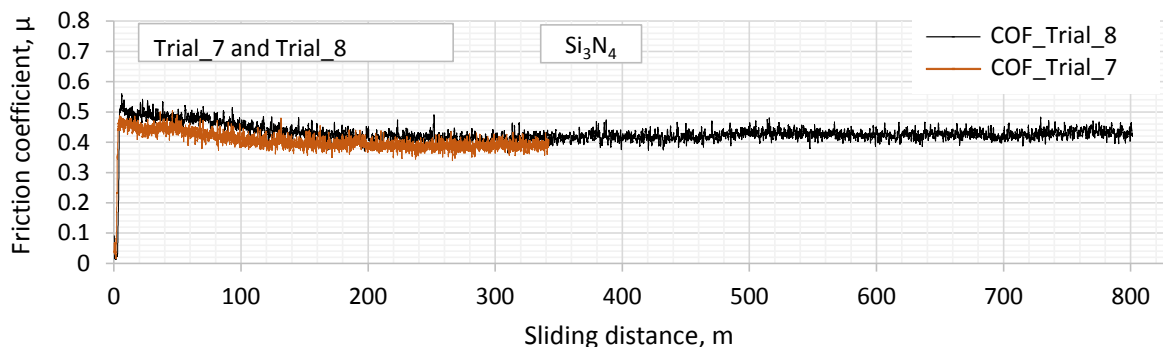


Figure 15. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_8 test.

After completing the test, no visible debris was found inside and around the worn track region (Figure 16), supposedly due to the high rotational speed. Some debris residue was held off by the clamping ring, which redistributed them along its circumference.



Figure 16. The worn area of the specimen with the residue of wear debris distributed along the circumference of the clamping ring during the Trial_8 test.

The ball wear in the Trial_7 and Trial_8 tests were similarly high but lower than in the previous tests, accomplished using a SiC ball counterpart. This behaviour provided the possibility for realising the test with longer distances and initiated us to make a further test with the Si₃N₄ ball at a higher speed while reducing the loading force.

3.9. Trial_9

The test conditions were: B-type specimen, Si₃N₄ ball, a rotational speed of $n = 700$ 1/min (sliding speed of $v = 110$ mm/s), and a normal load of $F = 5$ N. The planned test duration was 2 h, but the actual time was 6 min. The friction coefficient diagram for the Trial_9 test is seen in Figure 17. Results of the post-test visual investigations revealed surface cracks crossing the wear track, which were not visible before the test but certainly existed before it.

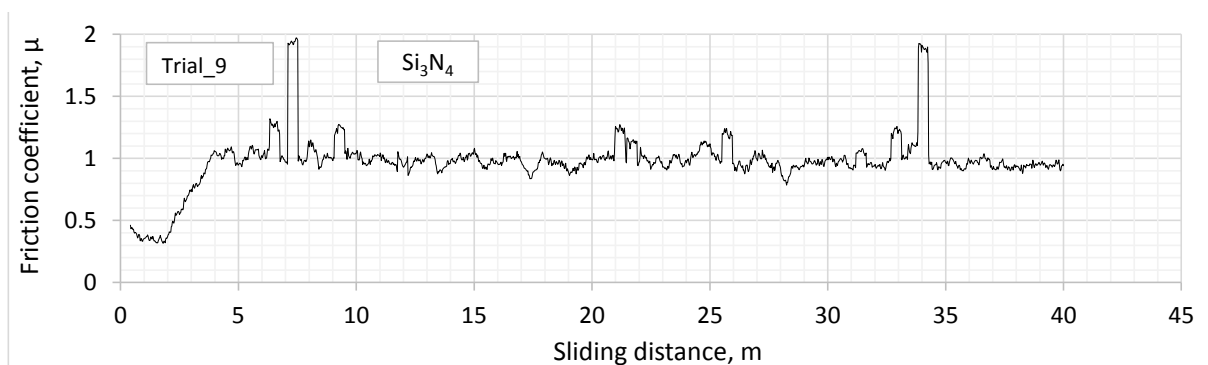


Figure 17. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_9 test.

We suppose that these crossing grooves, originating probably from previous tests performed by the cooperation partner, disrupted the integrity of the coating and initiated a premature failure, leading to an extremely high coefficient of friction increasing beyond $\mu=1$. The described unfavourable operating condition should not be maintained. Thus, to protect the integrity of the test equipment, the test was

stopped at 40 meters sliding distance. After this, we repeated the test with identical loading parameters.

3.10. Trial_10

The test conditions were: B-type specimen, Si_3N_4 ball, a rotational speed of $n = 700$ 1/min (sliding speed of $v = 110$ mm/s), and a normal load of $F = 5$ N. The planned test duration was 2 h, but the realized time was 3.6 min.

The friction coefficient diagrams for the Trial_10 test are shown in Figure 18.

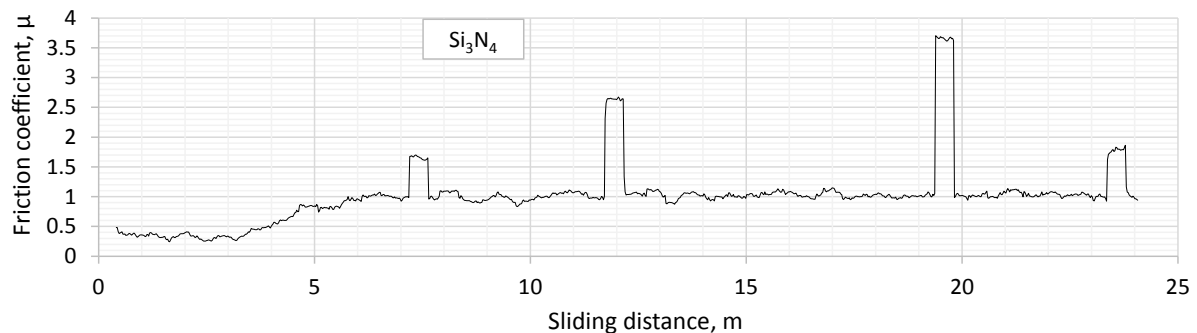


Figure 18. Friction coefficient vs. sliding distance diagram for the Trial_10 test.

Besides the former observations, another reason for the high coefficient of friction could be the difficulty of the force control at the very low normal load of $F = 5$ N, which falls to the very bottom of the test range; thus, it failed to stabilize. This condition may provide a possibility for adhesive wear and an accompanying stick-slip phenomenon. In future work, this assumption must be confirmed by additional wear tests supplemented by morphological and compositional analysis of the worn tracks.

Altogether we established that the applied combination of loading force and rotational speed is not suitable for ball-on-disc testing of the given tribo-pair.

4. Summary

Ten experimental ball-on-disc tests were executed on polycrystalline diamond coating deposited on a steel substrate. The summary of the test conditions and a brief evaluation of the measurement's output is given in *Table 1*. As seen, altogether, four of the performed ten trial tests can be qualified as successful, i.e., that can be regarded as representing a combination of the test parameters suitable to perform a valid measurement with rational test duration, measurable but not excessive wear.

The friction coefficient vs. sliding distance diagrams for tests evaluated as successful are shown in Figure 19. The effect of the investigated test parameters is evaluated as follows.

Ball material

Among the three types of applied ceramics ball materials, SiC and Si_3N_4 proved suitable for ball-on-disc testing the given quality polycrystalline diamond films. These ceramics are prone to tribochemical wear, i.e., tribofilm formation, thus being less sensitive to the highly abrasive effect caused by the extremely hard and rough PCD-coated counterparts. The applied Al_2O_3 ball material is unsuitable for testing the studied coating material.

Loading conditions

Concerning the normal load and the sliding speed – having the most significant influence on the wear behaviour – we found a combination of these parameters suitable for testing the wear behaviour of the studied PCD coatings. This combination is represented by the $F = 10$ N normal load and $v = 16 - 110$ mm/s sliding speed corresponding to $n = 100 - 700$ 1/min rotational speed with the applied $R=1.5$ mm sliding radius. Applying these parameters, the coefficient of friction can reach a steady-state value during such testing.

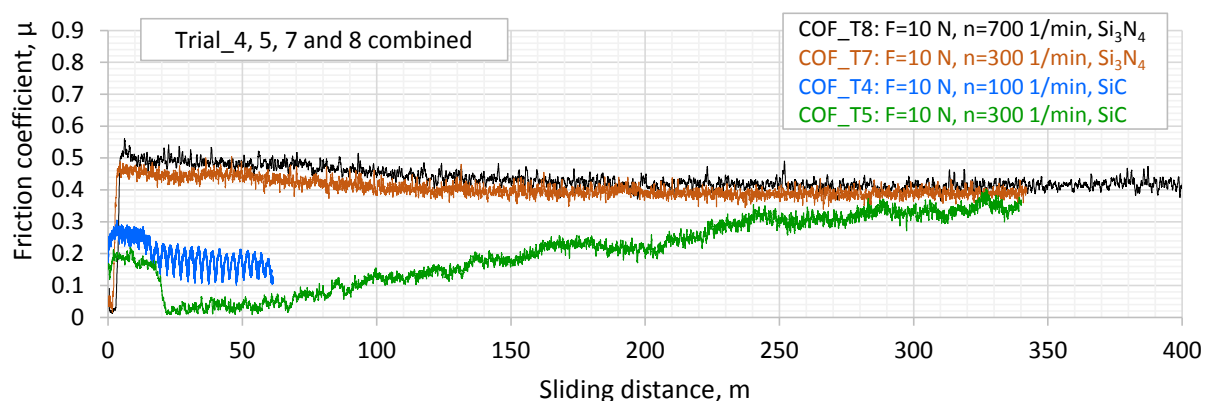
Table 1. Summary of the main features of the performed ten trial tests.

Test ID	Ball	F, N	v, mm/s	n, 1/min	Duration	μ_{\min}^*	μ_c^{**}	μ_{ss}^{***}	Evaluation
Trial_1	SiC	20	31.4	200	3.6 min	–	0.3	unknown	Unsuccessful
Trial_2	Al ₂ O ₃	10	31.4	200	2.9 min		0.15	unknown	Unsuccessful
Trial_3	Al ₂ O ₃	5	15.7	100	3.4 min	0.14	increasing	no	Unsuccessful
Trial_4	SiC	10	15.7	100	1 h		0.17	unknown	Successful
Trial_5	SiC	10	47.1	300	2 h	0.03	increasing	no	Successful
Trial_6	SiC	10	110	700	10 min	0.04	<0.2	no	Unsuccessful
Trial_7	Si ₃ N ₄	10	47.1	300	2 h	–	$\mu_c = \mu_{ss}$	0.39	Successful
Trial_8	Si ₃ N ₄	10	110	700	2 h	–	$\mu_c = \mu_{ss}$	0.42	Successful
Trial_9	Si ₃ N ₄	5	110	700	6 min	0.38	stick-slip?	no	Unsuccessful
Trial_10	Si ₃ N ₄	5	110	700	3.6 min	0.33	stick-slip?	no	Unsuccessful

* μ_{\min} : the lowest value of the friction coefficient during the entire test

** μ_c : the characteristic value of the friction coefficient during the test

*** μ_{ss} : the steady-state value of the friction coefficient during the test

**Figure 19.** The combined friction coefficient vs. sliding distance diagrams for the successful tests.

Environment

Silicon carbide and silicon nitride balls proved to be suitable frictional counterpart materials for the planned wear tests, the application of which is accompanied by a tribofilm formation facilitated by the humidity of the ambient air. Thus, the environment used in the tests provides a suitable atmosphere for such studies. Unfortunately, humidity control is impossible in the applied test equipment, but measuring the RH% value would be reasonable. Nor was the temperature under control. However, its effect, among the other parameters, is negligible in this low-temperature test configuration.

Friction coefficient

The characteristic friction coefficient (μ_c), and the steady-state μ values (μ_{ss}), were higher, i.e., $\mu \sim 0.4$ in the case of a Si_3N_4 counterpart, while they were lower, falling into the range of 0.03–0.2, when using a SiC counterpart. Besides, the observed $\mu = 0.03$ value unambiguously indicated the inherent low-friction behaviour of the PCD coating.

Altogether, the performed trial tests provided valuable and sufficient information to go on with purposefully designed, systematic, and targeted wear tests, which have the objective of investigating the effect of the main influencing parameters – i.e., the grain size, the surface roughness, and the coating thickness – of the polycrystalline diamond coatings.

Another direction of the tribological investigations is represented by the scratch tests. The need for repeated replacement of the damaged Rockwell diamond stylus used in standard scratch tests is accompanied by extremely high costs in the testing of polycrystalline diamond coatings. We worked out a novel test procedure using a stainless steel ball stylus to reduce these costs. This method is much cheaper and allows us to replace the probe with a new, intact piece for each test at a reasonable cost. The first trial test results are promising, to be reported in a separate publication soon.

5. Acknowledgment

The authors thank Prof. Stefan Rosival and Maximilian Göltz (Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, Friedrich-Alexander-Universität) for the valuable test samples, for joint professional discussions, and for sharing their previous experimental experiences.

References

- [1] Erdemir, A., Martin, J. M. (2018). Superior wear resistance of diamond and DLC coatings. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 22(6), 243-254. [doi:10.1016/j.cossms.2018.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.11.003)
- [2] Zeren, M., Karagöz, Ş. (2007). Sintering of polycrystalline diamond cutting tools. *Materials & Design*, 28(3), 1055–1058. [doi:10.1016/j.matdes.2005.09.018](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.018)
- [3] *Diamond handbook*. (2021). Element Six Technologies US Corporation, available online: <https://www.e6.com/en/knowledge-base/brochures> (accessed on 6 December 2022).
- [4] Astakhov, V. P., & Stanley, A. (2014). Polycrystalline Diamond (PCD) Tool Material: Emerging Applications, Problems, and Possible Solutions. *Traditional Machining Processes*, 1–32. [doi:10.1007/978-3-662-45088-8_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45088-8_1)
- [5] Guo, J., Zhang, J., Kang, R., Namba, Y., Shore, P., Yue, X., Wang, B., Guo, D. (2019). A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2 012001. [doi:10.1088/2631-7990/ab5d8f](https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab5d8f)

- [6] Ramírez, G., Gonzalez Castro, J. M., Orrit-Prat, J., Bonet, R., Cuadrado, N., Vilaseca, M., Carreras, L., Caro, J. (2022). Super-Hard DLC Coatings as an Alternative to Polycrystalline Diamond for Cutting Tools: Predictive Analysis of Aluminium Alloy Surface Quality. *Lubricants*, 10, 135. [doi.org/ 10.3390/lubricants10070135](https://doi.org/10.3390/lubricants10070135)
- [7] Pasquarelli A, Andrilli LHS, Bolean M, Reis Ferreira C, Cruz MAE, de Oliveira FA, Ramos AP, Millán JL, Bottini M, Ciancaglini P. (2022). Ultrasensitive Diamond Microelectrode Application in the Detection of Ca²⁺ Transport by AnnexinA5-Containing Nanostructured Liposomes, *Biosensors.*; 12(7):525. doi.org/10.3390/bios12070525
- [8] Cabral, G., Reis, P., Titus, E., Madaleno, J. C., Davim, J. P., Gracio, J., Ahmed, W., Jackson, M. J. (2008). Impact of surface roughness of diamond coatings on the cutting performance when dry machining of graphite. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 15(2), 121. [doi:10.1504/ijmtm.2008.019655](https://doi.org/10.1504/ijmtm.2008.019655)
- [9] Hayward, I. P., Singer, I. L., Seitzman, L. E. (1992). Effect of roughness on the friction of diamond on cvd diamond coatings. *Wear*, 157(2), 215–227. [doi:10.1016/0043-1648\(92\)90063-e](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90063-e)
- [10] Neto, V. F., Shokuhfar, T., Oliveira, M. S. A., Gracio, J., & Ali, N. (2008). *Polycrystalline diamond coatings on steel substrates*. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2(1/2), 99. [doi:10.1504/ijnm.2008.017842](https://doi.org/10.1504/ijnm.2008.017842)
- [11] Buijnsters, J. G., Shankar, P., Ter Meulen, J. J. (2007). Direct deposition of polycrystalline diamond onto steel substrates, *Surface and Coatings Technology*, 201(22-23), 8955–8960. [doi:10.1016/j.surfcoat.2007.04.012](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.04.012)
- [12] Fu, Y., Yan, B., Loh, N. L., Sun, C. Q., & Hing, P. (2000). Characterization and tribological evaluation of MW-PACVD diamond coatings deposited on pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 282(1-2), 38–48. [doi:10.1016/s0921-5093\(99\)00782-0](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00782-0)
- [13] Li, G., Yi, S., Wen, C., Ding, S. (2018). Wear mechanism and tribological behaviour of polycrystalline diamond tools in sticking-transition-sliding zones in machining titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. [doi:10.1115/1.4041327](https://doi.org/10.1115/1.4041327)
- [14] Qin, W., Liu, Y., Yue, W., Wang, C., Ma, G., & Wang, H. (2019). Influence of Frictional Interface State on Tribological Performance of Sintered Polycrystalline Diamond Sliding Against Different Mating Materials. *Tribology Letters*, 67(3). [doi:10.1007/s11249-019-1196-1](https://doi.org/10.1007/s11249-019-1196-1)
- [15] Yue, T., Yue, W., Qin, W., Liu, P., & Wang, C. (2019). Effects of environmental atmospheres on tribological behaviors of sintered polycrystalline diamond sliding against silicon nitride. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 81, 85–93. [doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.02.023](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.02.023)
- [16] Ajikumar, P. K., Ganesan, K., Kumar, N., Ravindran, T. R., Kalavathi, S., & Kamruddin, M. (2019). Role of microstructure and structural disorder on tribological properties of polycrystalline diamond films. *Applied Surface Science*, 469, 10–17. [doi:10.1016/j.apsusc.2018.10.265](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.265)
- [17] Bögli, U., Blatter, A., Pimenov, S. M., Obraztsova, E. D., Smolin, A. A., Maillat, M., Loubnin, E. N. (1995). Tribological properties of smooth polycrystalline diamond films. *Diamond and Related Materials*, 4(7), 1009–1019. [doi:10.1016/0925-9635\(95\)00272-3](https://doi.org/10.1016/0925-9635(95)00272-3)
- [18] Gardos, M. N. (1999). Tribological fundamentals of polycrystalline diamond films. *Surface and Coatings Technology*, 113(3), 183–200. [doi:10.1016/s0257-8972\(98\)00842-1](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(98)00842-1)
- [19] Lu, P., Xiao, X., Lukitsch, M., Sachdev, A., Chou, Y. K. (2011). Interface characterizations of diamond-coated tools by scratch testing and simulations. *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 1860–1866. [doi:10.1016/j.surfcoat.2011.08.022](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.022)

- [20] Zhang, Z. M., Shen, H. S., Sun, F. H., He, X. C., Wan, Y. Z. (2001). Fabrication and application of chemical vapor deposition diamond-coated drawing dies. *Diamond and Related Materials*, 10(1), 33–38. doi:10.1016/s0925-9635(00)00424-6
- [21] Lu, P., Xiaom X, Lukitsch, M. (2011). Micro-Scratch Testing and Simulations for Adhesion Characterizations of Diamond-coated Tools. *Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of Society of Manufacturing Engineers (NAMRI/SME)*, Vol. 39, 1-11.
- [22] <https://www.sintertechnik.com/project/ceramic-bearings/>
- [23] B. Maros, M., Németh, A. K. (2017). Wear maps of HIP sintered Si₃N₄/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(14), 4357–4369. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.005
- [24] Maros B., M., Németh, A. K., Károly, Z., Bódis, E., Maros, Z., Tapasztó, O., Balázs, K. (2016). Tribological characterisation of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology. *Tribology International*, 93, 269–281. doi:10.1016/j.triboint.2015.08.041

HIPOEUTEKTIKUS ALUMÍNIUM FORGATTYÚSHÁZ ATMOSZFÉRIKUS PLAZMASZÓRÁSSAL KÉSZÜLT ACÉL BEVONATAINAK VIZSGÁLATA

Kókai Ákos Levente

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, kokai.akos.levente@student.uni-miskolc.hu

Nagy Nóra

Egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, nora.nagy@uni-miskolc.hu

Marosné Berkes Mária

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, maria.maros@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A gépelemek súrlódásnak, kopásnak, vagy korrózióknak kitett érintkező felületein gyakran alkalmazunk különféle bevonatokat a terhelhetőség, az élettartam növelés céljából. Járműipari alkatrészekenél igen elterjedt az atmoszférikus plazmaszórással (APS) készülő bevonatok használata. A technológia során nagy energiasűrűségű hőforrást alkalmaznak a bevonat alapanyagául szolgáló por vagy huzal megolvasztására, majd felhordására. Mivel a bevonatolást atmoszférikus körülmények között végzik, az olvadt állapotú fém oxidációja elkerülhetetlen, ami jelentős hatással van a létrejövő bevonatok szövetszerkezetére, tulajdonságaira, a képződő oxid-zárványok mennyiségére, típusára, eloszlására, ezen keresztül a megmunkálhatóságra és a gyártás gazdaságosságára. A cikk egy gépkocsi alumínium öntvényből készült motorhengerének APS acélbevonata kapcsán szerzett tapasztalatainkat ismerteti a bevonatok szövetszerkezeti és keménységi vizsgálataival nyerhető információk bemutatásával.

Kulcsszavak: APS bevonat, oxidációs mechanizmus, mikroszerkezet, keménység, megmunkálhatóság

Abstract

Protective coatings are often applied to the contact surfaces of machine components exposed to friction, wear, or corrosion to increase load-bearing capacity and service life. The use of coatings produced by atmospheric plasma spraying (APS) is widespread in the automotive industry. During the technology, a high energy-density heat source is used to melt and deposit the powder or wire used as the coating's raw material. Since the process is carried out under atmospheric conditions, the oxidation of the molten metal is inevitable, which significantly impacts the microstructure and properties of the resulting coatings, the amount, type, and distribution of the oxide inclusions, and, thus, the machinability and the production economy. The article describes our experience with the APS steel coating of an engine cylinder bore made of aluminium casting by presenting the information obtained from the microstructural and hardness testing of the coatings.

Keywords: APS coating, oxidation mechanism, microstructure, hardness, machinability

1. Bevezetés

Mai, gyorsan változó világunkban a környezetvédelem egyre meghatározóbb szerepet játszik a különféle iparágak technológiai folyamatainak tervezési, megvalósítási folyamatában. Ez magába foglalja törekvéseinket az egyes gépelemek anyagfelhasználásának vagy a gyártás technológiai idősükségletének kényszerű csökkentésére, amely számos esetben az anyagszerkezet megváltozását vonja maga után. A járműipari gépelemek súrlódásának csökkentésére elterjedten használják az atmoszférikus plazmaszórás technológiáját. A gépjárműipar mellett széles körben alkalmazzák a repülőgépiparban [1, 2, 3] a papír-, valamint a gépgyártás különböző ágazataiban, az energetikai szektorban, vagy orvosi implantátumok, gyógyászati eszközök készítéséhez is [4].

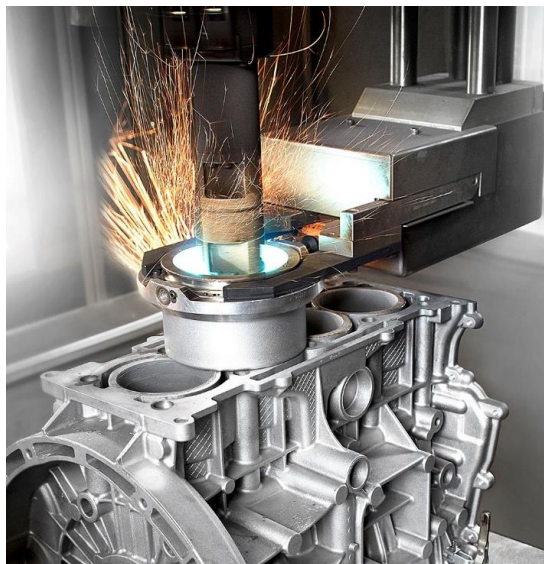
Járműipari alkalmazáskor, például forgattyúházak hengerfuratainak bevonatolása esetén, az így készült bevonat jelentősen képes csökkenteni a dugattyúgyűrű és a hengerfal között fellépő súrlódást, amelynek számos előnye van. Kiválthatóak például a korábban alkalmazott öntöttvas hengerperselyek, ami lehetőséget ad a motor össztömegének csökkentésére. Az APS bevonatokkal csökkenthető a dugattyú és hengerfal közötti súrlódás, javul a motor termodinamikai hatásfoka, csökken az üzemanyag fogyasztás, valamint a kenőanyag felhasználás, ezáltal csökken a károsanyag kibocsátás.

Ez utóbbi az elmúlt évtized és egyben a soron következő évtizedek egyik legnagyobb kihívása a CO₂ semlegesség megvalósítása érdekében [5, 6, 7]. Meghatározó jelentőségű, hogy az ilyen bevonatokkal nagymértékben növelhető a kopásállóság [8, 9].

A felsorolt előnyök ellenére a technológiának is vannak hátrányai. A legnagyobb nehézséget a bevonatolási folyamat komplexitása jelenti, amelynek során a bevonat felhordását egy többlépcsős megmunkálási folyamat követi [7, 10, 11].

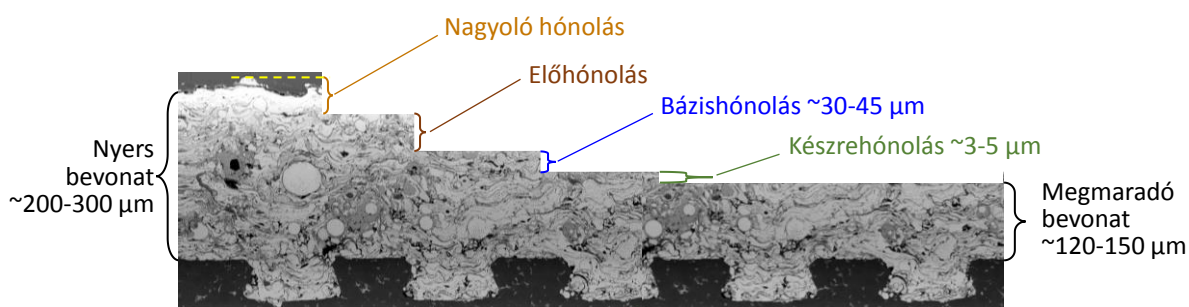
2. Hengerfurat APS bevonatának készítése

Az előállított nyers forgattyúházak hengerfuratait első lépésben felfúrják, majd egy gondosan kiválasztott technológiai eljárással érdesítik. Ezt követi a nyers APS bevonatok felhordása (1. ábra).



1. ábra. Forgattyúház motorhengerének bevonatolása APS technológiával [12].

Az így létrehozott nyers felületek azonban nem rendelkeznek megfelelő tribológiai tulajdonságokkal, amit elsősorban az egymáson elmozduló súrlódó felületek kellően kis érdességével lehet biztosítani, ezért a bevonatok abrazív megmunkálása – köszörülése, hónolása – szükséges (2. ábra). Ennek során a szerszámok kopását, élettartamát döntően befolyásolja a létrejött bevonatok szerkezete, porozitása, a bennük található kemény fázisok, például salakzárványok koptató hatása. Mindezek közvetlen hatással vannak a gyártási költségekre, a ciklusidőkre, továbbá bizonyos esetekben a gyártás stabilitására is.



2. ábra. A hónolási folyamat lépései motorhenger furat termikus plazmaszórással készült bevonatának megmunkálásakor.

Összességében tehát a hengerfuratok APS bevonatainak létrehozása és készremunkálása egy rendkívül komplex technológia láncfolyamat, amelyet számtalan körülmény befolyásol [13, 14].

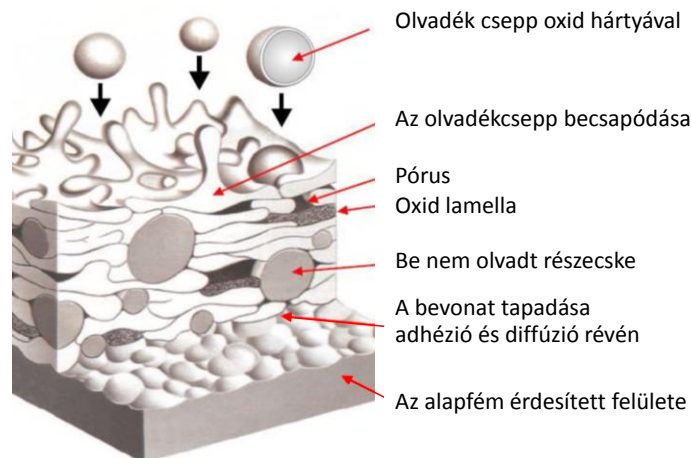
A bevonatkészítés metallurgiai értelemben egy sztochasztikus folyamat, amelynek során az olvadék állapotú fém az extrém magas hőmérsékletű térben, az atmoszférában található reaktív gázokkal különféle vegyületeket alkot. Ennek következtében rendkívül összetett szövetszerkezet jön létre, amelynek keménységbeli inhomogenitását a különféle oxid vegyületek döntően meghatározzák. Számos tanulmány foglalkozik az atmoszférikus plazmaszórás során végbemenő oxidációs folyamat sajátosságaival, amelyek leírják annak pontos mechanizmusát [15, 16, 17].

A rendkívül nagy sebességgel mozgó plazma a körülötte lévő atmoszférával érintkezve nyírást indukál a plazma és a gázfüggöny közötti határteregben, ami egy bizonyos távolságnál felszakad, emiatt a plazma áramlása turbulenssé változik és a környező atmoszféra gázai behatolnak az argon plazmába [18, 19]. A plazmasugarba adagolt fémpor ömledék állapotú cseppei mindezek révén érintkezésbe tudnak lépni a levegő oxigénjével, vagyis az atmoszférikus plazmaszórási technológiáknál az oxidáció a technológia velejáró sajátossága.

Az olvadt fémcseppek belsejében kialakuló konvekciós áramlás a létrejött oxid vegyületeket a folyadékcseppek elejére szállítja, ahol egy kagylóhéjhoz hasonló oxidhártyát alkotnak. A cseppek becsapódása után ezek az oxidhártyák kinyílnak és az azonnali kristályosodást követően a felülethez tapadnak [20, 21].

A keletkező oxidvegyületek miatt a kialakuló bevonatok rendkívül heterogének, amelyben váltakozva fordulnak elő a bevonat alapanyagául szolgáló fémes mátrix, valamint a bevonatolási folyamat során képződő különféle oxidok, továbbá meg nem olvadt részecskék (3. ábra).

A keletkező oxidok minőségét jelentősen befolyásolja az alkalmazott por alapanyag minősége és az APS technológia paraméterei, amelyek meghatározóak a bevonatok megmunkálhatósága vagy a megmunkálószerszámok élettartama szempontjából.



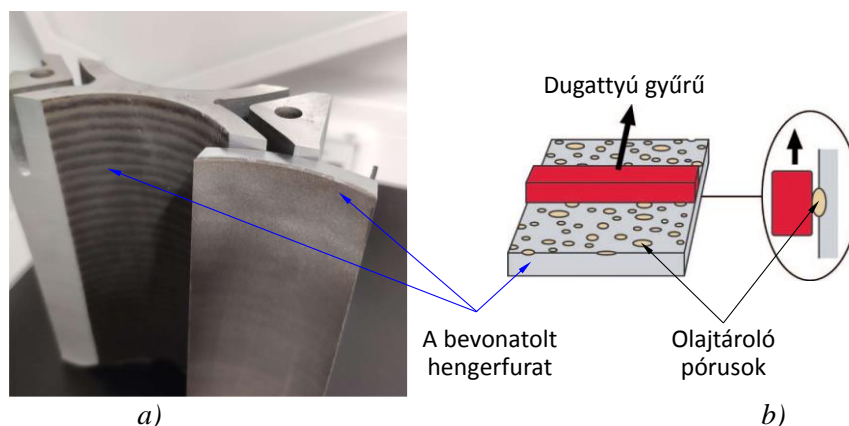
3. ábra. A termikus plazmaszórással készült bevonatok jellegzetes heterogén szerkezete [22].

Annak érdekében, hogy megértsük az oxidok keménységre és ezáltal a megmunkálhatóságra gyakorolt hatását, egy átfogó kutatási program keretében sokoldalú vizsgálatokat végeztünk alumínium ötvényből készült forgattyúház három különböző technológiai műhelyben előállított APS acélbevonatán, amelyek megmunkálhatósága jelentősen eltérő volt.

Az összetett vizsgálatsorozat kiterjedt a bevonatok kémiai összetételének, felülettopográfiájának, pórus szerkezetének mikroszerkezetének, ezen belül fázisösszetételének, valamint keménységének vizsgálatára [23]. A cikk keretében, röviden ismertetve a problémát és az egyéb vizsgálatokból nyert információkat, a mikroszerkezet optikai mikroszkópos vizsgálatai és a keménységmérés során kapott tapasztalatok kerülnek bemutatásra.

3. A vizsgált minták, az alkalmazott vizsgálati módszerek

A vizsgálati minták gépkocsi hipereutektikus Al ötvözet ötvényből készült forgattyúház motorhengereinek APS technológiával készült bevonatai voltak. A bevonatot tartalmazó, a hengerekből axiális irányban kimetszett darabokat, valamint a dugattyúgyűrű és a pórusos bevonat kapcsolatának vázlatos rajzát a 4. ábra mutatja.



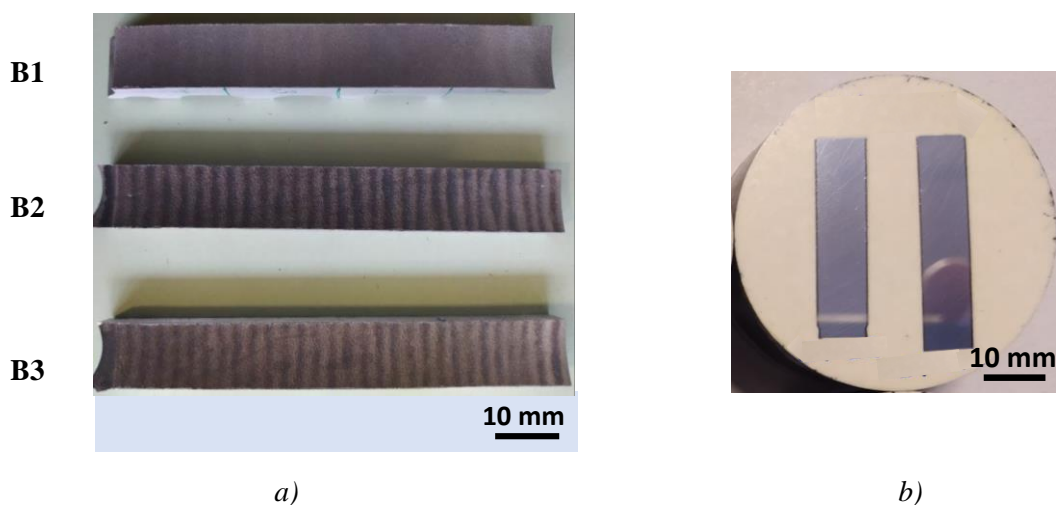
4. ábra. A bevonatot tartalmazó vizsgálati darabok (a) és a bevonaton elmozduló dugattyúgyűrű (b).

Összesen háromféle bevonatot vizsgáltunk, amelyeket az alappor minősége (gyártója), a bevonatkészítést végző ipari technológiai műhely helye, valamint a megmunkálhatóság szerint különböztettük meg. A bevonatok jellemzőit az 1. táblázat tünteti fel.

1. táblázat. A vizsgált bevonat minták jelölése, és gyártási jellemzői.

A minta jele	A bevonathoz használt alappor jellemzői			A bevonatkészítés helye	Relatív szerszám-kopás
	jelölés	gyártó	szemcseméret, μm		
B1	WHT009737A	WOMET	27,3	Németország	1
B2	Oerlikon XPT 512	OERLIKON	29,8	Magyarország, 1-es műhely	1,8
B3	WHT009737A	WOMET	27,3	Magyarország, 2-es műhely	2,3

A bevonatok vizuális vizsgálatához a motorhengerből kifűrésztelt $10 \times 4 \times 135$ mm-es hosszirányú hengervelemeket használtuk (5/a ábra), míg a mikroszkópos és a keménységvizsgálatokhoz a vizsgálati minták célszerűen úgy lettek kimunkálva a motorblokkból, hogy az ugyancsak hosszirányban kivágott darabok két szemközti oldalán a két szomszédos henger bevonatolt palástját megőriztük. Ily módon 8 mm széles, 32–35 mm hosszú, szemközti lapjukon görbült felszínű, téglatest jellegű minták készültek, amelyeket a keménységméréshez műgyantában rögzítettük (5/b ábra), majd az érdes, vágott felületeket csiszoltuk és políroztuk, hogy alkalmassá tegyük a kis terheléssel végzendő mikro-Vickers keménységi vizsgálatra.



5. ábra. Vizsgálati minták (a) a hengerből kivágva, (b) a keménységméréshez előkészítve [23].

A bevonatok szövetszerkezetének optikai mikroszkópos vizsgálatát Zeiss, AXIO Observer D1m inverz optikai mikroszkóppal végeztük. A vizsgálatok célja a heterogén szerkezet feltárása, és a vékony, porózus, heterogén bevonatban a keménységmérés célszerű helyének kijelölése volt. A keménységméréshez microVickers eljárást választottunk. Az APS bevonatok vizsgálatára a makrokeménységmérési eljárások nem alkalmasak [24], mivel egyrészt a nagy terheléssel létrehozott lenyomat mélysége meghaladná a bevonat vastagságát, így a kapott mérőszám nem lenne mentes a szubsztrát-hatástól, másrészt a rideg bevonat könnyen megrepedne, ami ugyancsak torzítaná a mért

keménység értékét a valóságoshoz képest. Ugyancsak a kis terhelésű mikro-keménységmérési eljárás alkalmazását indokolja, hogy az ennek során kapott jóval kisebb méretű lenyomatok lehetőséget nyújtanak a különböző keménységű szövetelemek, vagy fázisok értékelésére.

A keménységmérést egy MITUTOYO HVK-M1 típusú berendezésen, $F = 0,5, 3, 5$ és 10 N terheléssel végeztük. A terhelés hatóideje $t = 10\text{ s}$, a beállított alsó és felső méréshatár 100 és 550 HV volt. Az elvégzett érvényes mérések száma $F = 3, 5$ és 10 N terhelés esetén öt, $F = 0,5\text{ N}$ terhelés esetén tizenöt volt. A lenyomatokat a bevonatok keresztmetszeti oldalán készítettük el, azaz a plazmaszórás irányával párhuzamos keménységi lenyomatokat hoztunk létre.

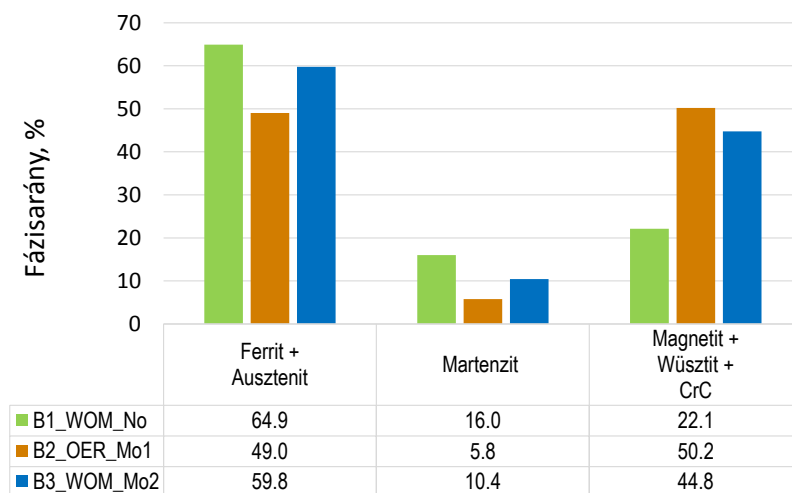
4. Vizsgálati eredmények

A vizsgálatok eredményeinek ismertetésekor a cikkben célszerűen bemutatjuk a korábban említett szélesebb körű vizsgálatsorozatot, külső partnerek által rendelkezésre bocsátott azon eredményeit is, amelyek részletes ismertetése itt nem célunk, ugyanakkor nagyban segíthetik a mikroszkópos és keménységvizsgálati elemzések megértését.

4.1. A kémiai és fázisösszetéti vizsgálatok tapasztalatai

A bevonatok nedves analitikai módszerrel meghatározott kémiai összetétele jelentős különbséget mutatott az oxigén és nitrogéntartalom tekintetében. A B2 és B3 jelű bevonatok össz-oxigén- és nitrogén tartalma tízszerese volt a B1 mintáénak, azaz 11807 és 13443 ppm oxigént, illetve 394 és 516 ppm nitrogént mértünk rendre a B2 és B3 minták tekintetében, míg mindösszesen 1993 ppm oxigént és 59 ppm nitrogént a B1 mintában [23]. Ez alapján valószínűsíthető, hogy az ötvözők nem a fémes mátrix szilárd oldatos ötvözőiként, hanem nagy mennyiségű rideg salakzárvány formájában vannak jelen az utóbbi két bevonatban, amelyek a megmunkálhatóságot jelentősen ronthatják.

A kémiai összetétel alapján feltételezett zárványosság vizsgálatára röntgendiffrakciós fázisösszetétel vizsgálatok (XRD) történtek (6. ábra), amelyek a bevonatban ferrit, ausztenit, martenzit, valamint különféle oxid típusú (wüsztit, magnetit) vegyületek és CrC jelenlétét igazolták [23]. Az első két szövetelem lágy, a másik három típus jelentősen keményebb.



6. ábra. A bevonatok röntgendiffrakciós fázisösszetétel vizsgálatának eredményei [23].

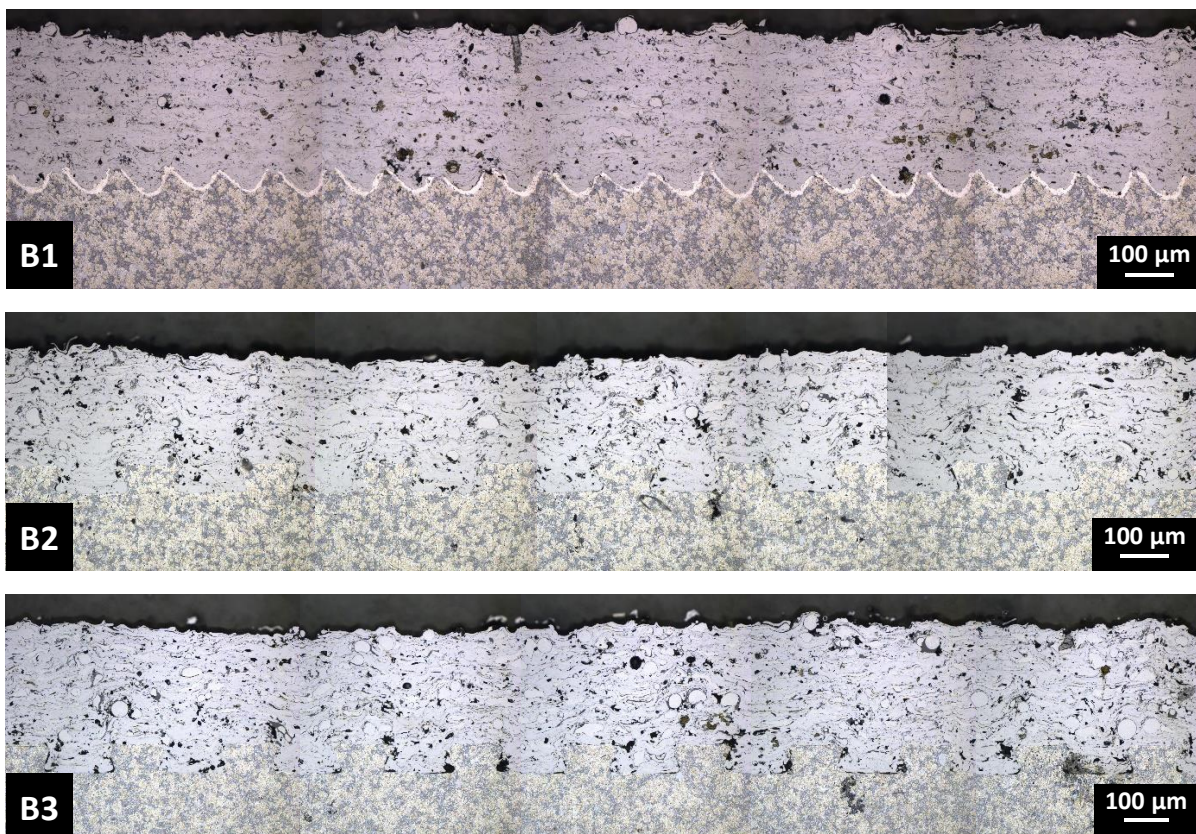
A minták jellemzően a jelenlévő oxidok mennyiségében tértek el. A B2 és B3 minták oxidzárványainak mennyisége több mint kétszerese volt a B1 mintáénak, és legnagyobb mennyiségben a B2 mintában fordult elő (a kimutatott CrC elhanyagolhatóan kicsiny, < 1% volt a wüstit és magnetit mennyiségéhez képest). A lágy szövetelemekből (ferrit, ausztenit) a B1 mintában volt a legtöbb, de a martenzit mennyisége is ebben a mintában volt a legnagyobb.

Az alapszövet keménységét, amely a szerszámkopást döntően befolyásolja, nemcsak a jelenlévő fázisok mennyisége, aránya, hanem azok morfológiája, eloszlása is döntően befolyásolja. Emellett a bevonaton mért keménységre érdemi hatása lehet a porozitásnak is. Mindezeket a keménységi adatok kiértékelésekor célszerű figyelembe venni. Ennek érdekében a keménységmérést megelőzően optikai mikroszkópos vizsgálatokat végeztünk.

4.2. A bevonatok mikroszerkezetének optikai mikroszkópos vizsgálata

Az APS bevonatok szerkezetét átfogóan tanulmányozhatjuk a nagyobb kiterjedésű területeket ábrázoló, úgynevezett panoráma – több mikroszkópi látómezőt átfogó – optikai mikroszkópos (OM) felvételek segítségével.

A motorblokk hengerek hossz tengelyével párhuzamos irányban kb. 2,5 mm hosszú kiterjedésű tartományokat ábrázolnak 7. ábra a)–c) részletein látható képek.



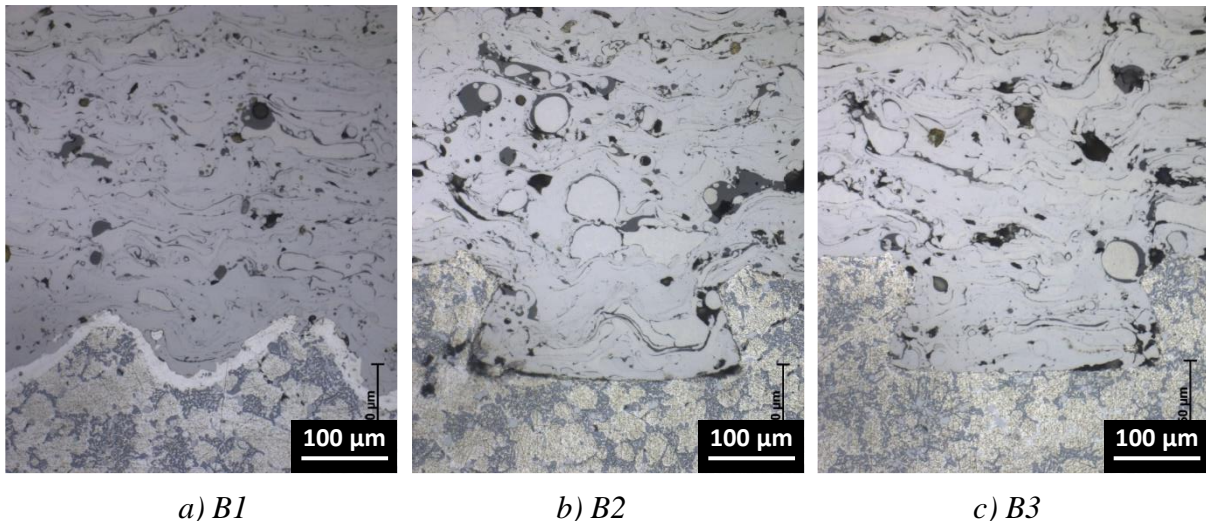
7. ábra. A bevonatok optikai mikroszkópos panoráma felvétele (polírozott, maratlan felület) [23].

A panoráma felvételek alapján tett megfigyeléseink a következők.

- A B1 bevonat szerkezete jóval homogénebb, mint a B2, illetve a B3 bevonatoké. Mindhárom bevonat szerkezetében megfigyelhetők gömb alakú szemcsék, amelyek jellemzően szürke színű apró salakszemcsékkel körülvéve, vagy abba beágyazódva találhatók. A gömb alakú szemcsék a B1, B2, B3 mintákban rendre növekvő számban jelennek meg, és a B3 jelű mintában jellemzően jóval nagyobb méretűek.
- A pórusok elhelyezkedésében is felfedezhetők különbségek. A B1 típusú minta lézerrel érdesített öntvénye esetén a félkör metszetű vajatokba illeszkedő bevonat lábázatának szerkezete jóval homogénebb, mint a B2 és a B3 minták esetén, ahol az öntvénybe munkált trapéz alakú hornyokban kapaszkodik meg a bevonat. A B1 minta bevonatának lábázatára sokkal inkább jellemző a fémes határfelületi kapcsolat, míg az utóbbi két esetben a bevonat és az öntvény határfelületét jellemzően pórusok szakítják meg, amelyek a B3 minta esetén jóval nagyobb mennyiségben vannak jelen és jelentősen nagyobb térfogatúak is. Ezek pontosabb értékelése kvantitatív metallográfiai vizsgálatokkal lehetséges.
- A szemcsék minősége az OM felvételek alapján nem határozható meg, de figyelemre méltó, hogy jellemzően egy szürke színű fázisba beágyazva jelennek meg, amely feltehetően kisebb olvadáspontú salak, amelyek fő alkotó fázisai a röntgendiffrakciós vizsgálatokkal azonosított oxidok.

A bevonatok nagyobb nagyítású felvételei (8. ábra) lehetőséget adnak a pórusszerkezet és a be nem olvadt szemcsék alaposabb megfigyelésére, valamint a zárványok morfológiai vizsgálatára.

- A pórusok, salakzárványok és gömb alakú szemcsék jellemző mérete a B1 minta esetében az 1-20 μm , míg a B2 és a B3 minta esetében inkább az 5–50 μm tartományba esik.
- A hártyszerű, valamint tömlő alakú zárványok, amelyek az egyes fémrétegek között láthatók a B2 és a B3 bevonatokban durvábbak, vastagabbak voltak.



8. ábra. A B1, B2 és B3 jelű APS bevonatok összehasonlítása nagyobb nagyítású ($N=500\times$) OM felvételeken [23].

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok során meghatároztuk a bevonatok vastagságát is, amelyek átlagos értéke a hornyolásmentes zónákban a B1, B2 és B3 bevonatokon rendre 285, 225 és 248 μm , míg a hornyoknál mérve 326, 282 és 302 μm volt. Ezzel a bevonatok átlagos vastagsága a három minta esetén rendre 305, 253 és 275 μm adódott. A keménységmérés elvégzésére rendelkezésre álló zóna szélessége tehát igen korlátozott volt.

4.3. Keménységi vizsgálatok

HV0,5 és HVI keménységi mérőszámok

A szisztematikus keménységmérés megkezdése előtt előkísérleteket végeztünk különböző terhelőerőkkel. Ezek alapján megállapítottuk, hogy az $F = 5 \text{ N}$ és az $F = 10 \text{ N}$ terhelőerővel végzett vizsgálatok viszonylag nagyméretű lenyomatokat eredményeznek, azaz 5 N terhelésnél $\sim 50\text{--}55 \mu\text{m}$, míg 10 N terhelés esetén $\sim 70\text{--}80 \mu\text{m}$ átlóméretet adódnak, ezért a lenyomatokat célszerűen a bevonatok metszetének középvonalában helyeztük el.

Ezekkel a terhelésekkel mintánként öt lenyomatot készítettünk. A vizsgálatok elsődleges célja az APS bevonatra jellemző – porozitást és egyéb fázisokat tartalmazó – kompozit anyagszerkezet átlagos keménységének meghatározása volt és ennek alapján a háromféle bevonat összehasonlítása.

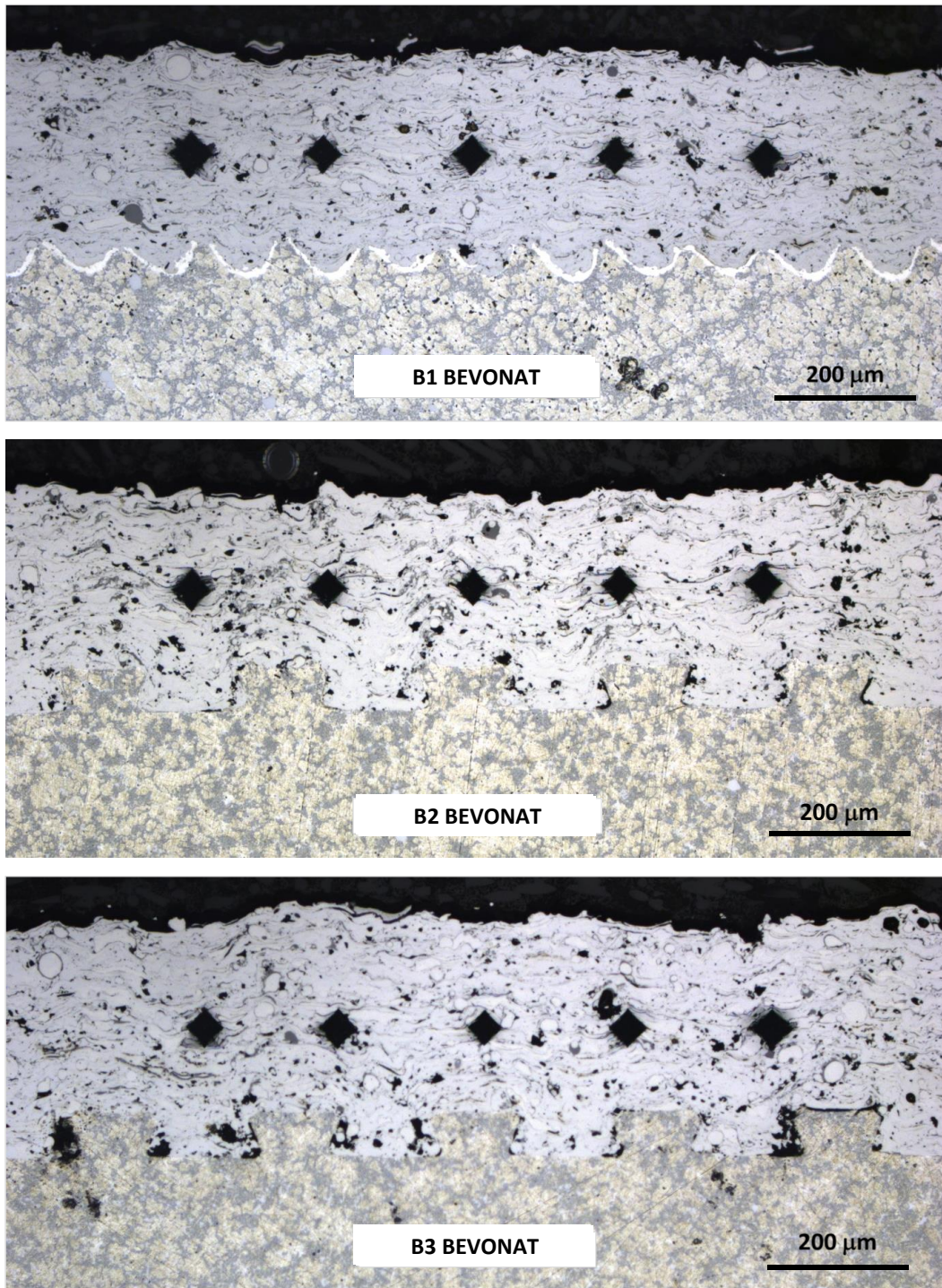
A lenyomatokról készült OM felvételek a 9. és a 10. ábrákon láthatók. Az ábrák alatt feltüntettük az egyes mintákra jellemző átlagos keménységértékeket, amelyek bár kismértékben, 4–10%-kal, a B2 és a B3 mintákon egyértelműen nagyobbak voltak, mint a B1 mintán.

HV0,05 és HV0,3 keménységi mérőszámok

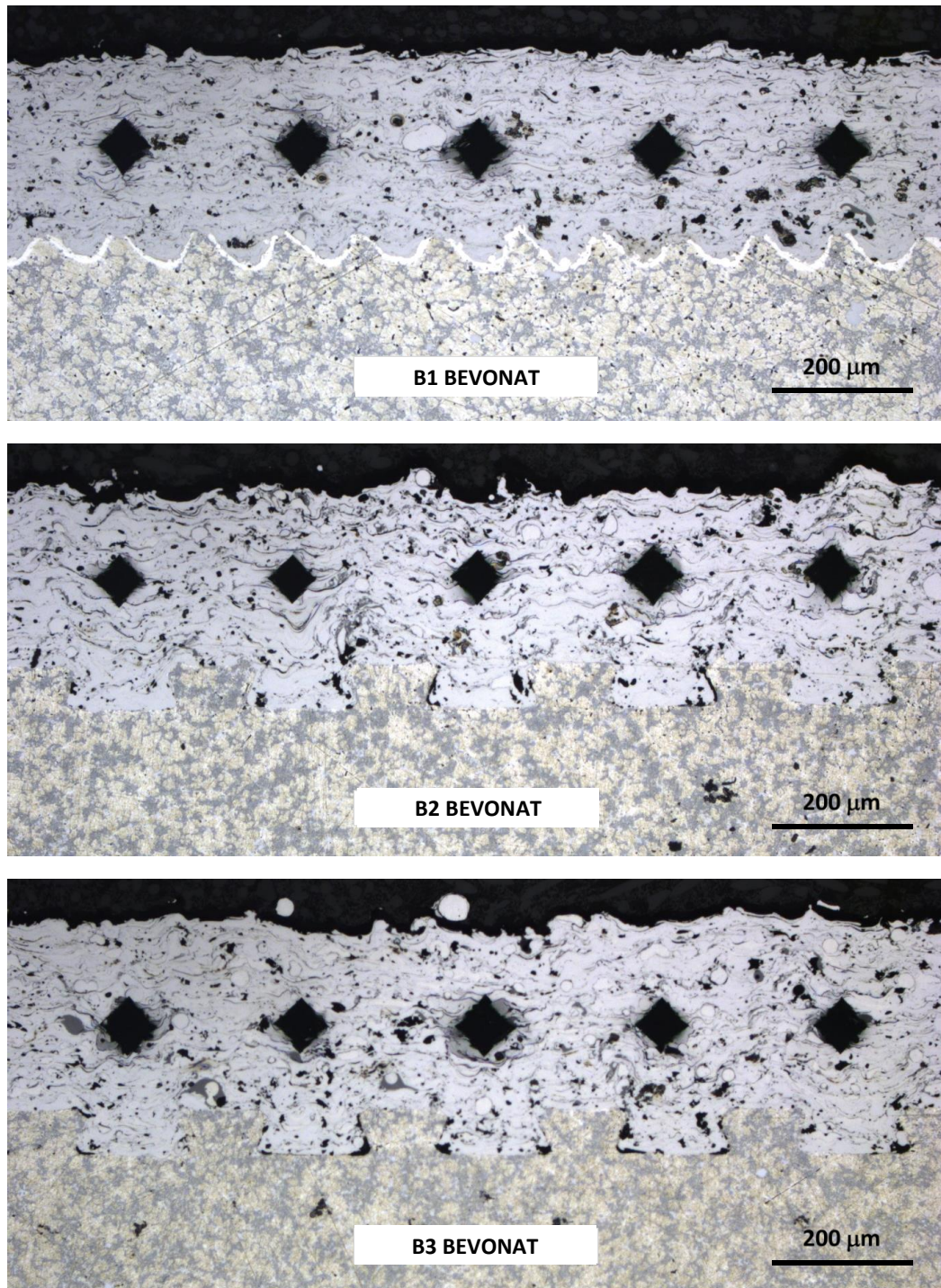
A kis terheléssel végzett keménységmérések során – a heterogén szerkezet rendkívül eltérő keménységű fázisai és jelentős porozitása miatt – az eredmények számottevő szórása várható. A megbízhatóság növelése érdekében az $F = 0,5 \text{ N}$ vizsgálatoknál megháromszoroztuk a mérések számát, így mintánként tizenöt lenyomatot készítettünk, $F = 3 \text{ N}$ esetén pedig az előzőekhez hasonlóan öt lenyomat készült. A lenyomatokat a bevonatok keresztmetszete mentén a bevonat szabad felszínétől indulva az alapanyag irányában haladva helyeztük el (11. ábra).

Az eredmények alapján a következő megfigyeléseket tettük.

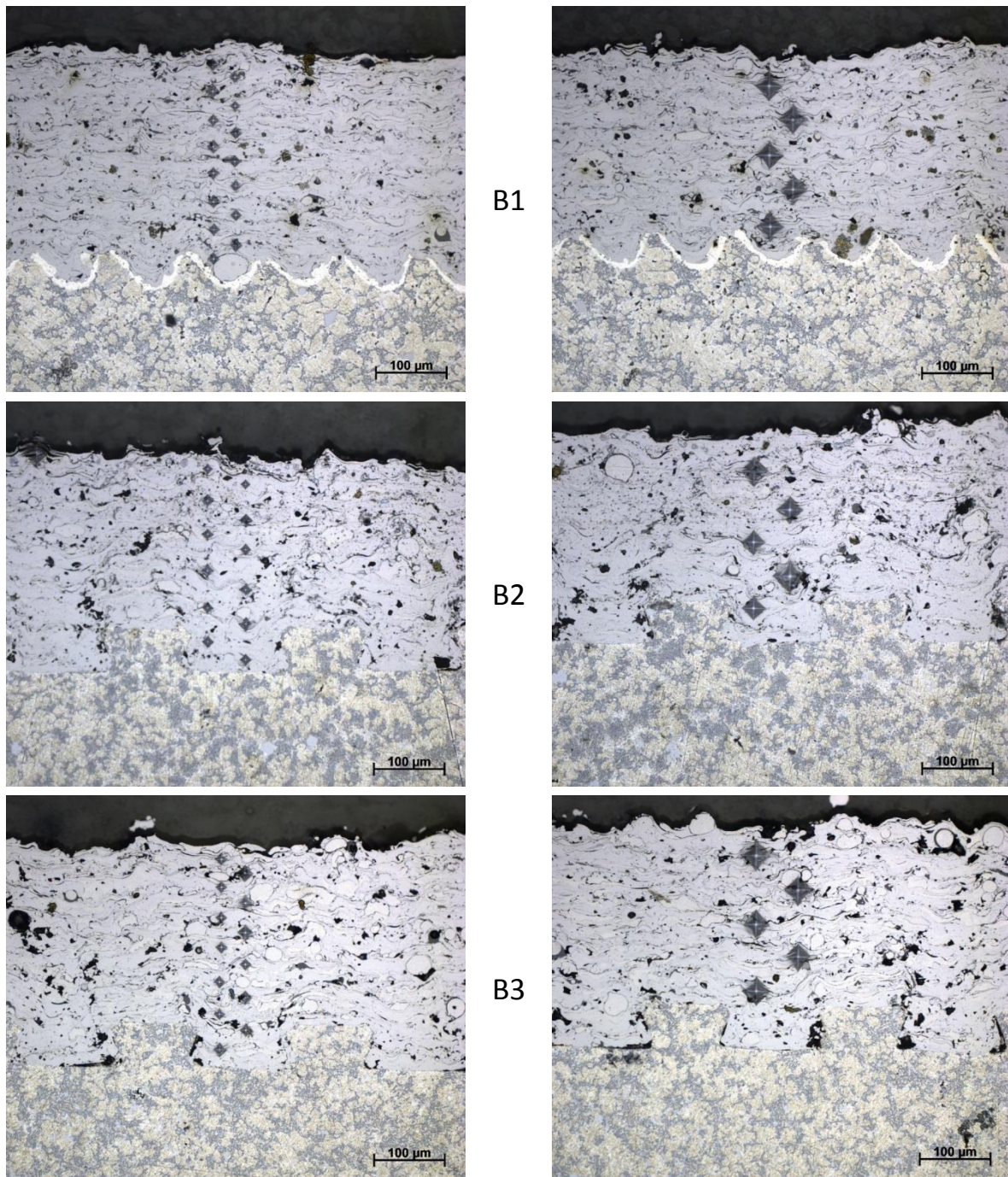
- Az $F = 0,3 \text{ N}$ terhelőerővel végzett vizsgálatok során, az azonos mintán mért keménységértékek szisztematikusán – 14–42%-kal – nagyobbra adódtak, mint az $F = 0,05 \text{ N}$ terheléssel meghatározott értékek.
- A pórusos anyagszerkezeten igyekeztünk látszólag ép, pórusmentes tartományban elhelyezni a lenyomatokat. Ennek ellenére számos esetben a felülettől mélyebben fekvő, nem látható porozitás miatt, ún. részlegesen, vagy teljes mértékben áttört lenyomatokat kaptunk. Ezek elhanyagolásával minden esetben képeztünk egy szűrt mérési sorozatot is, amelyek átlagai, ahogyan az várható, szisztematikusán magasabbak voltak, mint az összes lenyomat alapján képzett mérési átlagok. Ez a halmaz az összefüggő fémes mátrix keménységére vonatkozóan nyújt realisabb képet. Az eltérés átlagos mértéke a HV0,05 értékek esetén 12% volt, míg a HV0,3 méréseknél 9%.
- Ugyancsak megállapítható, hogy a vizsgált B1, B2 és B3 bevonat esetén a HV0,05 és HV0,3 keménységértékek tekintetében nem volt kimutatható, szisztematikus eltérés, a minták átlagkeménységének eltérése kisebb volt, mint az eredmények szórása.



9. ábra. A B1, a B2 és a B3 bevonatok HV0,5 keménységi lenyomatai. Az átlagkeménység rendre: (319, 350 és 345)HV0,5 [23].



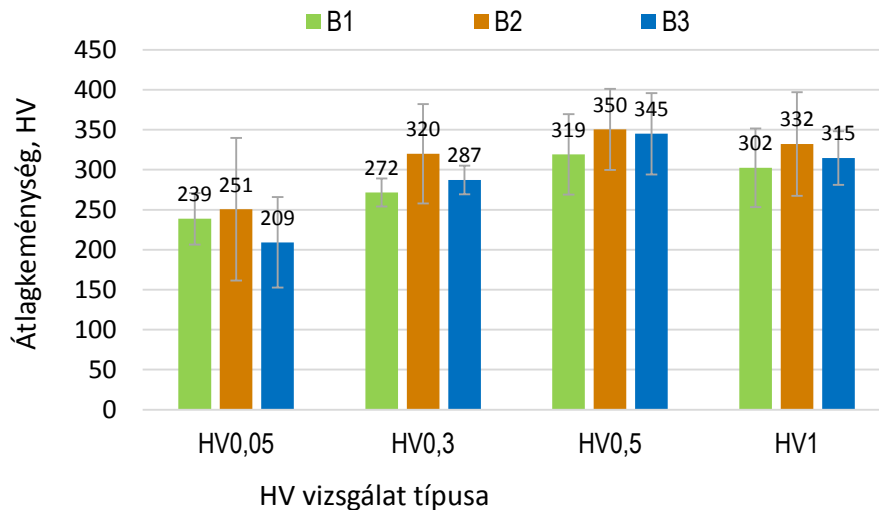
10. ábra. A B1, a B2 és a B3 bevonatok HV1 keménységi lenyomatai. Az átlagkeménységek rendre: (302, 332 és 315)HV_{0,1} [23].



a) HV0,05 lenyomatok, ($F = 0,5\text{ N}$) b) HV0,3 lenyomatok, ($F = 3\text{ N}$)

11. ábra. A B1, a B2 és a B3 bevonatok HV0,05 és HV0,3 keménységi lenyomatai. Az átlagkeménységek rendre: (239, 251 és 209)HV0,05, illetve (272, 320, 287)HV0,3 [23].

A különféle terhelőerőkkel kapott keménységértékeket a 12. ábra hasonlítja össze, amely alapján a következő tendenciákat figyelhetjük meg.



12. ábra. A vizsgált B1, B2 és B3 típusú minták átlagos keménységének összehasonlítása egy-egy adott terhelőerővel végzett vizsgálat során [23].

- A mért keménységértékek egyértelmű terhelőerő függést mutatnak, amelynek jellege a 12. ábra alapján mindhárom minta esetén azonos, azaz a terhelőerő 0,5 és 5 N közötti növelésekor monoton nő, illetve a terhelőerő további ($F = 10$ N-ra) növelésekor minden esetben csökken.
- Adott terhelőerő esetén a B1 jelű bevonat keménysége (egy kivételtől eltekintve) jellemzően kisebb, mint a B2 és a B3 bevonatoké.
- A 12. ábrán bemutatott eredmények a HV0,05 mérőszámok esetén az összes mért értékre, tehát a szűretlen mérési halmazra vonatkoznak. A szűrt értékkel képezett hasonló diagramokon a leírtakkal azonos tendenciák figyelhetők meg, ezért ezek közlésétől eltekintünk.

Ezek után felvetődik a kérdés, hogy lehet-e összefüggést találni a 12. ábrán bemutatott keménységi adatok és az XRD fázisösszetétel vizsgálatok eredményei (6. ábra) között? A három mintatípus közötti keménységbeli eltérések mely szerkezeti sajátosságokkal, fázisokkal állnak kapcsolatban?

Az XRD vizsgálatok eredményeit a 6. ábra célszerűen úgy mutatja be, hogy a mechanikai tulajdonság – szilárdság, keménység, alakváltozó képesség – tekintetében hasonló fázisok mennyiségét összevontan ábrázolja.

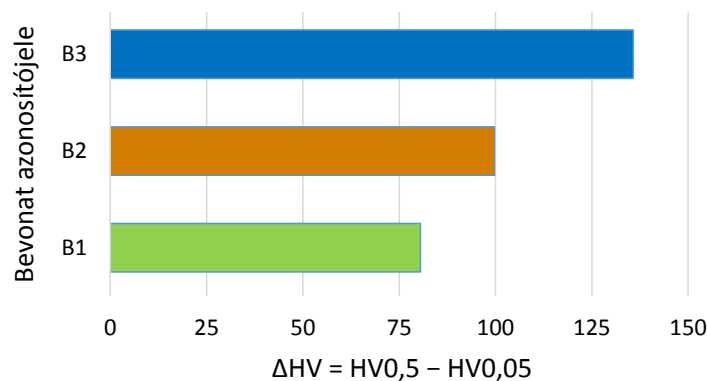
Ha összehasonlítjuk a 12. ábra bármely oszlopsorát a 6. ábra jobb szélső oszlopsorával, amely az összes kemény fázis tekintetében hasonlítja össze az egyes mintatípusokat, akkor egyértelműen kijelenthető, hogy a keménységmérés eredményei összhangban vannak a fázisösszetétel vizsgálatok eredményeivel. A B2 mintán mért legnagyobb keménység oka egyrészt, az ebben a mintában kimutatott legnagyobb mennyiségű wüstit, másrészt, a króm-karbid, amit csak ebben a mintában találtunk. Mindezek alapján megállapítható, hogy a keménységmérés, amely egy egyszerűbb, gyorsabb és olcsóbb vizsgálati eljárás, mint a röntgendiffrakciós fázisanalízis, közvetett módon alkalmas a szerszámkopás szempontjából kritikus kemény fázisok kimutatására.

Bár a keménységmérési adatok és a fázisösszetétel közötti korrelációs kapcsolat egyértelmű, de a B1, a B2 és a B3 minták átlagkeménységében kimutatott, meglehetősen kismértékű eltérések miatt az ilyen típusú elemzés és következtetések levonása érdekében mindenképpen nagy (15–20) mintaelemszámú mérési sorozat javasolható, amelyet az egyes mintatípusokra vonatkozóan célszerű a gyártási folyamatban periodikusan megismételni és folyamatosan figyelemmel kísérni.

A keménységmérési eljárás ilyen jellegű szisztematikus elvégzése ugyancsak alkalmas lehet az APS bevonatolási eljárás optimalizálását célzó technológiai kísérletek esetén a technológiai paraméterek változásának és a szerszámkopást okozó kemény fázisok képződésének gyors ellenőrzésére, megítélésére. Hiszen a keménységnövekedést a túlzott mértékű oxidáció következtében megnövekedett mennyiségű salakzárványok (oxidok) okozzák, amit közvetlenül befolyásolnak az APS eljárás során alkalmazott technológiai paraméterek (oxigénáram, hidrogénáram stb.).

A keménységmérésből nyert információk további érdekes megfigyelésekre is lehetőséget adnak.

Ha megvizsgáljuk az egyes bevonatokon, különböző terhelőerők esetén kapott legnagyobb és legkisebb keménységek eltéréseit (13. ábra), akkor megállapíthatjuk, hogy a pórusos és rendkívül heterogén fázisösszetételű bevonat átlagos keménységét jellemző HV0,5 mérőszámok, illetve a lágyabb, fémes mátrix átlagos keménységét jobban figyelembe vevő HV0,05 értékek között a legkisebb ($\Delta HV = 81$) eltérést a B1 bevonat esetén tapasztaltuk. Az eltérés mértéke mintegy 24%-kal volt nagyobb a B2 bevonat esetén ($\Delta HV = 100$), míg a B3 bevonatra ez az érték már 69%-ra növekedett ($\Delta HV = 169$).

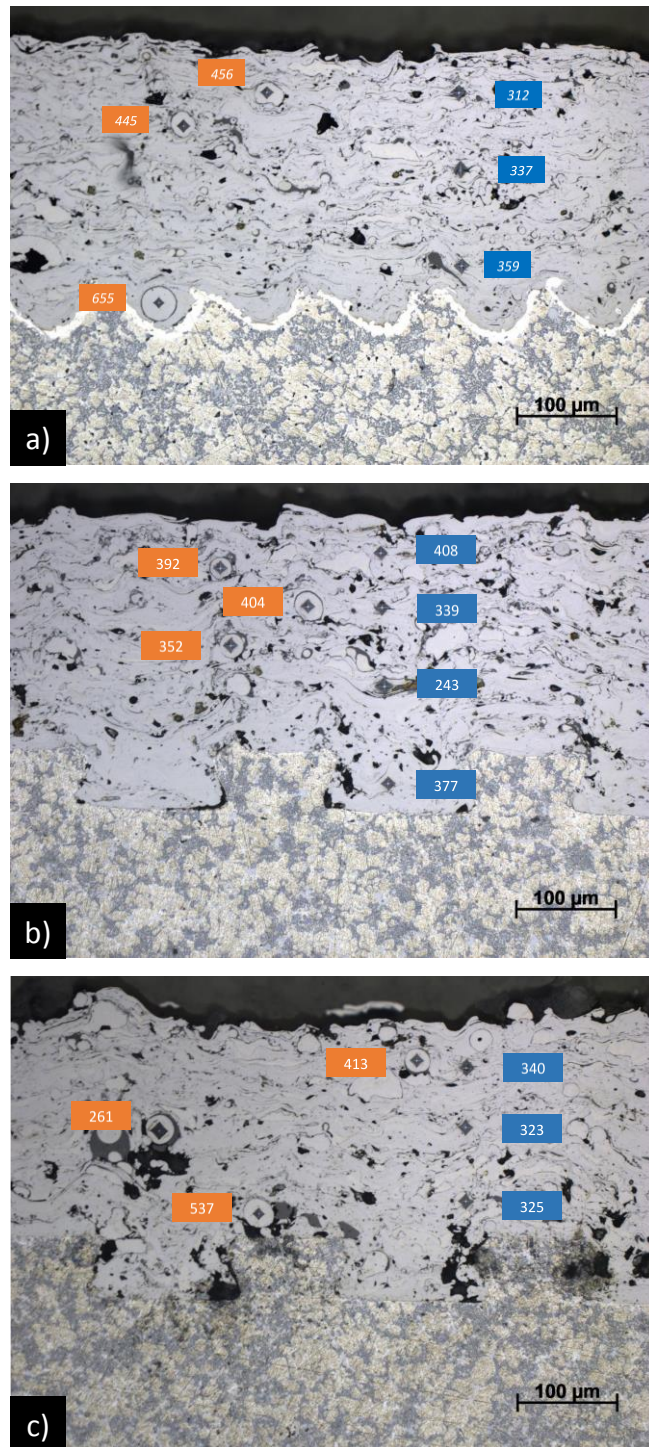


13. ábra. Az egyes bevonatokon különböző terhelőerővel mért keménységértékek terjedelme [23].

Ebből arra következtethetünk, hogy a B1 bevonat szerkezete jóval homogénebb, amely a megmunkálás (a fellépő forgácsolóerők) szempontjából előnyösebb.

Ezzel szemben a legnagyobb különbség a bevonat fémes mátrixa és kiválásokat is tartalmazó, nagyobb keménységű zónák között a B3 minta esetén mutatható ki. Ez a jelentős keménységbeli inhomogenitás az alkalmazott felületmegmunkálás – különösen a nagyobb fogásmélységgel végzett hónolási műveletek – szempontjából kimondottan előnytelen, elsősorban az ismétlődő, dinamikus erőhatások fellépése miatt.

A mikroszerkezeti és keménységi vizsgálatokból egyértelműen kiderül, az is, hogy a gömb alakú szemcsék, be nem olvadt, martenzites szövetszerkezetű, fémpor szemcsék, amelyek felületét egy vékony oxidhártya borítja (14. ábra). A fémpor szemcsék beolvadását ugyanis erőteljesen gátolja a felületükön kialakult oxidhártya. Erre, az elméleti ismereteink [15, 16] mellett, abból is következtethetünk, hogy a réteges szerkezetű bevonat egyes rétegei között mindig megjelenik egy vékony oxidos réteg, ahogyan az a bevonatok mikroszkópos felvételein látható.



14. ábra. HV0,05 keménységi lenyomatok a B1 minta (a), a B2 minta (b) és a B3 minta (c) kemény és lágy fázisaiban [23].

A 14. ábrán bemutatott keménységi lenyomatok összevetésével megállapítottuk, hogy a B1 minta gömb alakú kiválásaiban elhelyezett keménységi lenyomatok (14/a ábra, bal oldala) számottevően kisebb méretűek, mint a tőlük jobbra eső fémes mátrixban lévők. Vagyis a gömbszerű kiválásokban mért keménységértékek egyértelműen nagyobbak (445–645 HV0,05), másfel, illetve kétszeres keménységet jelezve a mátrixban mért értékekhez (312–359 HV0,05) képest.

A B2 és a B3 minták esetén már változatosabb a kép. Mind a mátrixban, mind a gömb alakú kiválásokban elhelyezett lenyomatok között találunk nagyobb méretűeket, amelyek igen kicsi, 243–352 HV0,05 keménységértékeket képviselnek. Emellett a B2 minta esetén a mátrixban lévő egyik lenyomat jelentősen nagyobb (409 HV0,05) keménységet jelez, akárcsak a B3 mintánál (413 HV0,05).

Ennek háttérében a bevonatolás során nagymértékben eltérő oxidációs folyamatok állnak, amelyek jelentősen eltérő metallurgiai folyamatokat eredményeznek (szemcsék eltérő ötvözőtartalma, ezek hatása a kritikus hűlési sebességre, a kialakuló oxidzárványok típusa, mérete, azok keménysége stb.).

A B3 minták kedvezőtlenebb megmunkálási sajátosságainak legvalószínűbb oka az elvégzett vizsgálatok alapján a következőkben összegezhető.

A réteges szerkezetű bevonatban az oxidfilm kialakulását nem a kétféle alappor esetlegesen eltérő minősége okozza, ugyanis, a B1 és a B3 mintákban, amelyek azonos minőségű WOMET alapporral készültek, nagyon eltérő méretű és mennyiségű ilyen oxidfilmmel borított szemcsét láthattunk az optikai mikroszkópos felvételeken. Ugyanakkor, az eltérő minőségű alapporból készített bevonatot tartalmazó B2 és B3 mintákban egyaránt nagy mennyiségű és durva szemcséket találunk (9–11. és 14. ábrák). Ez arra utal, hogy az oxigén eltérő mértékű forrása a B1, illetve a B2 és a B3 minták között meglévő bevonatolási technológia különbségeiből kell, hogy adódjon. Ugyanerre következtethetünk abból is, hogy a B1 minta minden vizsgált sajátossága jellemzően eltért a B2 és a B3 minták sajátosságaitól, míg az utóbbi két minta a legtöbb vizsgált jellemző tekintetében hasonló.

Meg kell még említeni, hogy a kemény fém-porszemcsék a B3 mintában számottevően nagyobb hányadban vannak jelen (7. ábra) és jellemzően nagyméretű, porózus, salakzárványba ágyazódva, amely a megmunkáláskor könnyen reped, szétesik. A kemény salakdarabok, és a belőlük kiszabaduló kemény fémes szemcsék megmunkálás során ütősszerű igénybevétellel terhelik a hónoló szerszámot.

5. Összefoglalás

Munkánk során alumínium motorblokk öntvények felületére különféle gyártási helyeken, különféle gyártóktól származó alapporból készült, APS technológiával felvitt acélbevonatokat vizsgáltunk, amelyek megmunkálása során nagymértékű eltéréseket tapasztaltunk a hónoló szerszámok kopása tekintetében.

Az elvégzett vizsgálatok jelentős különbséget mutattak ki a minták között a kémiai- és a fázisösszetétel, az anyagszerkezet, mindenképp a porozitás és kemény salakfázisok mennyisége tekintetében. Kisebb mértékű, de ugyancsak egyértelmű eltéréseket tapasztaltunk a bevonatok keménysége tekintetében, amelyek anyagszerkezeti háttérét is sikerült feltárni. Ezek az eltérések arra utalnak, hogy a B1 bevonat homogénebb szerkezetű, finomabb porozítású, míg a szerszámkopás szempontjából meghatározó jelentőségű salakzárványok, és a be nem olvadt, oxidhárttyával borított, nagy keménységű fém-por szemcsék mérete és mennyisége jóval nagyobb a B2 és a B3 mintákban.

Mivel a salakzárványok és a be nem olvadt szemcsék jelenléte egyértelműen az oxigén jelenlétéhez köthető, amelyet az APS bevonatolási technológia körülményeivel szabályozhatunk, ezért a B1, illetve a B2 és a B3 bevonatok eltérő megmunkálhatóságának okát a technológiai eltérésekben kell keresni.

Összességében a szerszámkopási probléma megoldásának kulcsa az APS technológia paramétereinek optimalizálása, amelynek révén lehetőség van a képződő oxidos salakfázisok

mennyiségének csökkentésére, a hozzájuk kapcsolódó durva porozitások finomítására, amelyet a bevonatok magas oldott oxigéntartalma is okozhat. Ezen túlmenően fontos a bevonatban jelenlévő, be nem olvadt, nagyméretű, kemény fémes fázisok mennyiségének csökkentése, és a por re-oxidáció elleni védelme. Mindezek hozzájárulhatnak a koptató és az ütőszerű igénybevételek, ezáltal szerszámkopás csökkentéséhez, és élettartamának növeléséhez.

6. Köszönetnyilvánítás

„A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.”

A szerzők ezúton mondanak köszönetet Prof. Dr. Lukács Jánosnak (FIEK; Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet) a kutatómunka pénzügyi feltételeinek biztosításáért, Prof. Dr. Mertinger Valériának és munkatársainak (Fém-tani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet) a fázisösszetételi vizsgálatokhoz nyújtott jelentős segítségért, Dr. Kulcsár Tibornak (Öntészeti Intézet) az oxidációs folyamatok metallurgiájával kapcsolatos kérdések mélyreható elemzésében nyújtott segítségért, Dr. Bánhidi Olivérnek (Kémiai Intézet) a kémiai összetételvizsgálatokkal kapcsolatos konzultációkért, valamint az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet munkatársainak, Csurrilláné Balogh Ágnesnek, a keménységmérés és a metallográfiai vizsgálatokban nyújtott segítségért, Bartók Andrásnak és Csukás Gézának a vizsgálati próbatestek elkészítéséhez nyújtott segítségért.

Irodalom

- [1] Barbezat, G. (2005). Advanced thermal spray technology and coating for lightweight engine blocks for the automotive industry. *Surface and Coatings Technology*, 200(5-6), 1990–1993. [doi:10.1016/j.surfcoat.2005.08.01](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.01)
- [2] Curry, N., Markocsan, N., Li, X.-H., Tricoire, A., & Dorfman, M. (2010). Next Generation Thermal Barrier Coatings for the Gas Turbine Industry. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(1-2), 108–115. [doi:10.1007/s11666-010-9593-x](https://doi.org/10.1007/s11666-010-9593-x)
- [3] Grilli, M. L., Valerini, D., Slobozeanu, A. E., Postolnyi, B. O., Balos, S., Rizzo, A., Piticescu, R. R. (2021). Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Last Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. *Materials*, 14, 1656. doi.org/10.3390/ma14071656
- [4] Ambrosio, L. (Ed.) (2017). *Biomedical Composites*, 2nd edition, Woodhead Publishing, ISBN 978-0-08-100752-5, p600, [doi:10.1016/C2015-0-02024-X](https://doi.org/10.1016/C2015-0-02024-X)
- [5] Bobzin, K., Ernst, F., Richardt, K., Schlaefler, T., Verpoort, C., Flores, G. (2008). Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process. *Surface and Coatings Technology*, 202(18), 4438–4443. [doi:10.1016/j.surfcoat.2008.04.023](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.023)
- [6] Zorn, T., Nentwich, G., Pichler, A. (2012). Plasma Coating to Replace Cast Iron Cylinder Liners in Production. *SAE Technical Paper Series*. [doi:10.4271/2012-32-0056](https://doi.org/10.4271/2012-32-0056)
- [7] Ernst, P. (2012). SUMEBore – The Coating Solution to Protect Cylinder Liner Surfaces. *SAE International Journal of Engines*, 5(4), 1802–1811. [doi:10.4271/2012-01-1992](https://doi.org/10.4271/2012-01-1992)
- [8] Barbezat, G. (2006). Thermal spray coatings for tribological applications in the automotive industry. *Advanced Engineering Materials*, 8(7), 678–681.

- [9] Ernst, P., Barbezat, G. (2008). Thermal spray applications in powertrain contribute to the saving of energy and material resources. *Surface and Coatings Technology*, 202(18), 4428–4431. [doi:10.1016/j.surfcoat.2008.04.02](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.02)
- [10] Klocke, F. (2009). *Manufacturing Processes 2*. RWTHedition. [doi:10.1007/978-3-540-92259-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9)
- [11] Marinescu, I. D., Rowe, W. B., Dimitrov, B., Ohmori, H. (2013). Abrasives and abrasive tools. *Tribology of Abrasive Machining Processes*, 243–311. [doi:10.1016/b978-1-4377-3467-6.0](https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-3467-6.0)
- [12] *HELLER_Coating-modules-CBC_EN*, Technical bulletin, pp. 1–8. <https://www.heller.biz/en/machines-and-solutions/coating-modules-cbc-200/> (Letöltés: 2022. december 05.)
- [13] Rowe, W. B. (2009). Mechanics of Abrasion. *Principles of Modern Grinding Technology*, 341–363. [doi:10.1016/b978-0-8155-2018-4.50023-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-8155-2018-4.50023-9)
- [14] Flores, G. (2011). Process chain for the manufacture of thermally coated cylinder bores, *Thermal Spray Bulletin*, 4(1) 35-39
- [15] Deshpande, S., Sampath, S., Zhang, H. (2006). Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings—Case study for Ni–Al. *Surface and Coatings Technology*, 200(18-19), 5395–5406. [doi:10.1016/j.surfcoat.2005.07.072](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.072)
- [16] Planche, M. P., Liao, H., Coddet, C. (2007). Oxidation control in atmospheric plasma spraying coating. *Surface and Coatings Technology*, 202(1), 69–76. [doi:10.1016/j.surfcoat.2007.04.053](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.04.053)
- [17] Syed, A. A., Denoirjean, A., Fauchais, P., Labbe, J. C. (2006). On the oxidation of stainless steel particles in the plasma jet. *Surface and Coatings Technology*, 200(14-15), 4368–4382. [doi:10.1016/j.surfcoat.2005.02.156](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.156)
- [18] Zhang, H.-Y., Liu, S.-H., Li, C.-J., Li, C.-X. (2020). Deposition and oxidation behavior of atmospheric laminar plasma sprayed Mo coatings from 200 mm to 400 mm under 20 kW: Numerical and experimental analyses. *Surface and Coatings Technology*, 400, 126245. [doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126245](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126245)
- [19] Iseni, S., Schmidt-Bleker, A., Winter, J., Weltmann, K.-D., & Reuter, S. (2014). Atmospheric pressure streamer follows the turbulent argon air boundary in a MHz argon plasma jet investigated by OH-tracer PLIF spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(15), 152001. [doi:10.1088/0022-3727/47/15/152001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/15/152001)
- [20] Iseni, S., Schmidt-Bleker, A., Winter, J., Weltmann, K. D., Reuter, S. (2014). Laminar versus turbulent flow of an argon RF APPJ investigated by OH PLIF and its influence on the discharge propagation. *Gas discharge proceeding book*, 2428-2429.
- [21] Guillen, D. P., Williams, B. G. (2006). In-Flight Oxidation of Aluminum in the Twin-Wire Electric Arc Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(1), 63–71. [doi:10.1361/105996306x92604](https://doi.org/10.1361/105996306x92604)
- [22] Davis, J. R. (1993). *Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining*, in: ASM Handbook, Welding Brazing and Soldering, ASM International 6, 1967-2018.
- [23] *Kutatási zárójelentés* (2020) – IEKU02005T, FIEK, Miskolc, pp.1-135.
- [24] Ang, A. S. M., Berndt, C. C. (2014). A review of testing methods for thermal spray coatings. *International Materials Reviews*, 59(4), 179–223. [doi:10.1179/1743280414y.0000000029](https://doi.org/10.1179/1743280414y.0000000029)

SZERKEZETINTEGRITÁSI ESETTANULMÁNYOK

Koncsik Zsuzsanna

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézete minden évben több, változatos ipari probléma megoldásával foglalkozik. Az intézeten belüli Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék feladatai közé olyan típusú kutatási tevékenységek kerülnek, amelyek segítségével az adott szerkezet üzemelése tervezhető (például anyagválasztás), az üzemelés biztosítható (például egy káreset kapcsán az igénybevételek elemzéséből nyert információ), vagy egy katasztrófa elkerülhető (például elméleti számítások, műszaki kockázati elemzések). Jelen cikkben a 2022-es évben elvégzett kutatás-fejlesztési munkák közül mutatunk be néhányat, a feladat jellegét, a megoldás módját és az eredményét, esettanulmány szintjén.

Kulcsszavak: kutatás-fejlesztés, károsodás elemzés, szerkezetintegritás

Abstract

The Institute of Materials Science and Technology at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics of the University of Miskolc is involved in solving a variety of industrial problems every year. The tasks of the Institutional Department of Structural Integrity include research activities of the type that help to plan the operation of a given structure (e.g. material selection), to ensure its operation (e.g. information from the analysis of the stresses in case of damage) or to avoid a disaster (e.g. theoretical calculations, engineering risk analysis). In this article, we present some of the research and development activities carried out in the year 2022, the nature of the task, the solution method, and the result at the level of a case study.

Keywords: research and development, damage analyses, structural integrity

1. Bevezetés

A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetének Szerkezetintegritási Intézeti Tanszéke minden évben változatos kihívásokkal néz szembe, amikor egy-egy kutatás-fejlesztési témakörű ipari feladat megoldására kap felkérést. Ezek a munkák az ország bármely területéről érkeznek, például Esztergom, Maklár, Gyöngyös, Nyíregyháza és Kecskemét, de természetesen legtöbbször a régió ipari problémáinak a megoldásával foglalkozunk. Minden naptári évben legalább 15-20 különböző ipari megkeresés érkezik, amelyeket, ha kompetenciánk és eszközparkunk engedi, igyekszünk megoldani, ezzel építve az egyetem és az ipar közötti kapcsolatot, illetve ezzel is színesítve mind a saját, mind a hallgatók tudását, beépítve a problémákat és azok

megoldását az oktatásba is. Az elmúlt években többször előfordult már, hogy volt hallgatónk tértek vissza az Intézetbe egy megoldandó feladattal, ezzel is visszaigazolván a módszer hatékonyságát.

Jelen cikkben a 2022-es évben megoldott ipari munkák feladataiból és tapasztalataiból osztok meg néhányat. Szinte már általános, hogy a vállalat a munka megkezdése előtt titoktartási nyilatkozatot írat alá az Egyetemmel, illetve az Intézet vezetőjével. Ezért az egyes feladatok bemutatása során a vállalatot nem nevezem meg, illetve a közölt képek és adatok is kizárólag olyan módon kerülnek a cikkbe, hogy az alapján a vállalat, vagy annak terméke ne legyen azonosítható.

2. Károsodás elemzés

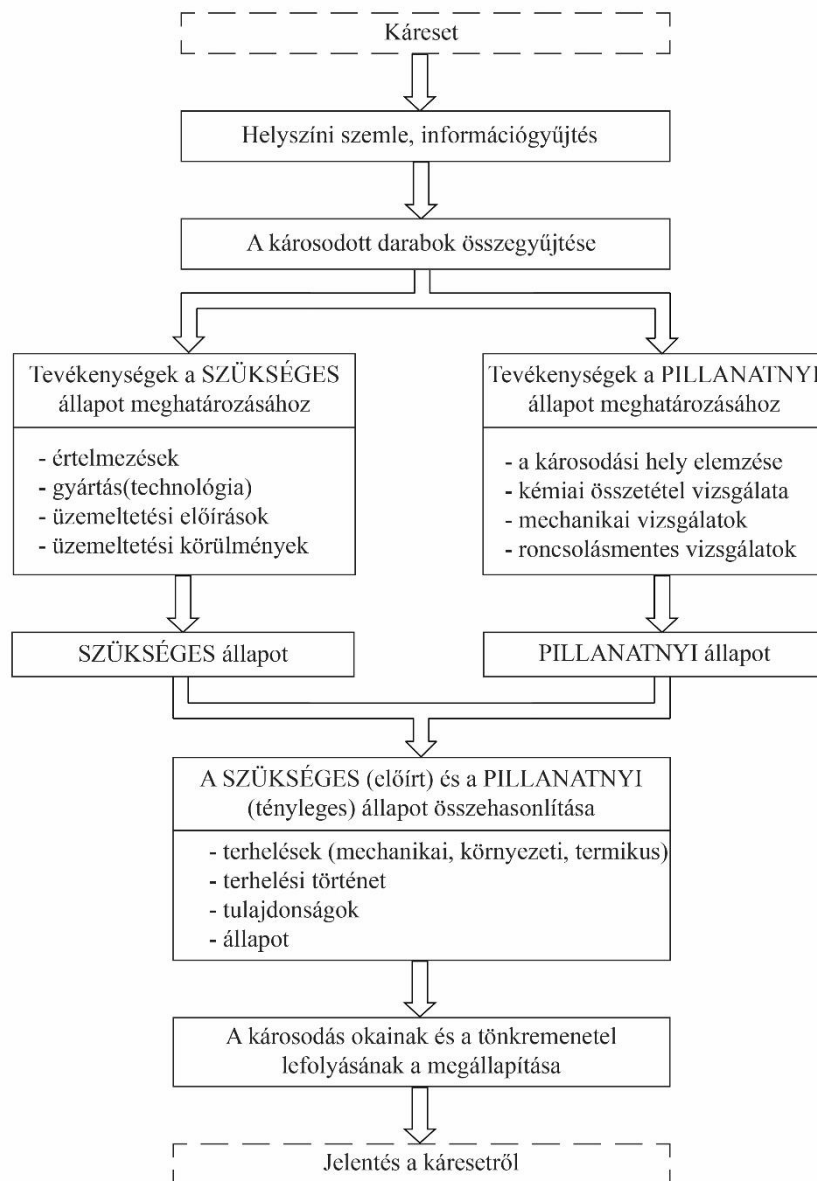
A 2022-es évben a Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék néhány esetben káresetek elemzését, a károk meghatározását és a további károsodás elkerülési módjának meghatározását kapta feladatul.

A károsodások között volt kopási károsodás, repedés, öregedés, korróziós hiba.

A károsodások elemzésének igénye mondhatjuk, hogy egyidős az emberiséggel, hiszen ha megsérült vagy eltört valami, mindig felvetődött a miért kérdése. Ha a választ sikerült megtalálni, következményként adódott egy hasonló káreset elkerülése a jövőben, amely egyben a fejlődést is jelenti (Tóth et al., 1999).

A káresetek vizsgálatára az 1. ábra szerinti általános sémát ismerjük (Grosch, 2017), (Lukács et al., 2012), az Intézetben pedig általában az alábbi lépések szerint járunk el.

1. Egyeztetünk az ipari vállalattal, és a lehető legtöbb információt begyűjtjük a vizsgálandó alkatrészről. Ehhez néha elegendő egyszer találkozni, néha azonban kérünk dokumentumokat, szabványokat, folyamatleírásokat áttanulmányozásra, és ezek megismerése után egy újabb találkozáson tisztázzuk a további kérdéses részleteket.
2. Ha már ismerjük az adott termék/alkatrész rendeltetését, üzemszerű működését, élettartamát (tervezett és elért), igénybevételeit és az esetleges nem üzemszerűen előforduló eseményeket, akkor javaslatot teszünk a szükséges vizsgálatokra.
3. Leggyakrabban alkalmazott vizsgálatok egy károsodás elemzése során:
 - a. mechanikai vizsgálatok: szakítóvizsgálat, ütővizsgálat, keménység mérés;
 - b. makrovizsgálatok: szemrevételezés (VT), folyadékbehatolásos vizsgálat (PT), a töretfelület vizsgálata;
 - c. anyagszerkezeti vizsgálatok: zárványosság vizsgálata, szövetszerkezet vizsgálata, kémiai összetétel meghatározása;
 - d. speciális vizsgálatok: az alkalmazástól függő egyedi speciális vizsgálatok, például egy adott üzemelési körülmény szimulálása akár tényleges fizikai megvalósítással (például növelt hőmérséklet és/vagy valamilyen korrozív közeg), vagy fizikai szimulációval. Számos esetben a gyártás (alakítás, hegesztés) vagy az üzemelés folyamatainak numerikus szimulációjára is szükség van.
4. Eredmények feldolgozása, a vizsgálati eredmények alapján a valós viselkedés és az elvárt viselkedés összehasonlítása, a károsodás okainak azonosítása, javaslatok megfogalmazása egy esetleges hasonló káreset megelőzésére.



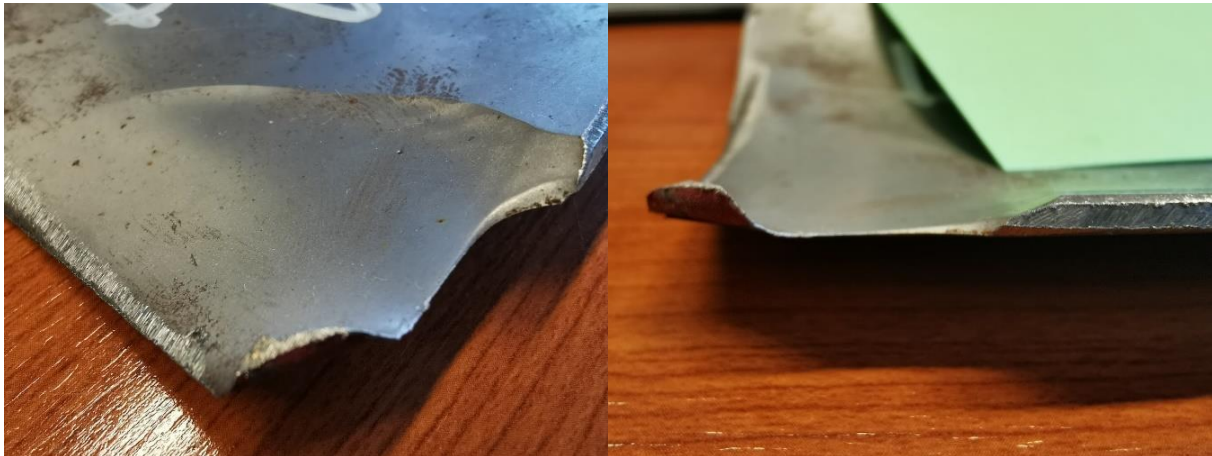
1. ábra. A káresetek vizsgálatának általános sémája.

A fenti négy lépés felsorolása bár egy egyszerű folyamatnak tűnik, a legtöbb esetben nehézségbe ütközik, még hozzá már az első pontban. Az említett titoktartás miatt a legtöbb ipari vállalat nehezen oszt meg információkat az adott alkatrész / szerkezet gyártásáról, üzemeléséről, igénybevételeiről. A titoktartás mellett a másik tényező, hogy a folyamatok nem monitorozottak, így az információ, ami számunkra szükséges volna, egyszerűen nem áll rendelkezésre. A gyártásra, üzemeltetésre, igénybevételekre vonatkozó alap információk azonban elengedhetetlenek ahhoz, hogy egy károsodás esetén a konkrét hibaok(ka)t megnevezzük. Ezek hiányában a legnagyobb odafigyelés és a lehető legtöbb elvégzett hibafeltárási vizsgálat eredménye mellett is, csak úgy fogalmazhatunk, hogy ha

bizonyos körülményeket feltételezünk, hogy fennállnak, úgy ez és ez lehetett a hiba oka, ha nem állnak fenn ezek a körülmények, előfordulhat, hogy más hibákra kell gyanakodnunk. Ez eléggé megnehezíti a hibafeltárási vizsgálatok pontosságát.

További nehézség szokott lenni, hogy a vállalat egy hibajelenség kapcsán egy adott vizsgálatot kér, amelyről úgy gondolja, hogy annak eredménye magyarázatot ad a hibára. Ekkor nem tudunk hibafeltárási vizsgálatot végezni, hiszen a vállalat csupán egy adott termék, egy adott vizsgálatát kérte, amelynek eredményét közöljük. Ilyenkor többnyire utólagosan kérnek egyeztetett vizsgálatokat, a hibajelenség tényleges okának feltárására.

Az az eset is előfordul, hogy az ajánlott vizsgálataink eredményeinek alakulása közben javaslatot teszünk további, vagy más vizsgálatokra, amelyek közelebb tudnak vinni a hiba okának kiderítéséhez. Az egyik ipari partnerünk például egy gabona tároló tartály túlzott mértékű kopásával jelentkezett. A kopási jelenség szemrevételezésén (lásd 2. ábra) túl, helytelen anyagválasztásra, illetve nem az előírásnak megfelelő anyagminőségre gyanakodtunk. Így a vizsgálatok közül a leggyorsabban kivitelezhető keménységmérésre, majd mivel annak eredménye nem volt megnyugtató, így további mikroszerkezeti vizsgálatokra tettünk javaslatot.



2. ábra. Kopott tartálydarab felülete és falvastagsága.

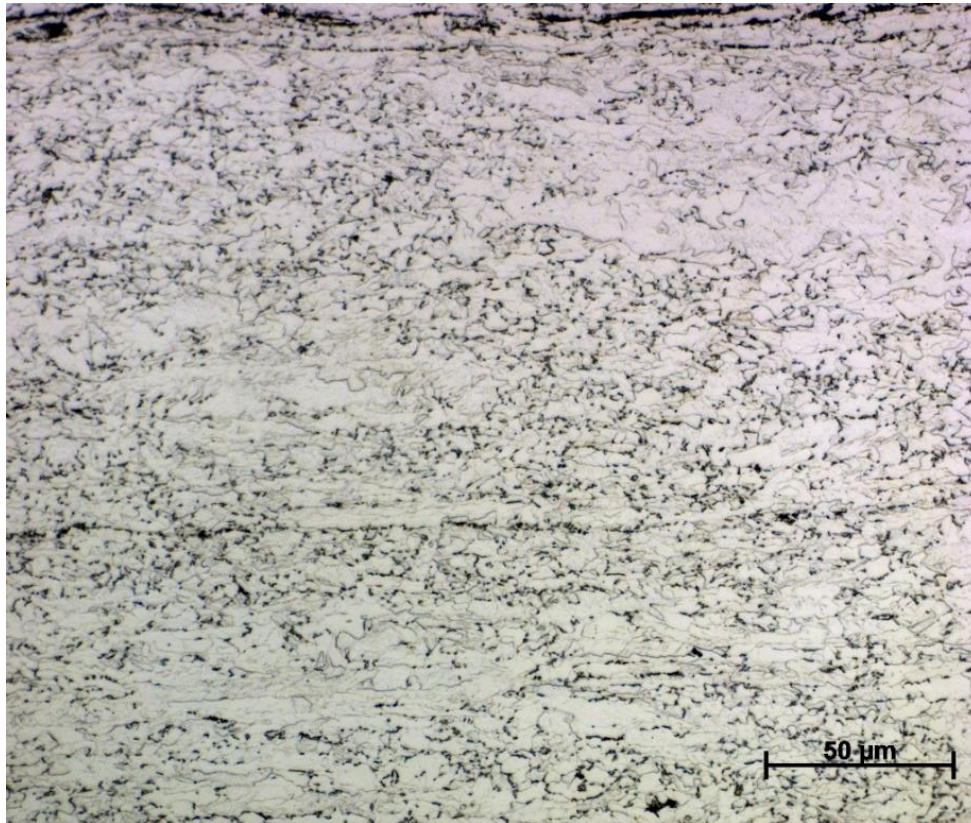
A tartály falából kimunkált 3 próbatesten végeztünk keménységmérést, amelynek az eredményeit az 1. táblázat foglalja össze. A lemezek keménységét Reiharter UH 250 univerzális keménységmérő berendezésen mértük, 100 N terhelőerőt alkalmazva.

1. táblázat. A HV10 Vickers keménységmérés eredményei.

Mérés sorszáma	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest
1. mérés	201	200	204
2. mérés	199	198	201
3. mérés	203	206	203
Átlag	201	201	203
Szórás	2,00	4,16	1,53

A keménységi értékeket a táblázatban HV10 keménységekben tüntettük fel, de ez 450HBW-ig megfelel a HBW értékének is. A keménységmérés eredménye alapján megállapítható, hogy a lemezek keménysége 200 HV10 körüli érték, amely mindhárom vizsgált lemez esetén igaz. A mérési eredmények szórása nagyon kicsi, vagyis a lemez homogénnek tekinthető.

A Megrendelő által elvárt keménység értéke 425-475 HBW keménység. Ezt az értéket a vizsgált lemezek nem teljesítik. Ezután mikroszerkezeti vizsgálattal igyekeztünk kideríteni, hogy mi lehet ennek az oka. Ehhez a lemez anyagból megfelelő méretű próbatestet munkáltunk ki, műgyantába ágyasztuk be, a felületét előkészítettük, majd 2%-os salétromsavas oldattal megmarattuk. A szövetszerkezetet ZEISS Observer D1m optikai mikroszkóp segítségével vizsgáltuk. A készített felvétel a 3. ábrán látható. A vizsgált próbatestek szövetszerkezete ferrites, kevés perlit szemcsével; a hengerlési technológia elnyúlt szemcsealakjai megjelennek a mikroszerkezeti felvételeken.



3. ábra. A 3. számú próbatest szövetszerkezete a hengerlési irányban, $N=500\times$.

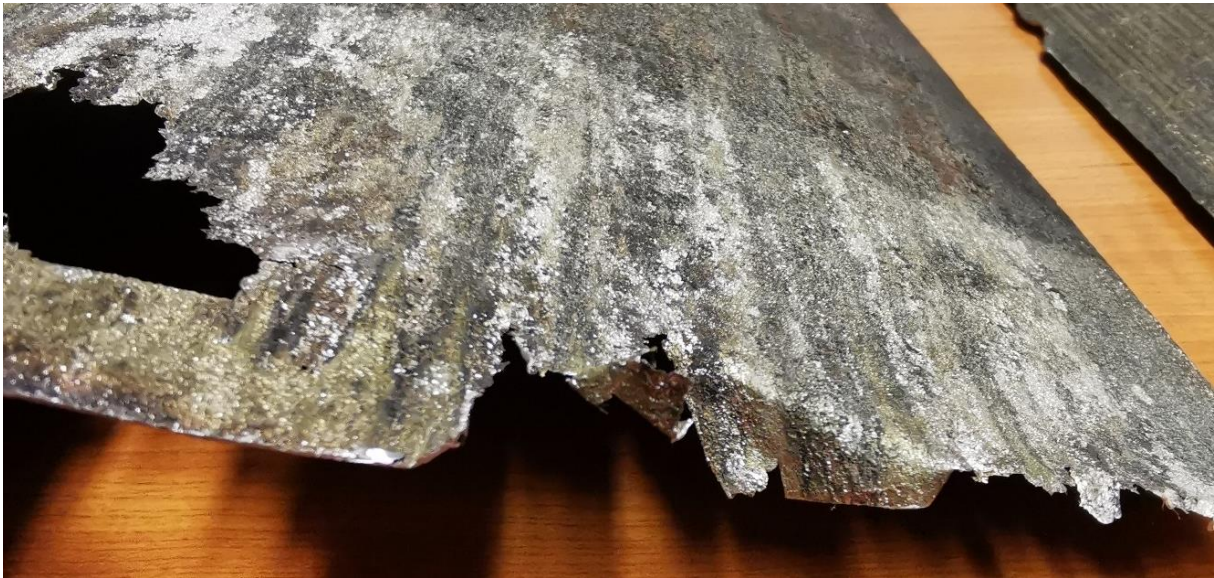
A vizsgálati darabok pontos kémiai összetételét nem ismerjük, de a mikroszerkezeti felvételek alapján feltételezhetően egy kis karbon-tartalmú, gyengén ötvözött acélról van szó. Így, egy körülbelül két munkanapos vizsgálat után, a mért keménység és a feltárt szövetszerkezet alapján azt a megállapítást tehetjük, hogy az alkalmazott tartály anyag nem felel meg az anyagminőségtől elvárt mechanikai tulajdonságoknak. Időközben az is kiderült, hogy egy olcsóbb, könnyebben hozzáférhető, de ugyanolyan remélt viselkedéssel bíró anyagminőséget alkalmazott a vállalat, mint korábban. Így arra már nem kellett gyanakodnunk, hogy az acél gyártójánál esetleg elégtelen volt a hőkezelés. Sajnos

a tapasztalat azt mutatta, hogy ugyanarra az igénybevételre ez a választott anyagminőség nem lesz megfelelő.

Egyetlen további nehézség szokott még szinte minden kutatás-fejlesztési munkánál fellépni, az idő. Lehet, hogy a vállalat a problémával akár már hosszabb ideje is küzd, de a megoldásra a lehető leghamarabb szüksége van. Így ennél a munkánál is a leggyorsabban elvégezhető és eredményt adó vizsgálati módszerekre tettünk javaslatot.

Ha a probléma megoldása anyagi ráfordítást igényel a vállalat részéről, gazdasági mérlegelés is történik, hogy megéri-e az adott befektetés, vagy kisebb haszonkieséssel jár, ha elviseli az időnként jelentkező selejtet, illetve károsodást.

Hasonlóan kopás, esetleg korrózió megjelenése miatt kereste fel az Intézetet egy vállalat; több átlukadt ventilátor darab érkezett vizsgálatra. A vállalattól kapott csekély információ alapján a ventilátor 80-110 °C-os, áramló, párás levegővel találkozik a működése során, amely áramló közegben ammónia, vagy ammónium-hidroxid fordulhat elő. A szemrevételezés során, az átlukadás jellege miatt feltételeztük a korrozív közeg jelenlétét (lásd 4. ábra).



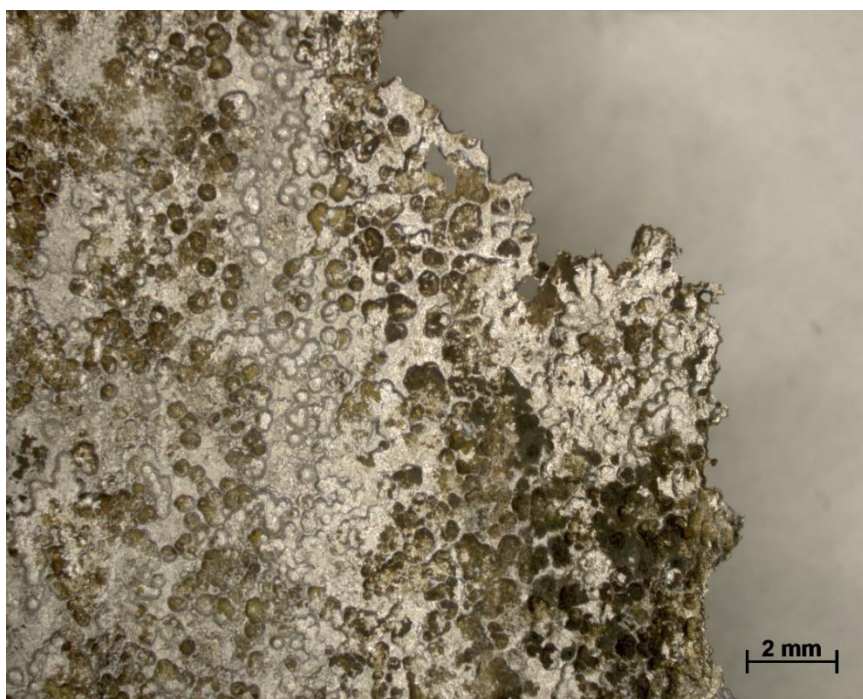
4. ábra. Átlukadt lapát darab.

A makroszkópi vizsgálatok előtti szemrevételezés során megállapítottuk, hogy a lapátokon egyrészt – feltehetően a közeg miatt – felrakódásként ragacsos, helyenként inkább fekete, másutt sárgás-zöldes színű réteg látható. Ez a réteg mechanikusan ugyan eltávolítható, de így károsodna a felület is. Vegyszer hatására minimálisan eltávolítható. A réteg néhol sávos jelleget mutat, kisebb mennyiségben és rétegvastagságban a lapát túloldalán is megjelenik. Másrészt, találtunk olyan felületrészeket is, amelyek inkább kopás jellegű, jelentős mértékű falvastagság-csökkenés nélkül (lásd 5. ábra). A kopás jellege lehet akár alakváltozásból, a felület elkenődéséből eredő, vagy az áramló közeg, esetleg benne lévő vízcseppek, vagy szilárd alkotók becsapódásából eredő kavitációs kopás.



5. ábra. Kopott felületű lapát darab.

A korróziós felületeket Zeiss Stemi 2000-C típusú sztereo mikroszkóp segítségével elemeztük, ahol egyszerűen azonosítani tudtuk a pitting típusú korróziót (lásd 6. ábra).



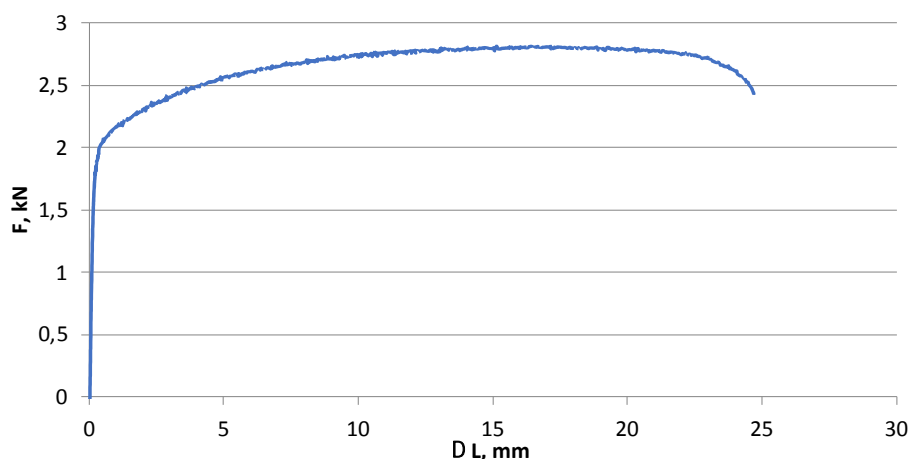
6. ábra. Pitting korrózió az egyik lapát darabon, a tisztított, szakadáshoz közeli részen, $N=6,5\times$.

Sem a ventilátor lapátok elhelyezkedésére, sem az azokat érő közeg összetételére, áramlására vonatkozóan nem rendelkezünk információval, így arra vonatkozóan, hogy az egyik darab miért inkább korrodált, mint kopott, és fordítva, nem tudunk információt adni. A vállalattól sajnos nem állt rendelkezésünkre a ventilátor lapát anyagára vonatkozó követelmény, műbizonylat sem. GDOES technikát alkalmazva elemeztük a lapát vegyi összetételét, amely a mérési eredmények alapján leginkább az Ni-Cu 400-as anyagminőségnek felelt meg.

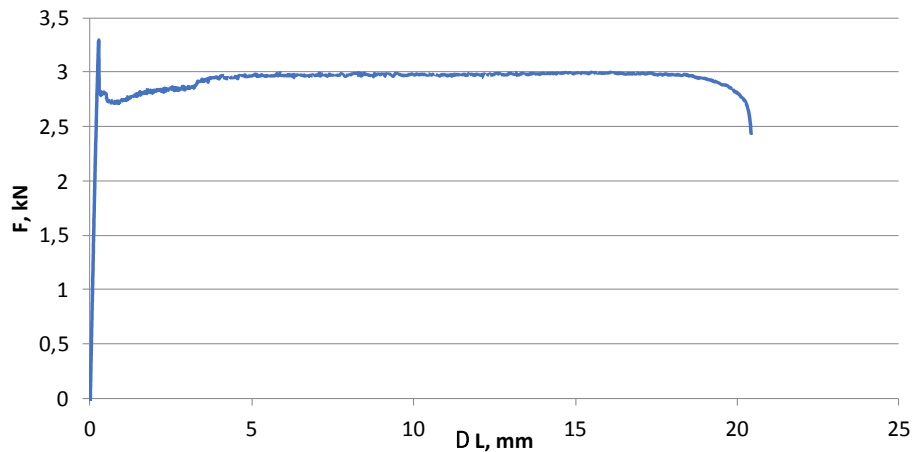
Ez az anyagminőség számos termékben használatos, különösen a tengerre tervezett termékek és a vegyi üzemek gyártmányai számára. Fokozottan ellenálló a klorid-ion által okozott feszültségkorróziós repedéssel szemben, általánosságban jó a korróziós ellenálló képessége redukáló környezetben, de nem annyira erős az ellenálló képessége oxidáló környezetben. Ellenáll a sóknak, víznek, ételeknek, szerves anyagoknak, környezeti közegnek mind normál, mind növelt hőmérsékleten. Ellenáll a kénsavnak 80%-os koncentrációig, és a sósavnak 20%-os koncentrációig. Azonban, az oxidáló hatású szennyeződések, vas-klorid, vas-szulfát, kromátok, nitrátok, peroxidok és a réz sói megtámadhatják a felületet és korróziót okozhatnak. Az anyag adatlap (Ni-Cu-400 Datasheet) tartalmazza azt az információt is, hogy ez az ötvözet nem használható erősen oxidáló hatású, nitrid, salétromsavas, ammónium-vegyületeket tartalmazó közegben.

Így összességében egy makroszkópi vizsgálatból és egy kémiai összetétel elemzésből azt a megállapítást tehetjük, hogy a ventilátor lapát anyagaként választott Ni-Cu 400-as ötvözet – bár sok közeggel szemben rendkívül ellenálló magas hőmérsékleten is –, az ammónia vagy az ammónium-hidroxid közeg ennél az anyagminőségénél korróziót okoz.

Szintén alapanyagváltás (DC01 anyagminőségről DX51D anyagminőségre) miatt került sor egy másik kutatás-fejlesztési munkára, amely során festett lemez alkatrészek öregedését vizsgáltuk. A lemez alkatrészek öregedésének meghatározását nem tudjuk a hagyományos módon végezni. Így a szakítóvizsgálatot hívtuk segítségül és a folyáshatár értékének változását tanulmányoztuk. A vizsgálataink megállapították, hogy a korábban alkalmazott alapanyag nem mutat határozott folyáshatárt (lásd 7. ábra), míg az újonnan alkalmazott alapanyag – a festési műveletet követően – határozott alsó és felső folyáshatárral bír (lásd 8. ábra). Vagyis, az új anyagminőség feltehetően nem csillapított (a vegyi összetételt nem vizsgáltunk) és a festési művelet növelt hőmérséklete elősegítette az alapanyag mesterséges öregedését.

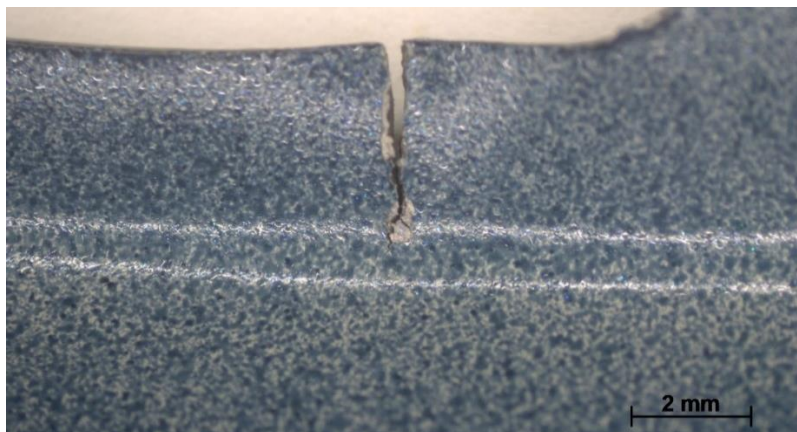


7. ábra. Határozott folyáshatárt nem mutató, korábban alkalmazott anyagminőség.



8. ábra. Határozott folyáshatárt mutató, új anyagminőség.

Numerikus modellezéssel kívánjuk megoldani azt a problémát, amely egy járműipari vállalat esetében lépett fel. Egy lemez alkatrész alakítási és festési műveleteit követően a 9. ábrán látható repedés jelentkezik.



9. ábra. Repedés egy lemez alkatrészen a festési műveletet követően.

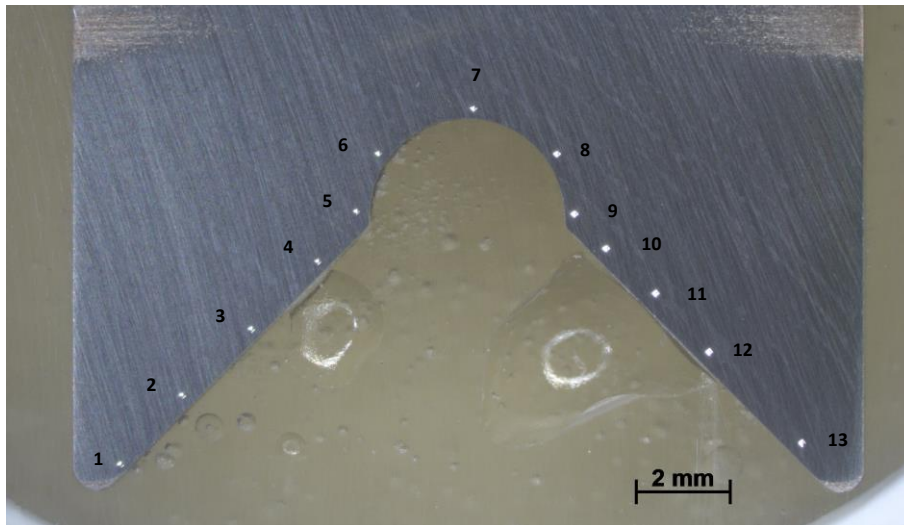
A szakítóvizsgálat, a mikroszerkezet, a kémiai összetétel és a festés alatti hőkezelés közbeni esetleges öregedés vizsgálata alapján nem tapasztaltunk eltérést, hiányosságot, ezért döntöttünk az alakítási folyamat numerikus modellezése mellett. Ehhez azonban a vállalat részéről részletes szerszám geometria és az alakítási folyamat pontos leírása szükséges, amely újra titkosítási és folyamat leírasi hiányosságokba ütközik, így ennek a feladatnak a teljesítése még folyamatban van.

3. Minősítő vizsgálatok

A kutatás-fejlesztési munkák másik típusa az ismeretlen anyagminőségű és/vagy ismeretlen helyről beszerzett alkatrész alapanyagának minősítése (mikroszerkezet, kémiai összetétel, hőkezeltégi

állapot), illetve az adott alkalmazásra a helyes alapanyag választás segítése, akár úgy is, hogy egy korábbi anyagminőség pontos összetétele és hőkezelési állapotának meghatározása a cél.

Egy adott hőkezelési technológia sikerességét ellenőriztük a 10. ábrán látható vágószerszám élettartományában. Az ábrán is jelölt helyeken mért keménység értékek 685-728 HV10 érték (átszámítva $\sim 59,7 - 61$ HRC) között mozogtak, ami a hőkezelési technológia sikerességére engedett következtetni.



10. ábra. Keménységi lenyomatok elhelyezkedése egy vágószerszám élén.

Egy másik kutatás-fejlesztési munka során egy perforáló szerszámon (lásd 11. ábra) az élettartam hirtelen lecsökkenése okán került sor kémiai összetétel (bevonat és szerszám alapanyag), mikroszerkezet és keménység vizsgálatára.

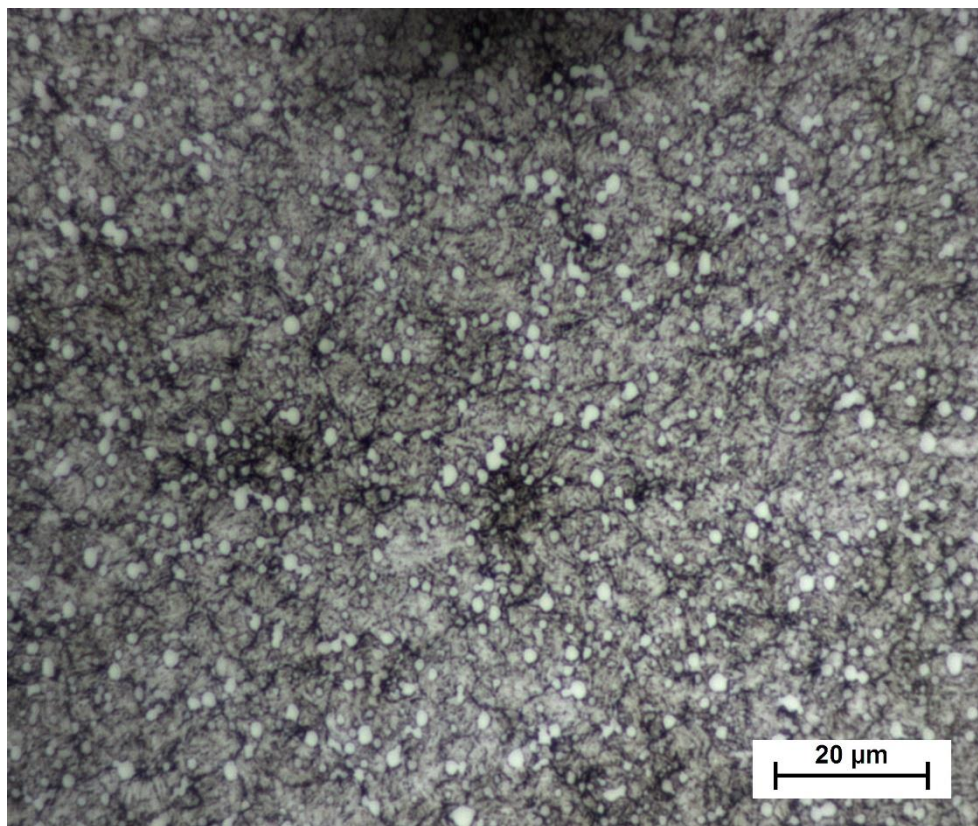


11. ábra. Perforáló szerszám elő- és hátlapja.

A vizsgálathoz bár kaptunk hosszabb élettartamú (jól bevált) szerszámot is, vizsgálni csak a rövidebb élettartamú szerszámot kérte a vállalat, így ebben az esetben az eredmények

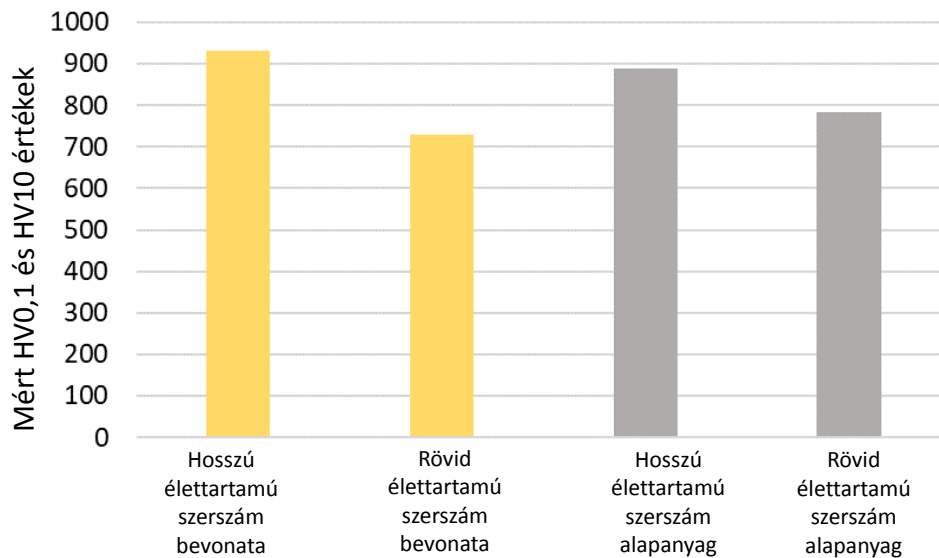
összehasonlítását valószínűleg maga a vállalat végezte el. Ez azért lehet problémás, mert nem biztos, hogy egy másik vizsgáló berendezésen elvégzett azonos típusú mérés eredményeit maradéktalanul össze lehet hasonlítani egymással.

A szemrevételezés és a vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a szerszám munkafelülete bevonatolt. A kémiai összetétel meghatározásához GDOES technikát alkalmaztunk, amely a mélység függvényében tudja megadni az összetételt. A vizsgált szerszám 1,25...2 μm vastagságú TiN bevonattal készült, az alapfém pedig az elemzés alapján leginkább az 1.3361 jelű anyagminőségnek felelt meg, amely szerszámacél, elsősorban kések anyaga. Szövetszerkezetét tekintve temperált martenzites, bainitias, karbid kiválásokat tartalmazó mikroszerkezetet láthattunk a 12. ábrán, amely megfelel az adott alkalmazásra szánt szerszám szövetszerkezetének.



12. ábra. Temperált martenzites, bainitias, karbid kiválásokat tartalmazó mikroszerkezet, $N=1000\times$.

A kémiai összetétel vizsgálatát sajnos nem tudjuk a saját laboratóriumunkban elvégezni, azonban egy összehasonlító keménységmérést tudtunk végezni, mind a hosszú, mind a rövidebb élettartamú szerszámon. A bevonat keménységét HV0,1, az alapfém keménységét pedig HV10 eljárást alkalmazva mértük. A mért eredmények a 13. ábrán láthatók.



13. ábra. Perforáló szerszám keménység értékei.

Azt a megállapítást tettük, hogy mind a bevonat, mind az alapanyag keménysége valamivel kisebb a rövidebb élettartamú szerszám esetében. Ennek biztosan meg fogja találni az anyagszerkezetre visszavezethető okát a vállalat.

4. Összefoglalás

Az Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézet Szerkezetintegritási Intézeti Tanszékének idei (2022) kutatás-fejlesztési munkáiból tartalmaz egy összefoglalót a cikk. A munkák ebben az esztendőben két főbb feladatkör köré csoportosultak: károsodáselemzés, minősítő vizsgálatok, és mindkét feladatkörben megjelent az anyagválasztás is.

Esettanulmányok típusú feldolgozásban kerültek bemutatásra a főbb feladatok, az alapvető vállalati problémák, a megoldáshoz tartozó vizsgálatok típusai, és az eredmények alapján nyert legfontosabb megállapítások.

Irodalom

- [1] Tóth, L., Magyar, Z., Lévay, I. (1999) *Kárelemzés, törések gazdasági kihatásai*, (accessed: <https://mek.oszk.hu/01100/01179/01179.pdf>, november 2022.)
- [2] Grosch, J. (2017). *Schadenskunde im Maschinenbau: Charakteristische Schadensursachen - Analyse und Aussagen von Schadensfällen*. Expert Verlag.
- [3] Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., Koritárné, F R.,Kuzselláné, K Zs. Lukács, J (szerk.) (2012) *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*, Miskolci Egyetem, 334 p. ISBN: 9789633580004
- [4] *Technical Datasheet Cartech Ni-Cu 400 anyagminőség*, (accessed: <https://www.carpentertechnology.com/hubfs/7407324/Material%20Safety%20Data%20Sheets/Ni-Cu%20400.pdf>, auguszt 2022.)

FÖLDGÁZSZÁLLÍTÓ CSŐVEZETÉKEK POTENCIÁLISAN VESZÉLYES HELYEINEK KOCKÁZAT ALAPÚ AZONOSÍTÁSA

Koncsik Zsuzsanna

egyetemi docens, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkeztintegritási Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Lukács János

egyetemi tanár, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkeztintegritási Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen publikációban nemzetközi tapasztalatokból és gyakorlatokból kiindulva ajánlunk módszereket, amelyek alkalmasak a földgázszállító csővezetékek lokálisan lehetséges veszélyt rejtő helyeinek azonosítására. A módszerek kidolgozása során olyan információkra támaszkodtunk – mint kiinduló adatok –, amelyek egyébként is az üzemeltető rendelkezésére állnak. A módszerek kidolgozása során cél volt a kockázati alapú megközelítés, amely lehetővé teszi az azonosított, lehetségesen veszélyes helyek rangsorolását, ami megkönnyíti az azonosítás utáni intézkedések szükséges sorrendjének felállítását.

Kulcsszavak: csővezeték, károsodás, veszély, kockázat

Abstract

In this publication, we recommend methods based on international experience and practices for identifying locally potentially dangerous locations in natural gas transmission pipelines. In developing the methods, we have relied on information that is already available to the operator as a starting point. The aim in developing the methods was to use a risk-based approach, which allows the prioritisation of identified potentially dangerous locations, facilitating the necessary sequencing of post-identification actions.

Keywords: pipeline, damage, danger, risk

1. Bevezetés

Egy gázvezetékek meghibásodása, esetenként annak következtében katasztrófa bekövetkezése, mindig negatív hatású következményekkel járó esemény, amely nemcsak gazdasági, környezeti károkat, de akár személyi sérülést is okozhat (Ramírez-Camacho et al. 2017). A mai korban a gázszállító rendszerek biztonsága relatíve nagyinak mondható, azonban ehhez szükség volt a megelőző korok sajnálatos katasztrófáira és a belőlük nyert információkra, illetve tudásra. A károsodáshoz vezető okok gyakran nem voltak a károsodás előtt ismertek, így arra vonatkozó vizsgálat sem folyhatott előzetesen (Gabetta et al. 2011).

A korábbi korszakokban a szerkezt átadási-átvételi, és az eltérésekre (hibákra) vonatkozó elfogadási követelményei a mai kor követelményeitől eltérőek voltak. Ennek oka például az, hogy még

nem léteztek olyan vizsgáló eljárások, amelyekkel ma már jóval szigorúbb követelményeket lehet előírni egy-egy újonnan elkészült csőszakaszra vonatkozóan.

Míg a tengerentúlon, Észak-Amerikában bármely csővezetéken bekövetkezett balesetet jelenteni szükséges az illetékes hatóságnak (Bolt, 2006), addig Európában a csővezetékekkel kapcsolatos balesetek bejelentésére nincs törvényi szabályozás. Maguk az üzemeltetők döntöttek úgy, hogy létrehoznak egy csővezeték baleseti adatbázist, amelynek tanulságaiból mindenki meríthet; így alakult meg az EGIG, a European Gas Incident data Group (Bolt, 2006). Ezt mexikói szakemberek egy lépéssel már tovább is gondolták és létrehozták a FAES (Failure Analysis Expert System) adatbázist, amelyet mesterséges neurális hálózat támogat (Castellanos et al., 2011). Ugyanakkor, jelenleg még nincs olyan adatbázis, amely egységes kritériumokat állapítana meg, amelyek alapján a meghibásodások kiváltó okai azonosíthatók, sőt – és ez az igazi szándék – előre jelezhető, illetve megelőzhető lennének.

A magyarországi gázvezeték hálózat jelentős hosszon meghaladta már a telepítésekor tervezett életkorát, ami nem egyedi, hiszen ez jellemzi a világ összes ilyen rendszerét. A legbiztonságosabb üzemeltetés mellett is előfordultak és előfordulnak haváriák, amelyek a mai kor fizikai és szimulációs, valamint adatfeldolgozó eszközeit felhasználva, biztosan nem száz százalékosan, de nagy hányadban, megelőzhető, elkerülhető. Ilyen módszerek összegyűjtésére teszünk kísérletet a jelen cikkben, a gázvezetékek potenciálisan veszélyes helyeinek azonosítása érdekében.

2. Nemzetközi tapasztalatok

Nem létezik nemzetközileg elfogadott módszer arra, hogy hogyan elemezzük a rendelkezésre álló adatokat, mit vizsgáljunk a csővezetékeken, és mikor gyanakodjunk egy-egy adat kapcsán arra, hogy potenciálisan veszélyes helyeket azonosítunk. A nemzetközi gyakorlat az, hogy évekre, évtizedekre visszamenően tárolják egy-egy meghibásodás kivizsgált kiváltó okait, és ezek alapján statisztikai elemzéseket végeznek, hogy mely hibatípus, milyen gyakran fordult elő a közelebbi vagy a távolabbi múltban. Arra vonatkozóan azonban már nincs ajánlás, hogy mit lehetne tenni annak érdekében, hogy egy jövőbeli hasonló károsodás elkerülhető legyen.

A Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) a következő csővezeték meghibásodási okokat különbözteti meg (Anon., 2018a; Anon., 2022):

- korrózió: külső korrózió, belső korrózió, feszültség korrózió (Stress Corrosion Cracking = SCC), szelektív korrózió (Selective Seam Corrosion = SSC);
- feltárából eredő hiba;
- természeti katasztrófa;
- további külső erő okozta meghibásodás: harmadik fél hibája;
- anyag / hegesztési hiba;
- a csővezetéken kívüli berendezés / eszköz hibája;
- nem megfelelő működtetés;
- bármely más hibaok.

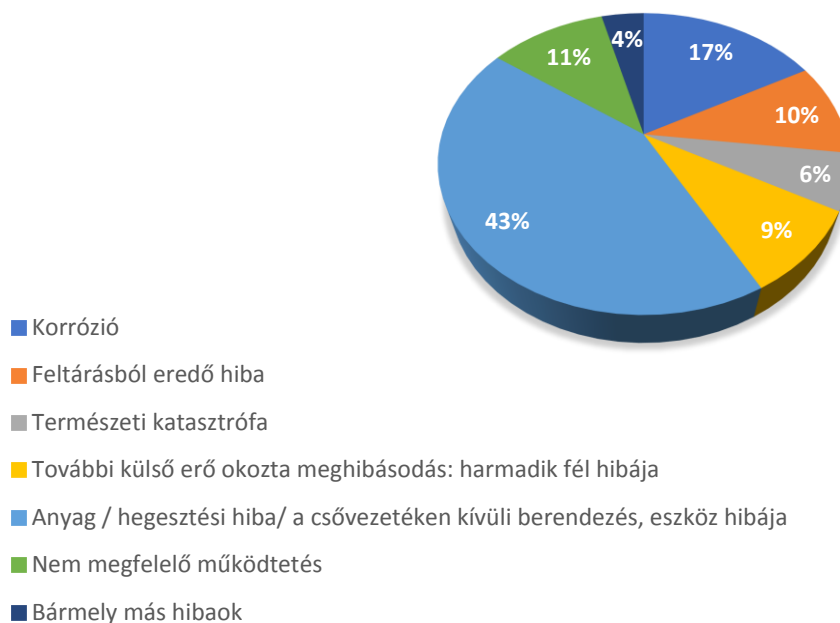
Az 1. ábrán a PHMSA által összegyűjtött hibák hibaokkonkénti százalékos megoszlása látható a 2009 és 2018 közötti időszakra (Anon., 2022).

Az EGIG adatbázisában (Anon., 2018b) számosságában és tartalmában egyaránt kissé eltérő hibaokok szerepelnek:

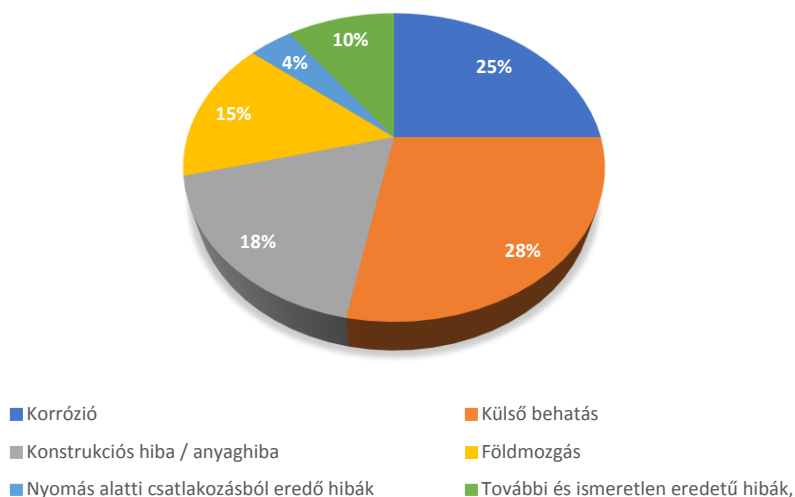
- korrózió;
- külső behatás, amely hasonló a feltárási hibához a PHMSA adatbázisában;

- konstrukciós hiba / anyaghiba, amely hasonló az anyag / hegesztési hibához a PHMSA adatbázisában;
- földmozgás;
- nyomás alatti csatlakozásból eredő hibák;
- további és ismeretlen eredetű hibák, például tervezési hiba, karbantartási hiba, villámkár.

A 2. ábrán az EGIG adatbázis hibaokainak százalékos megoszlása látható a 2007 és 2016 közötti időszakra (Anon., 2018b).



1. ábra. A PHMSA által összegyűjtött hibák okainak százalékos megoszlása, 2009-2018 (Anon., 2022).



2. ábra. Az EGIG adatbázisban található hibák okainak százalékos megoszlása, 2007-2016 (Anon., 2018b).

A történelem 10 legnagyobb hatású csővezeték meghibásodásának tanulságai [8]:

- a csővezeték meghibásodásokat azonnal jelenteni kell a megfelelő katasztrófavédelmi egységek felé és a lehető leghamarabb értesíteni kell arról a közelben lévő lakosságot;
- a megfelelően tervezett és kivitelezett karbantartási műveletek létfontosságúak;
- a legmodernebb szivárgásérzékelő rendszerek használata kulcsfontosságú;
- az anyagválasztás során ügyelni kell arra, hogy az alapanyag ne legyen hajlamos pitting típusú korrózióra;
- a csővezetékek szigetelésének mindig megfelelőnek kell lenniük;
- ha éghető, robbanásra hajlamos gáz vagy olaj terméket szállító csővezetésekről van szó, akkor kockázatelemzés mindig szükséges;
- a csővezetékért felelős vállalatnak az esemény bejelentésekor a lehető leggyorsabban és leghatékonyabban kell reagálnia;
- a káresethez vezető tényleges ok minél pontosabb tisztázása fontos feladat, mert általa a következő hasonló káreset elkerülhető és az emberi életek nincsenek kockázatnak kitéve.

A magyarországi káresetek kivizsgálása számos esetben kötődött a Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetéhez, valamint elődjéhez a Mechanikai Technológiai Tanszékhez. A tapasztalatok és az elődök tapasztalatai alapján, a következőkben több olyan megközelítést is javasolunk, amelyek mentén, a magyarországi helyzet, állapot és káreset statisztika figyelembevételével, a potenciálisan veszélyes helyek jó eséllyel előre jelezhetőek.

3. Hazai tapasztalatok, a módszerek kiinduló megfontolásai

A feladat megoldásának első és legfontosabb szempontja: meg kell határozni a gáz távvezetési rendszeren előforduló, potenciálisan veszélyesnek minősíthető, kritikus helyszíneket, szakaszokat leíró jellemzőket, amelyek a nem megfelelő – vagyis veszélyes – műszaki állapotuk alapján a vezeték rendeltetésszerű használatát megakadályozzák és katasztrófális mértékű meghibásodást képesek eredményezni.

Az előzetes ismeretek és tapasztalatok alapján megállapítottuk, hogy a műszakilag nem megfelelő helyszínek létrejöhetnek:

- az alapanyag gyártási technológiájából adódóan;
- a csőgyártási technológiából adódóan;
- a vezeték építéséből adódóan;
- az adott kor műszaki követelményeiből adódóan, amelyek jellemzően alacsonyabbak (voltak) napjaink vonatkozó követelményeinél;
- az üzemeltetésből adódóan;
- a váratlan eseményekből adódóan.

A feladat megoldása során arra is törekedtünk, hogy a potenciálisan veszélyes helyszíneknek – egy adott veszélyforrásra tekintettel – a kockázati rangsorolására is lehetőséget teremtsünk.

Összefoglalóan kiindulásként az alábbiakat állapíthatjuk meg:

adott A-B, „x” km hosszúságú vezetékszakasz, „y” darab körvarrattal, „z” darab vezetékszervénnyel és „w” darab kiegészítő szerelvénnyel,

- aminek a csőteste valamilyen anyagminőségű:
 - vagy van róla bizonylat, vagy nincs róla bizonylat,

- vagy a bizonylatnak megfelelő a beépített anyagminőség, vagy a bizonylatnak nem felel meg a beépített anyagminőség, és erről vagy van információnk, vagy nincs;
- aminek a csőteste valamilyen módon gyártott:
 - hosszvarratos, spirálvarratos, vagy varrat nélküli;
- aminek az építése valamilyen módon tervezett:
 - vagy van róla dokumentáció, vagy részben van róla dokumentáció, vagy nincs róla dokumentáció;
- adott továbbá a kor műszaki kultúrája:
 - hegesztési gyakorlat sajátosságai,
 - a roncsolásmentes vizsgálati (röntgenezési) gyakorlat sajátosságai,
 - a dokumentálás, illetve a dokumentáció sajátosságai;
- a körvarratok jellemzése az EPRG irányelvei alapján:
 - a 2. szint szerint;
 - adatok ismertek, megfelelőek a jellemzéshez.

Az előzőekben felsorolt adatok nagy része a csővezeték építéskori D-tervéből nyerhető adat, illetve vannak olyan információk is, amelyek a hazai tapasztalatokon alapulnak, például az adott korra jellemző műszaki kultúra.

Az utolsó szempont, a körvarratok jellemzése, az EPRG irányelvek figyelembevételével kell, hogy történjen. Ez az előírás azonban X70 és afölötti anyagminőségre vonatkozik, így az itt szereplő felvételeket és követelményeket többnyire információ hiányában majd csak az újonnan épülő vezetékek esetében lehet figyelembe venni, a jelenleg üzemelőknél még nem.

4. Különböző kockázati rendszer alapú megközelítés

4.1. Ismert kockázatértékelési módszer adaptálása

Az első megközelítésben egy olyan módszer adaptálását vetjük fel, amelyet már jelenleg is alkalmaznak, így annak alkalmasságát, kismértékű változtatását, más szempont szerinti használhatóságát elemezzük.

Jelenleg alkalmazott munkautasítás a földgázzállító vezetékek és védőcsöves műtárgyak üzemeltetési kockázatának meghatározása, amely tartalmazza a vezetékek besorolásának szabályait is. Ebben az utasításban a csővezetékek üzemeltetési kockázata a meghibásodás bekövetkezésének valószínűségét és a meghibásodás következményeit veszi figyelembe.

A meghibásodás bekövetkezésének valószínűségét kifejező szempontok azokhoz az elemekhez kapcsolódnak, amelyek a csővezetékek meghibásodását okozhatják:

- korróziós hibák miatti meghibásodások;
- harmadik fél által okozott és mechanikai hibák okozta meghibásodások;
- építési, gyártási és anyaghibák miatti meghibásodások.

A meghibásodás következményeit kifejező szempontok azon főbb következményeket veszik számba, amelyek a csővezeték esetleges meghibásodásakor felmerülhetnek:

- az emberi élet veszélyeztetettsége;
- gazdasági károk;
- a környezet veszélyeztetettsége.

Az egyes szempontok között logikai ÉS / VAGY kapcsolatok lehetnek, és a pontozásos értékelést ki kell egészíteni szöveges értékeléssel is.

Négy fő témakörbe sorolva (gépészet, katódvédelem, geodézia, rendszerirányítás), kockázati kategóriákat láthatunk az intelligens görénnyel nem vizsgált csővezetékekre. A kockázati kategóriákba sorolásnál az egyes értékelési szempontokon belül, az adott tényező veszélyességének megítélésére pontszámok szerepelnek. Ezekhez a pontszámokhoz a munkautasításban tényezők vannak rendelve, és az alapján egyértelműen eldönthető a pontszám szerinti besorolás.

Az intelligens görénnyel vizsgált vezeték esetében ugyanúgy pontozási rendszert találunk, de a szempontok itt változtak, a hibákat pontosabban leíró szempontok jelentek meg.

Az értékelés következő lépése a vezeték kockázati besorolása (VK). Mindkét típusú csővezeték esetében a műszaki jellemzők pontszáma (MK) és az üzemviteli jellemzők pontszáma (ÜK) alapján öt (5) műszaki kockázati kategória jön létre, az alacsony kockázati szinttől a kiemelt kockázati szintig (lásd 1. és 2. táblázatok). A besorolás számértékeiben van egy kis eltérés a két vezetéktípus értékelésében, de ez most számunkra nem lényeges.

1. táblázat. A műszaki kockázati besorolás.

Műszaki kockázatot kifejező kategória	Feltétel
I. kategória: Alacsony Kockázati Szint	$0 < MK < 150$
II. kategória: Kis Kockázati Szint	$150 \leq MK < 290$
III. kategória: Közepes Kockázati Szint	$290 \leq MK < 420$
IV. kategória: Nagy kockázati Szint	$420 \leq MK < 540$
V. kategória: Kiemelt kockázati Szint	$540 \leq MK$

2. táblázat. Üzemviteli kockázati besorolás.

Üzemviteli kockázatot kifejező kategória	Feltétel
I. kategória: Alacsony kockázatú	$\ddot{U}K = 0$
II. kategória: Kis üzemviteli kockázatú	$\ddot{U}K = 300$
III. kategória: Közepes üzemviteli kockázatú	$\ddot{U}K = 600$
IV. kategória: Nagy üzemviteli kockázatú	$\ddot{U}K = 900$
V. kategória: Kiemelt üzemviteli kockázatú	$\ddot{U}K = 1200$

Ezek után nézzük meg, hogy milyen információt nyújt ez az elemzés a potenciálisan veszélyes helyekről. Ehhez először a bemeneti információkat kell áttekintenünk.

- A DN 250-nél kisebb, intelligens görénnyel nem vizsgált csővezetékek esetében
 - Csővezeték életkora, üzemeltetési ideje;
- az intelligens görénnyel vizsgált csővezetékek esetében:
 - A csővezeték életkora, üzemeltetési ideje;
 - Gyártási és anyaghibák;

- Korróziós hibák.

Az információ érvényességi tartománya vezetékszakra vonatkozik, ami a csővezeték azon része, amely két görénykamra között, vagy pedig egy leágazási pont és a célállomás között helyezkedik el, ezazt km tartományt tehát nem tudunk megadni.

Az elemzéshez szükséges adatok: a vezetékszaksasz fellelhető dokumentációja és az általános intelligens görényes vizsgálat eredménye.

A felmerülő kérdések a következők.

- Mennyire teljes az intelligens görénnyel vizsgált vezetékszaksaszok adatainak mennyisége, a megfelelő adatainak rendelkezésre állása (kimutatható hibák típusa) az országos hálózatról és az mennyire naprakész a kockázati besorolások tekintetében?
- Amennyiben ez teljes és rendelkezésre áll (minden vezetékszaksaszra ismert a kockázati besorolás):
 - tudhatjuk, hogy a csővezeték életkora, üzemeltetési ideje, gyártási és anyaghibák, illetve korróziós hibák tekintetében a vezetékszaksasz (10 km, vagy 100 km) kis, vagy nagy kockázatú;
 - a potenciálisan kockázatos helyet azonban nem ismerjük, még ezen három tényező figyelembevételével sem, csak azt tudjuk, hogy melyik vezetékszaksasz érintett.

Továbbra is kérdés marad tehát, hogy hol van a potenciálisan veszélyes hely?

4.2. Bővített kockázatértékelési módszer

A pontosság javítása érdekében bővítettük a kockázatértékelést és a második típusú módszer esetében gyakorlati oldalról közelítettük meg a problémát, igazodva a magyarországi viszonyokhoz és a már alkalmazott előírásokhoz, utasításokhoz. Arra törekedtünk, hogy az értékelés ne legyen bonyolult, egy egyszerű sorrendbe-állítást tegyen lehetővé adott hosszúságú csőszakaszokon. Továbbá, amennyire lehet és amennyire rendelkezésre áll, vegye figyelembe a korábbi vizsgálati tapasztalatokat (intelligens görényes vizsgálatok, korábbi káresetek tapasztalatai). Valamint, a későbbiek során bővíthető legyen, mind a szempontrendszer, mind pedig annak az alkalmazási tartománya. A görényezési adatok pontosságát egyformának feltételezzük minden vizsgált szakaszon és vizsgált időpontban, illetve (és feltehetően) építünk arra, hogy a közeljövőben a vizsgált adatok száma növekedni fog.

Kérdéses, hogy rendelkezésre állnak-e a megfelelő adatok, mégpedig megfelelő pontossággal, a kockázati osztályok megfelelő besorolásához? Építhetünk-e a már meglévő kockázati értékelésekre, bővíthetők-e azok további adatokkal, esetleg az intelligens görényes jelentések újra áttekintésével, újra értékelésével?

A bővített kockázati értékelési rendszer értékelési szempontjai:

- Tervezési hibából eredő kockázati tényezők;
- Kivitelezési/építési folyamat kockázati tényezői;
- Üzem közbeni meghibásodás kockázati tényezői;
- A nem megfelelő/hiányos karbantartás miatti kockázati tényezők;
- Váratlan (természeti, harmadik fél általi) kockázati tényezők.

A bővített kockázati értékelési rendszer lehetséges érvényesítési helyei:

- Csőszelvény (csőtest), alapanyag és/vagy;
- Spirálvarrat, azonosított csőszelvényen és/vagy;
- Azonosított körvarrat és/vagy;
- Azonosított csőszelvény tartozék.

Az előző szempontok figyelembevételével a 3. ábrán látható bővített kockázatértékelési mátrixot dolgoztuk ki. A 3. ábra táblázatának fejlécében szerepelnek a vezetékszakasz jellemzői, és azon belül a négy főcsoport: a csőtest alapanyag, a spirálvarrat, a körvarrat, és a tartozékok, ezekből több is lehet egy-egy vezetékszakaszon, amelyek külön azonosítóval vannak ellátva. A táblázat bal oldalán szerepelnek az értékelési szempontok, az öt (I – V.) főcsoport, és azon belül a részletesebb kategóriák; a példában a 2. számú főcsoportot látjuk kibontva, abban látunk felsorolva részletes értékelési szempontokat. Ezeket az értékelési szempontokat kell részletesen kifejteni, illetve ezek nagyobbrészt már rendelkezésre is állhatnak, a Pipeline Defect Assessment Manual = PDAM (Anon., 2016) segítségével. A PDAM elsődleges fontosságú hibaként jelöli a sárgával jelölt hibákat, másodlagosként a zölddel jelölteket, aztán vannak harmadlagos hibák is, és vannak a PDAM szerint be nem sorolt hibák, ezek a fehér háttérűek. A szempontrendszer megalkotása során, ha olyan hiba is belekerül a szempontok közé, amely idáig még nem fordult elő, amiről nincs tapasztalat, akkor csak ennek az értékelését kell kidolgozni újként és részletesen, hiszen a többi hiba kiértékelése ismert és egyértelmű. A táblázatnak lesznek olyan részei, amelyek bizonyos helyeken nem relevánsak, például varrathiba a cső alapanyagban, ezeket nyilvánvalóan nem kell kitölteni, ezért szerepelnek áthúzva. Amikor az értékelés készen van, a táblázat alján összegzett pontszámot láthatunk (összérték), ahol a legnagyobb pontszám fogja jelenteni a legveszélyesebb helyet az adott vezetékszakaszon. Vagyis, itt egyértelműen azonosítani lehet a vezetékszakasz potenciálisan, lokálisan legveszélyesebb helyét.

A pontszámok alapján kockázati kategóriák itt is kijelölhetők, meg lehet adni, hogy mely kockázati pontszámnál kell már beavatkozni, melyiknél pedig még nem.

A módszer alkalmazásának segítségével a fellelhető legrészletesebb információt, az értékelhető kockázati tényezők legszélesebb körére kinyerhetjük a potenciálisan veszélyes helyekről. Az elemzés végén nyert információ a vezetékszakaszon belül egy-egy (megállapodás alapján) azonosított vezeték-rész.

Az elemzéshez szükséges adatok:

- vezetékszakasz fellelhető dokumentációja, papír alapon és elektronikusan;
- részletes, lehetőség szerint minél frissebb intelligens görényes vizsgálat eredménye;
- korábbi vezetékvizsgálatok tapasztalatai.

4.3. Gyorsított kockázati értékelési módszer



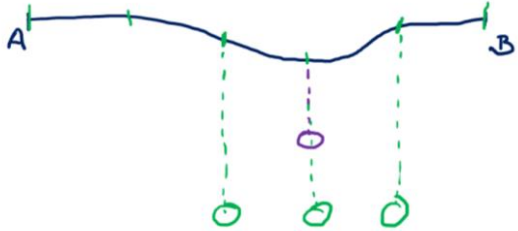
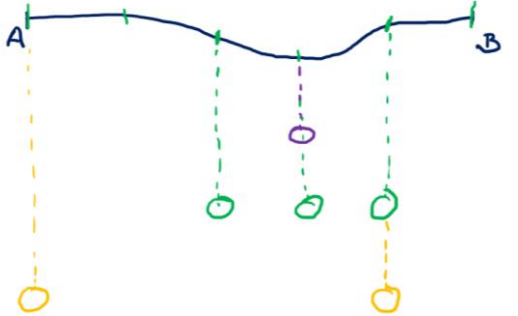
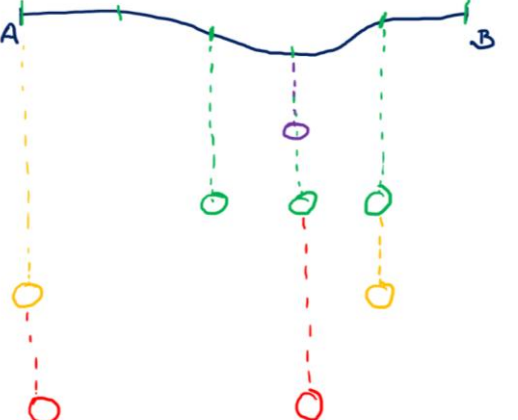
A gyorsított kockázati értékelési módszer lényege, hogy néhány, a potenciálisan veszélyes hely kijelölése szempontjából legfontosabb szempontot vesz figyelembe, amely alapján egyre kisebb tartományokra szűkül a potenciálisan veszélyes hely lokalizációja. Az értékelés vonatkozhat körvarratra, csőszálra, szerelvényre és védőcsőre egyaránt.

A módszer alkalmazásának sikere a megfelelő szempontok kiválasztásán és az azokra adható, megbízható válaszokon múlik.

A módszer alkalmazására, egy vizsgált csővezeték egy szakasza esetében mutat példát a 4. ábra. Az értékelés során egyszerű, eldöntendő kérdésekre kell választ adni. Az „igen” típusú válaszok lokális helyei jelölésre kerülnek a csőszakaszon, lásd a vázlatok különböző színeit. Ha egy kérdésre a válasz „nem”, akkor az adott kérdésre nem kerül ki újabb jelölő a vázlaton.

Értékelési szempont	Vezetékszakas helye, átmérője, hossza, azonosítási adatai									Összes érték
	Csőtest alapanyag		Spirál varrat		Körvarrat			Csőszál tartozékok		
	azonosító 1.	azonosító 2.	azonosító 1.	azonosító 2.	azonosító 1.	azonosító 2.	azonosító 3.	azonosító 1.	azonosító 2.	
I. Tervezési hibából eredő kockázati tényezők										szumma I. tétel
II. Kivitelezési/építési folyamat kockázati tényezői										szumma II. tétel
rálapolás (e)	1, 2, 3									
rétegesség (e)										
ovalítás (m)										
éleltolódás (m)										
excentricitás (m)										
szöghiba (m)										
ívégési hely (m)										
helyszínen hajlított ív (m)										
varrathiba										
falvatagság váltás										
illesztési hiba										
III. Üzem közbeni meghibásodás kockázati tényezői										szumma III. tétel
IV. A nem megfelelő/hiányos karbantartás miatti kockázati tényezők										szumma IV. tétel
V. Váratlan (természeti, harmadik fél általi) kockázati tényezők										szumma V. tétel
KOCKÁZATI TÉNYEZŐ ÉRTÉKE	összérték	összérték	összérték	összérték	összérték	összérték	összérték	összérték	összérték	szumma összérték

3. ábra. Egy lehetséges példa a bővített kockázatértékelési mátrixra.

Vázlat	Értékelési szempont
	<p>(A) szempont: az A-B vezetékszakasz csövé(ei)nek gyártási módja: hosszvarratos, spirálvarratos, varrat nélküli?</p>
	<p>(B) szempont: tartalmaz hajlított ívet a csőszakasz? <u>igen</u>, nem</p>
	<p>(C) szempont: van-e a hajlított ív környezetében körvarrat? <u>igen</u>, nem</p>
	<p>(D) szempont, a körvarratra: van falvastagság változás, a körvarrat két oldalán? <u>igen</u>, nem</p>
	<p>(E) szempont a körvarratra: van bármilyen hiba a körvarratban, vagy a hőhatás-övezetben? <u>igen</u>, nem</p>

4. ábra. A gyorsított kockázatértékelési módszer vázlata.

A kérdések csak mintaként szolgálnak, sem számuk, sem tartalmuk nem egy végleges módszer elemeit tükrözik vissza, csupán a módszer működését hivatottak bemutatni. Amennyiben ez a módszer kerül alkalmazásra, akkor a pontos szempontrendszer minden részletének kidolgozása szükséges.

Az elemzés végén jól láthatóan megjelennek lokálisan azok a helyek a vizsgált csőszakaszon belül, amelyek több tényező együttállásával potenciálisan veszélyes helyként szerepelhetnek, például a „lila”-, „zöld”-, „piros” karikákkal jelölt hely.

Ez a módszer nem veszi figyelembe az önmagában is veszélyes mértékű hibákat, hiszen, ha például a „zöld” karikával jellemzett helyen önmagában is veszélyes hibatípus jelenik meg, ezen elemzés alapján nem azt fogjuk a potenciálisan legveszélyesebb helynek tartani. Több hiba együttállásának elemzésére ez a módszer tökéletesen megfelel és – mellette – egyszerűen kivitelezhető.

A módszer, végeredményül, a legmeghatározóbb értékelési szempontok szerinti elemzés alapján ad információt a potenciálisan veszélyes helyekről. Az információ érvényességi tartománya a vezetékszszakaszon belül egy-egy azonosított vezetékreszre korlátozódik. A szempontrendszert megfelelően jól kell kidolgozni ahhoz, hogy a legszükségesebb és a legfontosabb kérdéseket tudjuk feltenni a vezetékszszakasszal, illetve vezetékreszekkel kapcsolatban.

Az elemzéshez szükséges adatok:

- vezetékszszakasz fellelhető dokumentációja;
- általános intelligens görényes vizsgálat eredménye, ha van;
- korábbi vezetékvizsgálatok tapasztalatai.

5. Összefoglalás

Jelen cikkben a gázszállító csővezetékek potenciálisan veszélyes helyeinek azonosítására vonatkozóan mutattunk be több módszert. A módszerek alkalmazásában közös, hogy a rendelkezésre álló gyártási, üzemeltetési és karbantartási (felügyeleti) adatok közül mindazokat felhasználják, amelyek elérhetők az értékelés pillanatában. További közös eleme a bemutatott módszereknek az, hogy kockázatértékelésen keresztül azonosítja az esetlegesen közeljövőben veszélyessé váló helyeket.

A módszerek között van olyan, amely egy jelenleg is alkalmazott kockázatértékelési módszer adatait használja, van olyan, amelyik ettől bővebb elemzést tesz lehetővé, és van egy gyorsított elemzési módszer is, amely csupán néhány kérdés megválaszolásával egy gyors értékelést tesz lehetővé. Az alkalmazás mindig attól függ, hogy éppen milyen szintű értékelésre van szükség, vagy mire van lehetőség és elegendő információ.

A potenciálisan veszélyes helyek azonosítását követően egy további feladat az egyes azonosított helyekhez tartozó, szükséges intézkedések meghatározása.

Irodalom

- [1] Ramírez-Camacho, J. G., Carbone, F., Pastor, E., Bubbico, R., Casal, J. (2017). Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning. *Safety Science*, 97, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.01.021>
- [2] Gabetta, G., Gori, G. (2011). *The use of knowledge management to improve pipeline safety*, Integrity of Pipelines Transporting Hydrocarbons, Springer, Dordrecht, pp. 1–16. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0588-3_1
- [3] Bolt, R. (2006). *Using or creating incident databases for natural gas transmission pipelines*. Report of study group 3.4, 23rd World Gas Conference, Amsterdam. <https://doi.org/10.1115/ipc2006-10619>

-
- [4] Castellanos, V., Albiter, A., Hernández, P., Barrera, G. (2011). Failure analysis expert system for onshore pipelines. Part–I: Structured database and knowledge acquisition, *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11085–11090. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.153>
- [5] Anon. (2018a). *Pipeline Failure Causes*. <https://www.phmsa.dot.gov/incident-reporting/accident-investigation-division/pipeline-failure-causes> (accessed 21 November 2022)
- [6] Anon. (2022). *Pipeline Incident 20 Year Trends*. <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends> (accessed 21 November 2022)
- [7] Anon. (2018b). *GAS PIPELINE INCIDENTS – 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016)*. <https://www.egig.eu/reports> (accessed 20 June 2019).
- [8] Biezma, M. V., Andrés, M. A., Agudo, D., Briz, E. (2020). Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. *Engineering Failure Analysis*, 110, 104446. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104446>
- [9] Anon. (2016). *PDAM: The Pipeline Defect Assessment Manual*, Penspen, 3 Water Lane, Richmond upon Thames, Surrey TW9 1TJ, 2016.

KÍSÉRLETI CSŐSZAKASZOK KÖRVARRATAINAK VIZSGÁLATA CIKLIKUS BELSŐ NYOMÁS ÉS STATIKUS KÜLSŐ HAJLÍTÁS EGYÜTTESE ESETÉN

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Ahmad Yasser Dakhel

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: yaser.dakhel@gmail.com

Absztrakt

A nagynyomású szénhidrogén-szállító csőtávvezetékek kritikus elemei gyakran a körvarratok, amelyek összetett terhelési körülmények között működnek. Kutatási munkánk és e dolgozat célja, hogy bemutassuk a teljes méretű csővezeték szakaszok fárasztó- és repesztővizsgálatait (full-scale tests), amelyek során ciklikus belső nyomást és statikus külső hajlítófeszültséget alkalmaztunk a körvarratokon, továbbá felhívjuk a figyelmet a vizsgálati eredmények fontosságára és alkalmazhatóságára. Egyedi vizsgálati rendszert építettünk a csővezeték szakaszok körvarratai komplex terhelés alatti viselkedésének tanulmányozására. A vizsgálatokat video kamerás felvételek, belső nyomás vs. repesztővizsgálati idő függvények és tönkremeneteli nyomás adatok segítségével értékeltük.

Kulcsszavak: *gázszállító csőtávvezeték, teljes méretű szerkezet vizsgálata, körvarrat, komplex terhelés*

Abstract

The critical elements of high-pressure hydrocarbon transporting pipelines are often the girth welds, which are operated under complex loading conditions. The aims of our research work and this paper are to introduce our full-scale pipeline fatigue and burst tests applying cyclic internal pressure and superimposed static external bending stress on girth welds, furthermore, attracting the importance and the applicability of the investigation results. A unique testing system was built to study the behaviour of pipeline girth welds under simultaneous loads. The tests were evaluated using video camera recordings, internal pressure vs. burst time functions and failure pressure values.

Keywords: *gas transporting pipeline, full-scale test, girth weld, complex loading condition*

1. Bevezetés

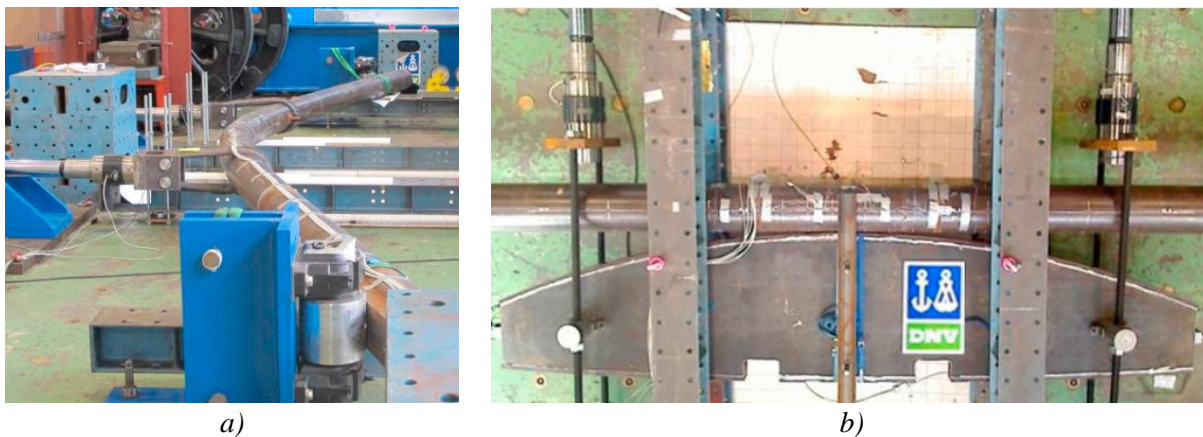
Egy üzemelő szerkezet vagy szerkezeti elem integritásának a megítélése összetett feladat (Lukács et al., 2012). Önmagában a fogalom tartalma már következtetni enged erre a komplexitására: az üzemeltetésre való alkalmasság az élettartam bármely pillanatában. A gyakorlati problémák és feladatok átlátása egyrészt elméleti tudást, másrészt szerkezet specifikus ismeretek meglétét,

harmadrészt pedig releváns kísérleti munkát igényel, illetve tételez fel (Koncsik, 2019; Koncsik, 2021). A szerkezet specifikus ismeretek magukba foglalják a tervezési, a technológiai és az üzemeltetési – benne karbantartási – tárgyköröket egyaránt.

A nagynyomású csővezetékeket világszerte különböző közegek (például szénhidrogének, víz) szállítására használják. Ezek a csőrendszerek nagyszámú körvarratot tartalmaznak, amelyeket már a tervezési szakaszban értékelni kell a fáradási ellenállásuk megítélése érdekében. Az ismétlődő üzemi események, a belső nyomásértékek változásai, továbbá a külső behatások ciklikus terhelést eredményeznek az egyes csőszakaszokon, amelyek szignifikáns hatást gyakorolnak a körvarratok élettartamára. Sajnos, a csővezetékek építése során nem ritka, hogy olyan külső hatások érik a csőszakaszokat, amelyek túlzott hajlítófeszültségeket eredményeznek a körvarratokban. A terhelések együttese és a körvarratokban előforduló eltérések és/vagy hibák terjedő repedésekhez vezethetnek, amelyek később, hosszabb üzemeltetési időszak után, katasztrofális töréseket okozhatnak.

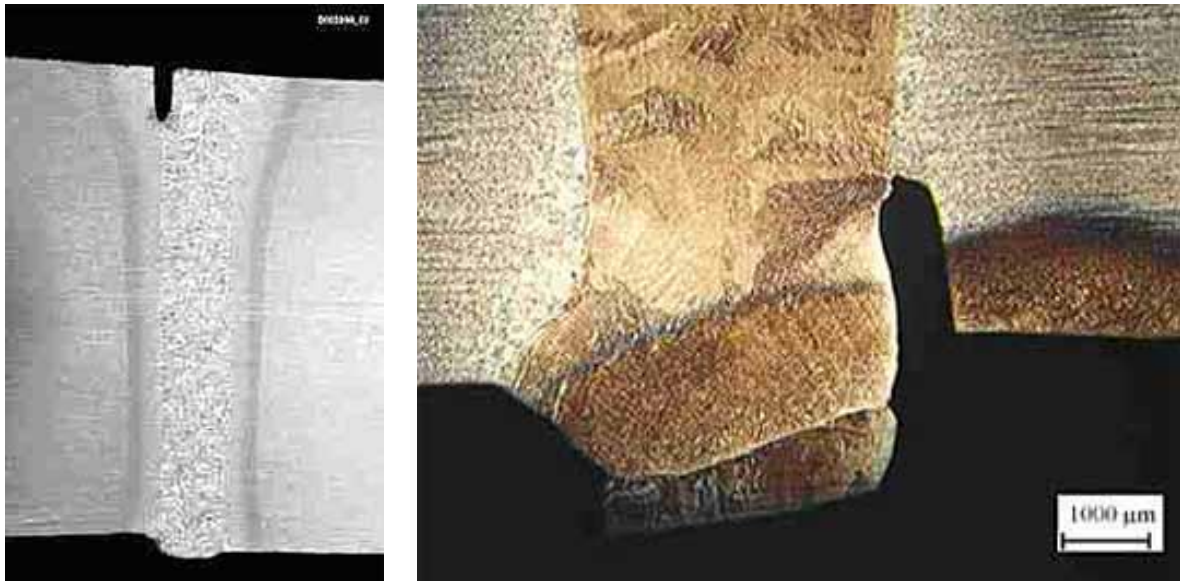
A különböző szerkezeti elemek, illetve szerkezetek integritása megítélésének egyik, méghozzá igen költséges eszköze a szerkezeti elemeken, illetve a teljes szerkezeteken végzett vizsgálatok (*full-scale tests*) (Marsh, 1988). Nincs ez másképp a belső nyomással terhelt szerkezetek esetében sem (Keller, 1990), a ráfordítások gyakorlatilag minden esetben meghozzák a kívánt eredményt: kézben tartható kockázat és élettartam, biztonságos üzemeltetés, becsülhető maradó élettartam, prognosztizálható vizsgálatok és beavatkozások.

Teljes méretű csőszakaszok vizsgálatára különböző megoldások használatosak. Nagy átmérőjű csövek négypontos hajlítóvizsgálatára és csévélvizsgálatára mutat példát az 1. ábra, amelyen azonos vizsgáló rendszert és egy-egy vizsgálat közbeni csőszakaszt figyelhetünk meg (Bastola et al., 2016). Hasonló elrendezésű vizsgálatokról további közlemények is beszámolnak (Spinelli et al., 2012; van Es et al., 2016).



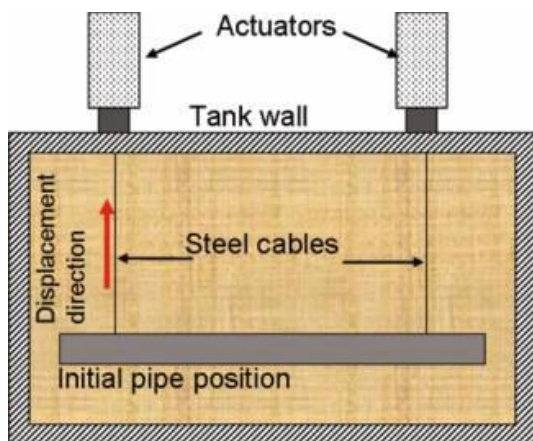
1. ábra. Teljes méretű csőszakaszok vizsgálata:
a) négypontos hajlítóvizsgálat, b) csévélvizsgálat (Bastola et al., 2016).

Tekintettel arra, hogy a csőtávvezetékek körvarratai gyakran tartalmaznak a hegesztés-technológiából eredő eltéréseket, illetve érhetik azokat külső behatások (sérülések) a kivitelezés és az üzemeltetés során, a teljes méretű csőszakasz vizsgálatok tervezésekor és megvalósításakor bemetszések (mesterséges hibák) alkalmazása is járatos. Ilyen bemetszésekre láthatunk példákat a 2. ábrán (Pisarski et al., 2004), és hasonló bemetszések vizsgálatát további publikációk is ismertetik (például (Bastola et al., 2016)).



2. ábra. Bemetszések elektronsugaras hegesztéssel készült körvarratokban (Pisarski et al., 2004).

A talaj által közvetített, illetve a talaj mozgásából eredő terhelések hatásait vizsgálták hajlító igénybevétel (Mahdavi et al., 2013), illetve nyíró igénybevétel (Rofooei et al., 2012) esetén, ezúttal is belső nyomás alkalmazása nélkül. A kísérleti elrendezéseket a 3. ábra szemlélteti. A közúti közlekedésből származó terhelések vizsgálata kevésbé jellemző a szénhidrogén-szállító acél csővezetékek esetében, sokkal gyakoribb a betonból készült víz, illetve szennyvíz vezetékekénél (Rakitin et al., 2013; Fang et al., 2019).



a)



b)

3. ábra. A talaj által közvetített, illetve a talaj mozgásából eredő terhelések csővezeték szakaszokra gyakorolt hatásának vizsgálata:

a) hajlító igénybevétel (Mahdavi et al., 2013), b) nyíró igénybevétel (Rofooei et al., 2012).

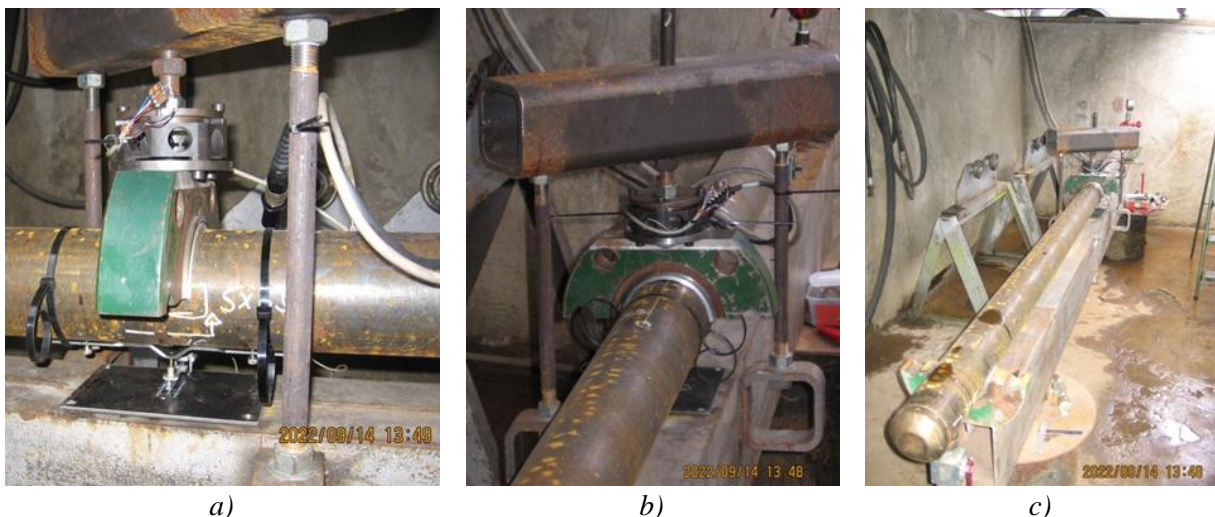
A kutatás és jelen cikk célja, hogy bemutassuk a ciklikus belső nyomással és statikus külső hajlítófeszültséggel terhelt, körvarratokat tartalmazó teljes méretű csővezeték szakaszok fárasztó- és

repszóvizsgálatait (*full-scale tests*), továbbá, hogy felhívjuk a figyelmet a vizsgálati eredmények fontosságára és alkalmazhatóságára.

2. Vizsgálati körülmények

A teljes méretű, névlegesen 4 m hosszú csővezeték szakaszok P355NH jelű acélból készültek, névleges átmérőjük 114,3 mm (DN100) névleges falvastagságuk pedig 5,6 mm volt. A vizsgált körvarratokat bevont elektródás kézi ívhegesztéssel készítették, és vizuális (VT), folyadékbehatolásos (PT), valamint radiográfiai (RT) vizsgálatokkal ellenőrizték. Csak elfogadható minőségben előállított körvarratokat vizsgálatára került sor. Ez azt is jelentette, hogy a körvarratok egyenletesen jó minősége lehetővé tette az egyéb befolyásoló tényezők károsodási jellemzőkre gyakorolt hatásának vizsgálatát.

A csővezeték szakaszok ciklikus belső nyomással és statikus külső hajlítással történő komplex terhelésére egyedülálló vizsgálati rendszert fejlesztettünk ki. A hárompontos hajlítási elrendezésben a vizsgált körvarrat a csővezeték szakasz közepén helyezkedett el; a hajlító terhelést egy erőmérő cellán keresztül állítottuk be, és egy lehajlás mérővel ellenőriztük. A kísérleti elrendezést a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Kísérleti elrendezés csővezeték szakaszok ciklikus belső nyomással és statikus külső hajlítással történő komplex terhelésére: a) az erőmérő cella és a lehajlást mérő extenzométer, b) a statikus hajlító terhelés átadása, c) a teljes kísérleti csőszakasz.

A vizsgálatok első szakaszában öt teljes méretű csővezeték szakaszt (Y_i , $i = 1, \dots, 5$) vizsgáltunk. Az első csővezeték szakaszon (Y_1) csak repesztóvizsgálatot végeztünk, fárasztóvizsgálat és statikus külső hajlító terhelés nélkül. A második és a harmadik csővezeték szakaszon (Y_2 és Y_3) 100 000 ciklus belső nyomás (fárasztóvizsgálat) után végeztünk repesztóvizsgálatot, még mindig statikus külső hajlító terhelés nélkül. A ciklikus belső nyomás az üzemi nyomás (64 bar) 60%-a és 100%-a között változott. A negyedik és ötödik csővezeték szakaszon (Y_4 és Y_5) statikus külső hajlító terhelést alkalmaztunk, a ciklikus belső nyomás (100 000 ciklus) és a repesztóvizsgálat során egyaránt. A hajlításból eredő feszültség a maximális belső nyomásból eredő axiális feszültség kétszerese ($2 \cdot \sigma_a$) volt.

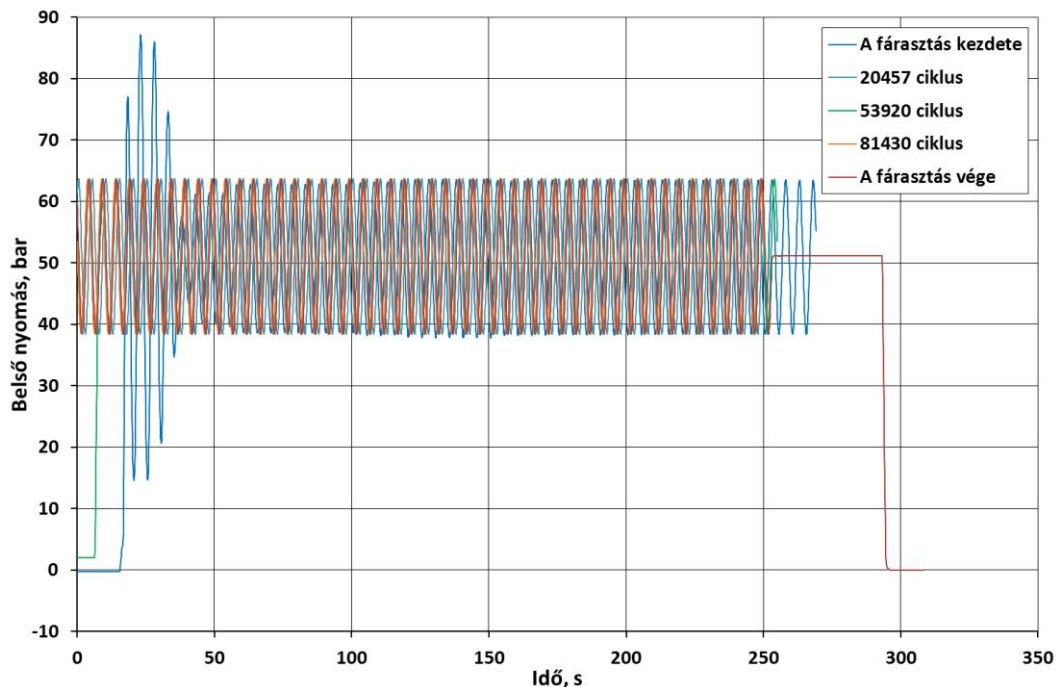
A fárasztóvizsgálatok során, ahol az alkalmazott frekvencia $f = 0,2$ Hz volt, a belső nyomás és a lehajlás értékének változását folyamatosan figyeltük. Ezeket az értékeket 5000-8000 ciklusonként rögzítettük, 50-60 fárasztási ciklus idő intervallumban (250-300 s). A repesztóvizsgálat folyamatát

három oldalról, video kamerákkal vettük fel, a belső nyomásérték változását pedig másodpercenként gyűjtöttük. A fárasztóvizsgálatok után a vizsgált körvarratok radiográfiai vizsgálatát (RT) ismét elvégeztük, majd 6 óra időtartamú szilárdsági nyomáspróbára került sor. A fárasztó- és a repesztővizsgálatok, valamint a szilárdsági nyomáspróba során belső vizsgálati közegként vizet használtunk.

3. Vizsgálati eredmények

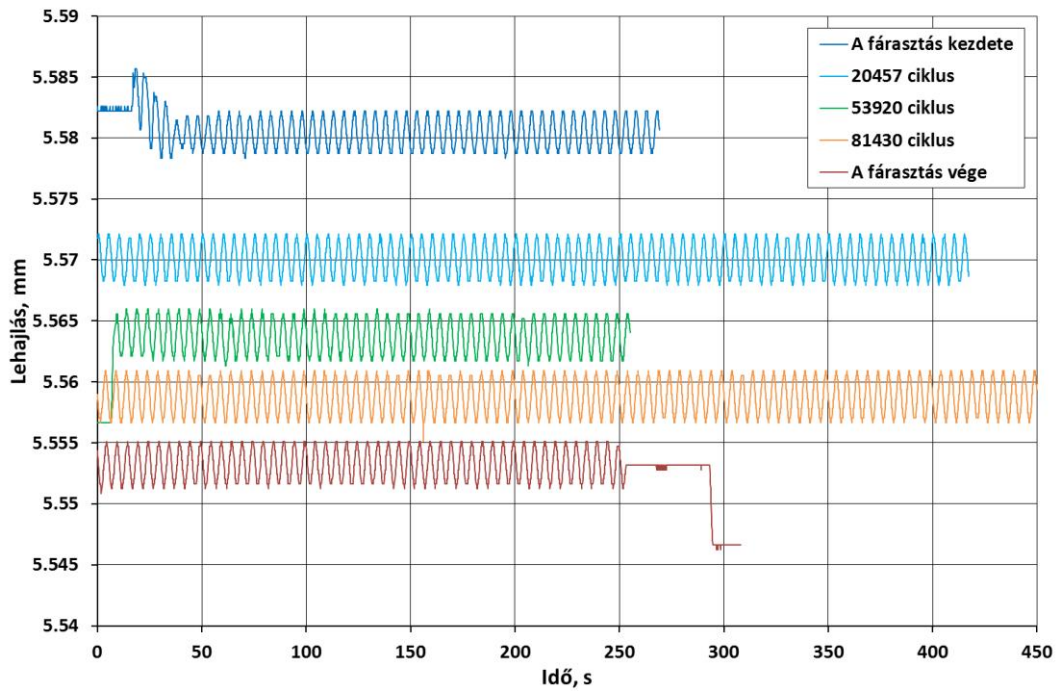
A fárasztóvizsgálatok előtt és után elvégzett radiográfiai vizsgálatok (RT) felvételei egyik kísérleti csőszakasz esetében sem mutattak különbségeket, a körvarratok sem a ciklikus igénybevétel, sem a komplex igénybevétel hatására nem károsodtak. A szilárdsági nyomáspróbát mind az öt kísérleti csőszakasz nyomáscsökkenés nélkül viselte el.

Az Y4 jelű vizsgálati csőszakasz fárasztóvizsgálata során rögzített nyomás-idő függvényeket az 5. ábra, lehajlás-idő függvényeket pedig a 6. ábra szemlélteti. Az ábrákon feltüntetett ciklusszámok az egyes mintavételek kezdetéhez tartozó ciklusszámokat jelentik.

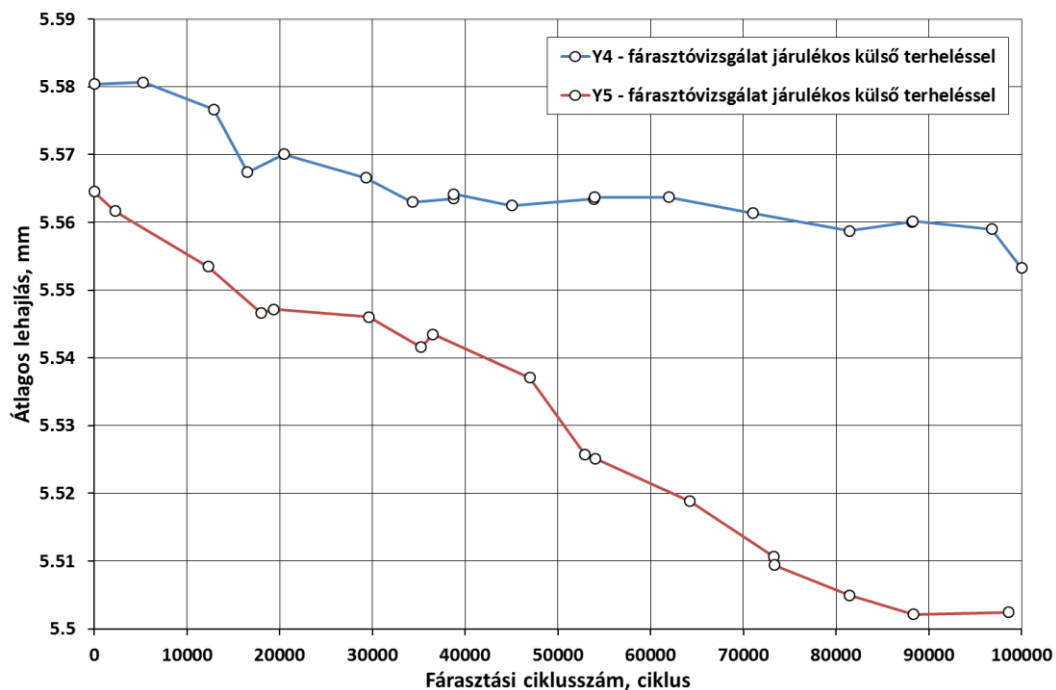


5. ábra. Az Y4 jelű vizsgálati csőszakasz fárasztóvizsgálata során rögzített lehajlás-idő függvények.

Az 5. ábra – a kezdeti tranzienstől eltekintve – a nyomásváltozás stabilitását mutatja. (Ezt azért is hangsúlyozzuk, mert a 100 000 ciklus végrehajtásának idő igénye közel hat teljes nap (közel 139 óra) volt.) A 6. ábra lehajlás-idő függvényeiben egyrészt mind a belső nyomás változása, mind a nyomásváltozás stabilitása visszatükröződik, másrészt pedig a lehajlás változások igen kismértékű (mikrométeres nagyságrendű) csökkenése figyelhető meg. A 7. ábra bemutatja az Y4 és az Y5 vizsgálati csőszakaszok átlagos lehajlás értékeinek változását a fárasztási ciklusszám függvényében. A vízszintes tengelyen ábrázolt ciklusszám ezúttal is az egyes mintavételek kezdetéhez tartozó ciklusszámokat jelenti. Az ábra a két csőszakasz (Y4 és Y5) jellegében azonos viselkedését mutatja.



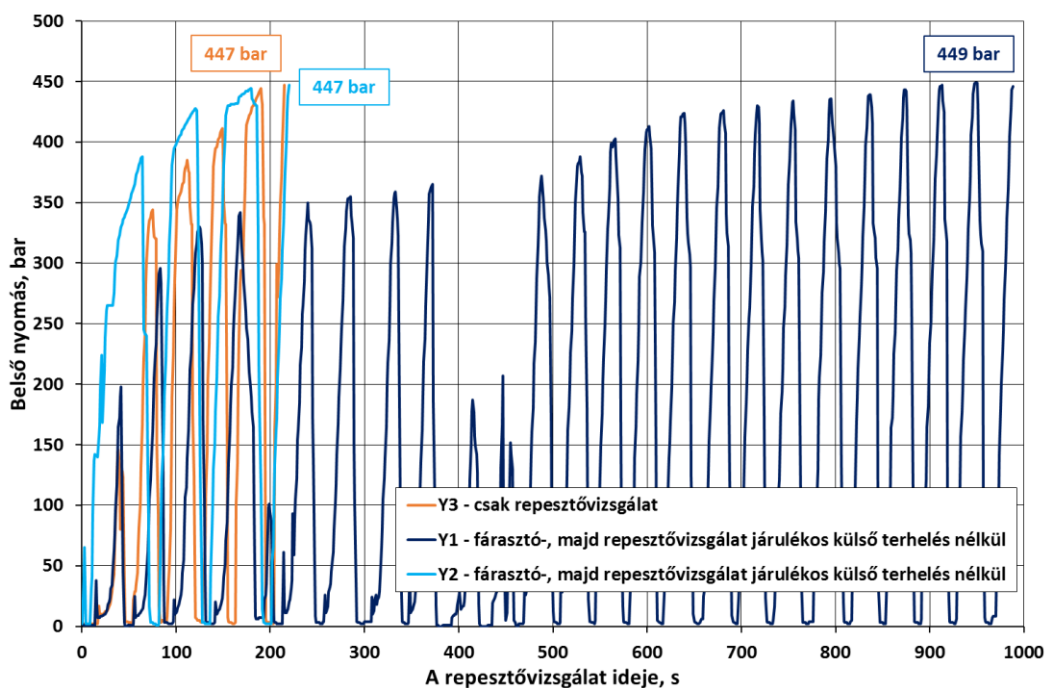
6. ábra. Az Y4 jelű vizsgálati csőszakasz fárasztóvizsgálata során rögzített nyomás-idő függvények.



7. ábra. Az Y4 és az Y5 jelű vizsgálati csőszakaszok fárasztóvizsgálata során mért átlagos lehajlás értékek.

A repesztővizsgálatok befejezése után a video kamerák felvételeit áttekintettük és a tönkremenetel pillanatának megfelelő képkockákat kivágtuk, továbbá, a belső nyomás - repesztővizsgálati idő függvényeket a rögzített belső nyomás értékek felhasználásával ábrázoltuk.

A 8. ábra a statikus külső hajlító terhelés nélküli vizsgált csővezeték szakaszok (Y3, Y1 és Y2) belső nyomás - repesztővizsgálati idő diagramjait mutatja, ahol a számok az egyes kísérleti csőszakaszok tönkremeneteli nyomás értékeit (a repesztési nyomásokat) jelzik. A diagramok nyomáseséses részei a csővezeték szakaszok térfogatgyűlését mutatják; a csökkenő nyomású időszakok alatt a vizsgálati rendszer a külső vízhálózatból vizet vett fel. A 9. ábra a statikus külső hajlítás nélkül vizsgált csővezeték szakaszokat mutatja, a meghibásodásuk pillanatában. A képeken jól látható, hogy a víz hatalmas erővel tört ki a hasadási területen keresztül.

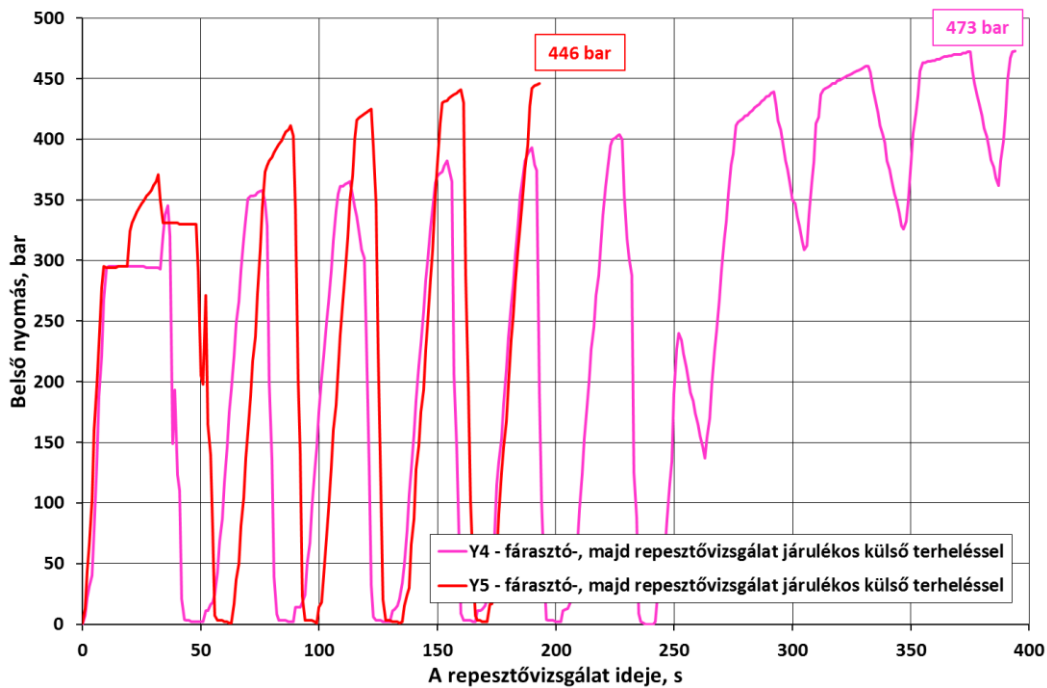


8. ábra. A statikus külső hajlító terhelés nélküli vizsgált csővezeték szakaszok (Y3, Y1 és Y2) belső nyomás - repesztővizsgálati idő diagramjai, a repesztési nyomás értékekkel.



9. ábra. A statikus külső hajlítás nélkül vizsgált csővezeték szakaszok a meghibásodásuk pillanatában: a) Y3 csőszakasz, b) Y1 csőszakasz, c) Y2 csőszakasz.

A 10. ábra a statikus külső hajlító terheléssel vizsgált csővezeték szakaszok (Y4 és Y5) belső nyomás - repesztővizsgálati idő diagramjait mutatja, ahol a számok ezúttal is az egyes kísérleti csőszakaszokhoz tartozó tönkremeneteli nyomás értékeket (a repesztési nyomásokat) jelzik. A 11. ábrán ugyanezen csővezeték szakaszokat láthatjuk, a meghibásodásuk pillanatában.



10. ábra. A statikus külső hajlító terheléssel vizsgált csővezeték szakaszok (Y4 és Y5) belső nyomás - repesztővizsgálati idő diagramjai, a repesztési nyomás értékekkel.



a)



b)

11. ábra. A statikus külső hajlító terheléssel vizsgált csővezeték szakaszok a meghibásodásuk pillanatában: a) Y4 csőszakasz, b) Y5 csőszakasz.

Összehasonlítva a 8. és a 10. ábrákat, valamint a 9. és a 11. ábrákat megállapítható, hogy a nyomásváltozások és a tönkremenetek jellegzetességei megegyeztek a statikus külső hajlító terhelés nélkül és a statikus külső hajlító terheléssel vizsgált esetekre. Az ábrák alapján megállapítható, hogy

mind az öt vizsgált kísérleti csőszakasz (Y_i , $i = 1, \dots, 5$) tönkremenetele a cső palástfelületének felhasadásával következett be, a tönkremeneteli nyomás értékek jelentősen meghaladták a megengedett üzemi nyomás értékeket és azok nem különböztek jelentősen egymástól.

4. Összefoglalás, következtetések

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján a következő összegző jellegű megállapítások tehetők, illetve következtetések fogalmazhatók meg.

- A kifejlesztett vizsgálati rendszer alkalmas a ciklikus belső nyomásnak és a statikus külső hajlításnak egyszerre kitett, teljes méretű csővezeték szakaszok vizsgálatára.
- A teljes méretű csőszakaszokon elvégzett vizsgálatok igazolták a megfelelő minőségben előállított körvarratok nagy teherbíró képességét.
- A vizsgált csővezeték szakaszok meghibásodása hasonlóan, de egyik esetben sem a körvarratban következett be, minden esetben a megengedett üzemi nyomásnál lényegesen nagyobb tönkremeneteli nyomásokkal.
- Sem a ciklikus terhelés, sem a ciklikus terhelés és az alkalmazott külső hajlító terhelés (ebben a nagyságrendben) nem befolyásolta szignifikánsan a kísérleti csővezeték szakaszok tönkremenetelét ($Y1$ és $Y2$ vs. $Y4$ és $Y5$).
- A vizsgálatok igazolták, hogy a megfelelő minőségben elkészített körvarratok jelentős (szilárdsági) tartalékkal rendelkeznek, amely a csőtávvezetékek üzemeltetése során – megfelelő körültekintéssel és a biztonsági szempontok szem előtt tartásával – figyelembe vehető. Ennek, különösen a kritikusan gondolt csőtávvezeték szakaszok rehabilitációja esetén, fokozott jelentősége lehet.
- További teljes méretű csőszakaszokon elvégzendő vizsgálatokra van szükség; mind a külső hajlításból eredő nagyobb axiális feszültségek mellett, mind pedig a csővezeték szakasz húzó hajlítófeszültségi oldalán mesterséges körvarrat-hibák (bemetszések) alkalmazásával. A nagyobb axiális feszültségek a lehetséges többlet terhelések szélesebb tartományban való modellezését, a mesterséges hibák pedig a körvarratokon előforduló eltérések/hibák (szegélybeégés, egyenetlen varratfelület, mechanikai sérülés) modellezését szolgálják.
- A hidrogénnek a földgázszállító rendszerbe történő tervezett bekeverése okán (Anon., 2021), középtávon, hasonló vizsgálatokat kell végezni hidrogénnek kitett csőszakaszokon.

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

Szerzők külön köszönetüket fejezik ki Dr. Török Imre címzetes egyetemi tanárnak a nagy időigényű kísérleti munka megvalósításához nyújtott segítségével.

A kísérleti körvarratok radiográfiai vizsgálatait (RT) a fárasztóvizsgálatok előtt és után az Albera'97 Kft. végezte.

Irodalom

- [1] Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., Koritárné Fótos, R., Kuzselláné Koncsik, Zs. (2012). *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*. Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [2] Koncsik, Zs. (2019). A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9(4), 63-71. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.5>

- [3] Koncsik, Zs. (2021). Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11(2), 372-379. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.49>
- [4] Marsh, K. J. (Ed.) (1988). *Full-Scale Fatigue Testing of Components and Structures*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04089-3>
- [5] Keller, H. P. (1990). *Bruchmechanik druckbeanspruchter Bauteile*. Verlag TÜV Rheinland, München-Wien-Köln.
- [6] Bastola, A., Wang, J., Shitamoto, H., Mirzaee-Sisan, A., Hamada, M., Hisamune, N. (2016). Full- and small-scale tests on strain capacity of X80 seamless pipes. *Procedia Structural Integrity*, 2, 1894-1903. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.238>
- [7] Spinelli, C. M., Prandi, L. (2012). *High Grade Steel Pipeline for Long Distance Projects at Intermediate Pressure*. 7th Pipeline Technology Conference (ptc), Hannover, 28-30 March, 2012.
- [8] van Es, S. H. J., Gresnigt, A. M., Vasilikis, D., Karamanos, S. A. (2016). Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes – Part I: Experiments. *Thin-Walled Structures*, 102, 286-304. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.11.024>
- [9] Pisarski, H., Punshon, C. (2004). *Integrity of Reduced Pressure Electron Beam Girth Welds for Deep Water Pipelines*. Paper: Pipe 24, 4th International Pipeline Technology Conference, Ostend, May 2004. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/integrity-of-reduced-pressure-electron-beam-girth-welds-for-deep-water-pipelines-may-2004>
- [10] Mahdavi, H., Kenny, S., Phillips, R., Popescu, R. (2013). Significance of geotechnical loads on local buckling response of buried pipelines with respect to conventional practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 68-80. <https://doi.org/10.1139/cgj-2011-0423>
- [11] Rofooei, F. R., Jalali, H. H., Attari, N. K. A., Alavi, M. (2012). *Full-Scale Laboratory Testing of Buried Pipelines Subjected to Permanent Ground Displacement Caused by Reverse Faulting*. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE), Lisbon, 24-28 September, 2012, pp. 1-10.
- [12] Rakitin, B., Xu, M. (2013). Centrifuge modeling of large-diameter underground pipes subjected to heavy traffic loads. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 353-368. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0253>
- [13] Fang, H., Yang, K., Li, B., Tan, P., Wang, F., Du, X. (2019). Experimental and Numerical Study on Mechanical Analysis of Buried Corroded Concrete Pipes under Static Traffic Loads. *Applied Sciences*, 9, 5002. <https://doi.org/10.3390/app9235002>
- [14] Anon. (2021). *Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája – Stratégia a tiszta hidrogén és hidrogéntechológiák hazai bevezetésére és a hidrogénipar háttérbázisának megteremtésére*. <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>

ADATBÁZIS KONCEPCIÓ KÍSÉRLETI CSŐSZAKASZOK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSÁRA

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Koncsik Zsuzsanna

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Török Imre

Címzetes egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metti@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A szénhidrogénszállító csőtávvezetékek meghibásodási adatait több nemzetközi szervezet gyűjti és elemzi, azok különböző feldolgozásai rendszeresen megjelennek. Az alapvető cél a csőtávvezetékek biztonságos üzemeltetésének növelése. A káresetek és az elemzések között külön figyelmet fordítanak a vezetékek körvarrataira. Mivel az elmúlt évtizedekben nagy számban végeztünk teljes méretű, körvarratokat tartalmazó csőszakaszokon fárasztó- és repesztővizsgálatokat, ezért felvetődött a vizsgálati eredmények adatbázisba foglalásának igénye. Jelen közleményben bemutatjuk a tervezett adatbázis koncepcióját és kitérünk annak alkalmazási lehetőségeire.

Kulcsszavak: *gázszállító csőtávvezeték, teljes méretű szerkezet vizsgálata, körvarrat, adatbázis*

Abstract

Failure data on hydro-carbon transporting pipelines are collected and analysed by several international organisations and regularly published in various formats. The basic objective is to improve the safe operation of pipelines. Among the damage incidents and analyses, special attention is paid to pipeline girth welds. Since a large number of fatigue and burst tests have been carried out on full-scale pipeline sections with girth welds in the past decades, the need to compile the test results in a database has arisen. In this paper, the concept of the proposed database is presented and its potential applications are discussed.

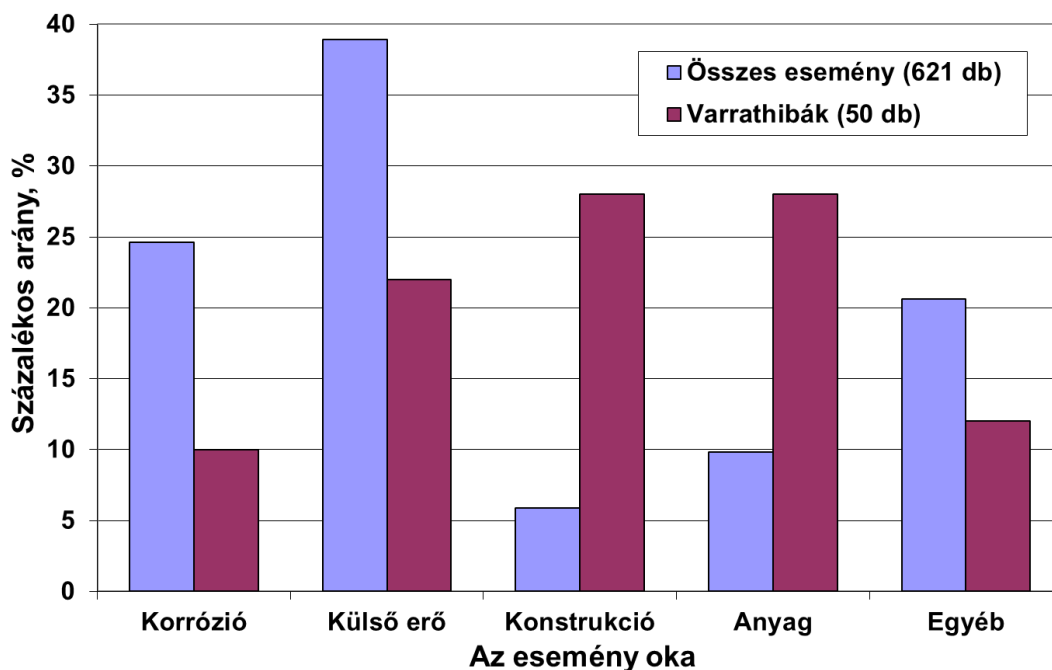
Keywords: *gas transporting pipeline, full-scale test, girth weld, database*

1. Bevezetés

A szénhidrogénszállító csőtávvezetékek meghibásodásai mindig következményekkel, nem ritkán igen súlyos következményekkel járó, nem kívánt események. Az egyes káresetek okainak megismerése,

statisztikai jellegzetességeinek feltárása és egy következő, nem kívánt esemény megelőzése érdekében több nemzetközi szervezet gyűjti és elemzi ezeket a káreseteket (például (Anon., 2018a); (Anon., 2018b); (Anon., 2022)). Szemben a nemzeti sajátosságokkal, a nemzetközi szervezetek felé történő adatszolgáltatás önkéntes, az üzemeltetők mégis gyakran élnek a lehetőséggel. Az elemzéseknek, illetve azok karakterisztikus adatainak később különböző feldolgozásai is megjelennek (például (Eiber et al., 1992); (Vieth et al., 1996); (Lam, 2015), lehetőséget adva az összehasonlításokra, illetve a közép- és hosszú távú tendenciák megállapítására. Az alapvető szándék és cél minden esetben egyértelmű: egymás tapasztalatainak megismerése, azokon keresztül pedig a csőtávvezetékek biztonságos üzemeltetésének a növelése.

A káresetek és az elemzések között külön figyelmet fordítanak a vezetékek körvarrataira, egyrészt számosságuk miatt, másrészt elkészítésük sajátosságai miatt (terepi varratok), harmadrészt pedig a nem kívánt események kiváltó okaiban tapasztalható eltérések miatt. Ez utóbbira mutat példát az 1. ábra (Eiber et al., 1992).



1. ábra. Csőtávvezetéseken bekövetkezett káresetek megoszlása (Eiber et al., 1992).

A körvarratokra vonatkozó irányelvek (például (Anon., 2014)) kidolgozásának fontos elemei a körvarratokat tartalmazó, teljes méretű csőszakaszokon (*full-scale tests*) végzett vizsgálatok, illetve az azokhoz kapcsolódó számítások (Nagy et al., 2005; Chován et al., 2013). Tekintettel arra, hogy az elmúlt évtizedekben viszonylag nagy számban végezhetünk teljes méretű, körvarratokat tartalmazó csőszakaszokon fárasztó- és repesztővizsgálatokat (Lukács et al., 2008; Lukács et al., 2012; Lukács et al., 2022), felvetődött a vizsgálatok alapadatai és eredményei adatbázisba foglalásának igénye és szükségessége.

Jelen közleményben bemutatjuk a tervezett adatbázis koncepcióját és kitérünk annak alkalmazási lehetőségeire.

2. Az adatbázis felépítése és adattartalma

Az adatbázisba kerülő adatokat csoportosítva, keletkezésükkel, illetve rendelkezésre állásukkal összhangban adjuk meg. A következő táblázatok egy-egy, logikailag összetartozó adatsoportot reprezentálnak:

- alapegység adatok (1. táblázat);
- vezeték adatok (2. táblázat);
- a vizsgálati varrat adatai (3. táblázat);
- az intelligens csőgörényes vizsgálat adatai (4. táblázat);
- a járulékos terhelésre vonatkozó adatok (5. táblázat);
- a fárasztóvizsgálat adatai (6. táblázat);
- a fárasztóvizsgálat után elvégzett szilárdsági nyomáspróba adatai (7. táblázat);
- a repesztővizsgálat adatai (8. táblázat);
- az edényfenék körvarrat adatai (9. táblázat);
- a vizsgálati jelentés adatai (10. táblázat).

Az adatok között vannak olyanok, amelyek közvetlenül hozzáférhetők, így közvetlenül bevihetők az adatbázisba, de vannak olyanok is, amelyeket – azok bevétele előtt – valamilyen más dokumentumból (például vizsgálati jegyzőkönyv) kell kiolvasni, illetve adatfile-okból (például mérési eredmények) kell megszerkeszteni. Abban az esetben, ha valamelyik adat intelligens csőgörényes vizsgálatból származik, és az adott vezetéken több alkalommal került sor ilyen vizsgálatra, akkor mindig az utolsó vizsgálati jelentésben található adat épül be az adatbázisba.

Mint az adatbázisok többségénél, így jelen esetben is, lehetnek – és biztosan lesznek is – üres mezők, vagy azért, mert a vonatkozó adat nem áll rendelkezésre, vagy azért, mert az adat logikailag nem lehetséges.

Az egyenként bemutatásra kerülő táblázatok tartalma alapján megállapítható, hogy az adatbázis a számszaki és a szöveges adatok mellett, vizsgálati jegyzőkönyveket, jelentéseket, rajzokat, diagramokat, fényképeket és video felvételeket egyaránt tartalmaz.

1. táblázat. Az „Alapegység” adatok felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
Vezeték	az adott csőtávvezetéken lévő körvarrat jele	nem kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat
Kísérleti csőszakasz	a vizsgált kísérleti csőszakasz jele	kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat
Jelenlegi hely	vizsgálati év-az adott csőtávvezetéken lévő körvarrat jele <u>VAGY</u> vizsgálati év-a vizsgált kísérleti csőszakasz jele	az adat kötőjel előtti része a vizsgálat éve, az adat kötőjel utáni része az előző két adat egyike

Az 1. táblázat első sorában szerepel a „Vezeték” megnevezésű adat, amely „az adott csőtávvezetéken lévő körvarrat jele”; a később bemutatásra kerülő 4. táblázat első sorában pedig a „Varratszám” megnevezésű adatot találjuk. A két adat lehet különböző – a jel és a szám megnevezés erre utal –, de lehet azonos is, ez utóbbi azonban nem szükségszerű, még akkor sem, ha sor került a vezeték intelligens görényes vizsgálatára.

2. táblázat. A „Vezeték adatok” felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
A vezeték neve		a csőtávvezeték üzemeltetőjénél használt elnevezés VAGY „kísérleti csőszakasz”
Névleges átmérő	DNXXX	
Átmérő [mm]		külső átmérő
Falvastagság No1 [mm]		
Falvastagság No2 [mm]		ha nincs falvastagság változás, a körvarrat két oldalán, akkor megegyezik „Falvastagság No1” értékével
Anyagminőség No1		a „Falvastagság No1”-hez tartozó anyagminőség
Anyagminőség No2		a „Falvastagság No2”-höz tartozó anyagminőség, amely akkor is lehetséges, ha a két falvastagság egyező értékű volt
Engedélyezési nyomás [bar]		

3. táblázat. „A vizsgálati varrat adatai”-nak felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
Vizsgálati varrat károsodás azonosító	1 VAGY 0	abban az esetben, ha a teljes méretű csőszakasz vizsgálata során a vizsgálati varrat károsodik, akkor az értéke „1”, függetlenül attól, hogy a károsodás a fárasztóvizsgálat, a nyomáspróba, illetve a repesztővizsgálat alatt következik be
A körvarrat készítésének ideje	YYYY/MM/DD	
A körvarrat kiváltásának ideje	YYYY/MM/DD	nem kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat
A körvarrat kiváltásának oka		nem kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat
A körvarrat üzemideje [év]		nem kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat
Az üzemelés helye	a csőtávvezeték üzemeltetője által szükségesnek és/vagy alkalmasnak tartott geodéziai koordináták	nem kiváltott körvarratból felépülő kísérleti csőszakasz esetén itt nincs adat

„A körvarrat készítésének ideje” megnevezésű adat egészen más tartalommal bír abban az esetben, ha kiváltott körvarratról beszélünk, mint akkor, ha vizsgálati céllal készült körvarratról.

4. táblázat. Az „Intelligens csőgörényes vizsgálat adatai”-nak felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
Varratszám		
Névleges falvastagság [mm]		
Óra pozíció	HH:MM	
Hosszúság [mm]		
Maximális mélység [%]		az adat a tényleges falvastagság százalékában értendő
Átlagos mélység [%]		az adat a tényleges falvastagság százalékában értendő
Elhelyezkedés a felületen	INT <u>VAGY</u> EXT	belső felületen (INT) VAGY külső felületen (EXT)
Elhelyezkedési osztály		varraton, amelynek jelentése $\pm 2A$, ahol $A = \max\{\text{falvastagság}, 10 \text{ mm}\}$ (W) VAGY varrathoz közel, amelynek jelentése $\pm 2A-250 \text{ mm}$, ahol $A = \max\{\text{falvastagság}, 10 \text{ mm}\}$ (C) VAGY hegesztett kötésben (J)

A 4. táblázatban szereplő adatok tartalma és/vagy értelmezése (Megjegyzés oszlop) – az intelligens csőgörényes vizsgálat elvégzésének az időpontjától és/vagy a vizsgálatot végző képességeitől függően – különböző lehet. A vizsgáló eszközök és az értékelési technikák folyamatos fejlesztései során jelentős áttörés következett be az eltérések (hibák) azonosítása, elhelyezkedésének és méreteinek a meghatározása területén. A táblázatban feltüntetett sajátosságok egy elfogadott és használt nemzetközi gyakorlaton, a szénhidrogénszállító csőtávvezetéseket üzemeltetők – köztük az FGSZ Földgázszállító Zrt. – szakmai szervezetének (Pipeline Operators Forum = POF, <https://pipelineoperators.org/>) a gyakorlatán (Anon., 2021; Anon. 2020) alapulnak. Ezért nincs értelme a korábban, alacsonyabb fejlettségi szintű eszközzel meghatározott eredmények adatbázisban való rögzítésének.

5. táblázat. A „Járulékos terhelés” adatok felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
Járulékos terhelés azonosító	1 <u>VAGY</u> 0	abban az esetben, ha a teljes méretű csőszakasz vizsgálata során van járulékos terhelés, akkor az értéke „1”, ha nincs, akkor az értéke „0”
A járulékos terhelés által okozott többlet feszültség típusa a vizsgálati varraton	hajlító <u>VAGY</u> csavaró	
A járulékos terhelés által okozott feszültség a vizsgálati varraton [MPa]		

Az adatbázis felépítése jelenleg nem teszi lehetővé olyan vizsgálatok rögzítését, amelyekben járulékos hajlító és csavaró igénybevétel együttes alkalmazására kerül sor. Az ilyen igénybevétel kísérleti megvalósítása, ebben a mérettartományban, meglehetősen bonyolult és költséges feladat.

6. táblázat. A „Fárasztóvizsgálat” adatok felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
A fárasztóvizsgálat kezdő napja	YYYY/MM/DD	
A fárasztóvizsgálat befejező napja	YYYY/MM/DD	
A fárasztóvizsgálat előtt elvégzett szemrevételezéses vizsgálat (VT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	szemrevételezéses vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)
A fárasztóvizsgálat előtt elvégzett radiográfiai vizsgálat (RT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	radiográfiai vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)
A csőszakasz rajza	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	
A csőszakasz fényképe	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	
A vizsgálati nyomás minimális értéke [bar]		
A vizsgálati nyomás maximális értéke [bar]		
Fárasztási nyomás-idő függvény	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	
Fárasztási ciklusszám [ciklus]		
Fárasztási frekvencia [Hz]		
A fárasztóvizsgálat után elvégzett szemrevételezéses vizsgálat (VT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	szemrevételezéses vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)
A fárasztóvizsgálat után elvégzett radiográfiai vizsgálat (RT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	radiográfiai vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)

Abban az esetben, ha a vizsgálati varratban az eltérések száma több mint hat, akkor a hat legveszélyesebb eltérés adatait kell rögzíteni. Abban az esetben, ha a fárasztóvizsgálat előtt és után elvégzett roncsolásmentes vizsgálatok eredményei eltérnek, akkor külön elemzést is kell végezni.

7. táblázat. A „Szilárdsági nyomáspróba” adatainak felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
A szilárdsági nyomáspróba időpontja	YYYY/MM/DD	
Hőmérséklet [°C]		
Nyomás [bar]		
Időtartam [óra]		
Észlelés	rövid, szöveges értékelés – M <u>VAGY</u> NM	legfeljebb 250 karakter, szóközzel, amelyben a károsodás helyének – ha az releváns –, mindenképpen szerepelnie kell; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	a nyomáspróba során károsodott csőszakasz képe; file feltöltésére akkor kerül sor, ha a nyomáspróba eredménye nem megfelelő (NM)

Abban az esetben, ha a vizsgált csőszakasz a nyomáspróba végrehajtása alatt károsodott, akkor repesztővizsgálatra már nem kerül sor, ezért a „Repesztővizsgálat” alatt „N/A” adatok szerepelnek. Ennek, mint megjegyzésnek a 8. táblázatba foglalásától, a könnyebb érthetőség és a felesleges ismétlések elkerülése érdekében eltekintünk.

8. táblázat. A „Repesztővizsgálat” adatainak felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
A repesztővizsgálat időpontja	YYYY/MM/DD	
A vizsgálat során készült video felvételek	file nevek (három (3) file feltöltésének lehetősége)	a három video kamera által, a vizsgálat során készített felvételek
Nyomás-idő függvény („rejtett” adatokból szerkesztett függvény)	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	
Vízfelvétel-idő függvény („rejtett” adatokból szerkesztett függvény)	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	
Tönkrementeli nyomás [bar]		
A tönkrementel helye	vizsgált körvarrat <u>VAGY</u> edényfenék körvarrat <u>VAGY</u> nem körvarrat	abban az esetben, ha a tönkrementel helye edényfenék körvarrat, akkor az a körvarrat is bekerül az adatbázisba
A csőszakaszcól készült fényképek	file nevek (öt (5) file feltöltésének lehetősége)	
Észlelés: a tönkrementel és/vagy a tönkrementeli hely jellemzése	rövid, szöveges értékelés <u>VAGY</u> N/A	legfeljebb 250 karakter, szóközzel; abban az esetben, ha a tönkrementel helye edényfenék körvarrat, illetve nem körvarrat, akkor itt N/A szerepel

Abban az esetben, ha a károsodott körvarrat nem a vizsgálati varrat, hanem edényfenék körvarrat, akkor a 9. táblázat szerinti adatok is bekerülnek az adatbázisba. Ennek oka kettős: egyrészt a kísérleti csőszakasz vizsgálata mindenképpen tönkremenetellel zárul, másrészt az edényfenék körvarrat is egy körvarrat, vagyis az adatbázis egésze szempontjából értékes információkat hordoz.

9. táblázat. Az „Edényfenék körvarrat” adatainak felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
Edényfenék körvarrat károsodás azonosító	1 <u>VAGY</u> 0	abban az esetben, ha edényfenék körvarrat károsodik, akkor az értéke „1”, függetlenül attól, hogy a károsodás a fázasztóvizsgálat, a nyomáspróba, illetve a repesztóvizsgálat alatt következik be
Az edényfenék körvarrat elkészítésének ideje	YYYY/MM/DD	
Az edényfenék anyagminősége		
Az edényfenék átmérője [mm]		külső átmérő
Az edényfenék falvastagsága [mm]		
A fázasztóvizsgálat előtt elvégzett szemrevételezéses vizsgálat (VT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	szemrevételezéses vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)
A fázasztóvizsgálat előtt elvégzett radiográfiai vizsgálat (RT) eredményei („rejtett” adatok)	eltérés kód No1 – M <u>VAGY</u> NM eltérés kód No2 – M <u>VAGY</u> NM ...	legfeljebb hat eltérés bevitelle lehetséges; M jelentése: MEGFELELŐ, NM jelentése: NEM MEGFELELŐ
	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	radiográfiai vizsgálati jegyzőkönyv (a „rejtett” adatok forrása)
Észlelés: a tönkremenetel és/vagy a tönkremeneteli hely jellemzése	rövid, szöveges értékelés	legfeljebb 250 karakter, szóközzel

Az adatbázisba kerülő adatok alapja egy-egy, kísérleti csőszakaszonként készült jelentés, amely tartalmazza az összes, írásos vagy nyomtatható formájú forrásban összefoglalt adatot. Ezt mutatja a 10. táblázat.

10. táblázat. A „Vizsgálati jelentés” adat felépítése és tartalma.

Megnevezés	Adat	Megjegyzés
A kísérleti csőszakasz vizsgálatáról készült jelentés	file név (egy (1) file feltöltésének lehetősége)	az írásos (nyomtatható formájú) jelentés értelemszerűen nem tartalmaz video felvételeket

Az edényfenék körvarrat adatai esetében – kiindulva abból az alaphipotézisből, hogy a tönkremenetel nem az edényfenék körvarratban következik be –, a fásasztóvizsgálat után sem szemrevételezéses (VT), sem radiográfiai (RT) vizsgálatra nem kerül sor, ezért ilyen adatok sem a 9. táblázatban, sem az adatbázisban nem szerepelnek.

3. Keresés az adatbázisban

Az adatbázisban való kereséséhez – tekintettel arra, hogy annak adattartalma viszonylag lassan bővíthető, illetve bővül – az első fázisban csupán egyszerű szempontokat javasolunk.

A javasolt keresési szempontok a következők:

- névleges átmérő, DNXXX (2. táblázat);
- anyagminőség, és abban az esetben, ha a kritériumnak akár az „Anyagminőség No1”, akár az „Anyagminőség No2” adat megfelel, akkor a rekord kiválasztásra kerül (2. táblázat);
- engedélyezési nyomás (2. táblázat);
- vizsgálati varrat károsodás azonosító, 1 VAGY 0 (3. táblázat);
- üzemidő (3. táblázat);
- járulékos terhelés azonosító, 1 VAGY 0 (5. táblázat);
- járulékos terhelés típus, hajlító VAGY csavaró (5. táblázat);
- radiográfiai vizsgálati (RT) eredmények a fásasztóvizsgálat előtt („rejtett” adatok), eltérés kód (6. táblázat);
- a repesztóvizsgálat során mért tönkremeneteli nyomás (8. táblázat);
- edényfenék körvarrat károsodás azonosító, 1 VAGY 0.

A keresés eredménye táblázatos formában kerül megjelenítésre. A táblázat egy-egy sora tartalmazza az összes keresési szempont szerinti adatokat, függetlenül attól, hogy a keresés melyik szempont szerint történt.

4. Alkalmazási lehetőségek

Az előző pontokban összefoglalt tartalmak többfelhasználós online adatbázisba (lekérdező felület) integrálhatók, amely a következő sajátosságokkal bír:

- tartalmazza a kiváltott csőszakaszokból készített kísérleti csőszakaszokon elvégzett vizsgálatok eredményeit;
- tartalmazza a teljes méretű csőszakasz vizsgálata céljából készített kísérleti csőszakaszokon elvégzett vizsgálatok eredményeit;
- lehetőséget biztosít a belső nyomáson kívüli többlet terheléssel vizsgálatra kerülő kísérleti csőszakaszokon elvégzett vizsgálatok eredményeinek integrálására;
- lehetőséget biztosít a korábbiakban, különféle kísérleti csőszakaszokon elvégzett vizsgálatok eredményeinek integrálására, legyenek azok saját vagy irodalmi forrásokból feldolgozható vizsgálatok;
- keresési funkciók segítségével információkat szolgáltat az aktuális döntések előkészítéséhez, illetve meghozatalához.

Irodalom

- [1] Anon. (2018a). *Pipeline Failure Causes*. <https://www.phmsa.dot.gov/incident-reporting/accident-investigation-division/pipeline-failure-causes> (Letöltés időpontja: 2022. november 21.)

- [2] Anon. (2018b). *GAS PIPELINE INCIDENTS – 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016)*. <https://www.egig.eu/reports> (Letöltés időpontja: 2019. június 20.)
- [3] Anon. (2022). *Pipeline Incident 20 Year Trends*. <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends> (Letöltés időpontja: 2022. november 21.)
- [4] Eiber, R. J., Jones, D. J. (1992). *An analysis of reportable incidents for natural gas transmission and gathering lines, June 1984 through 1990*. Technical Report NG-18/200, Battelle, Columbus, OH. <https://www.osti.gov/biblio/6779900>
- [5] Vieth, P. H., Roytman, I., Mesloh, R. E., Kiefner, J. F. (1996). *Analysis of DOT reportable incidents for gas transmission and gathering pipelines -- January 1, 1985 through December 31, 1994*. Technical report AGA-97003169, American Gas Association, Inc., Arlington, VA. <https://www.osti.gov/biblio/441673>
- [6] Lam, C., Zhou, W. (2016). Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 145, 2016, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.06.003>
- [7] Anon. (2014). *EPRG Guidelines on the Assessment of defects in transmission pipeline girth welds – Revision 2014*. European Pipeline Research Group e.V. https://www.eprg.net/fileadmin/EPRG_public/eprg-docs/guidelines/EPRG_Weld_Defect_guidelines.pdf (Letöltés időpontja: 2022. június 26.)
- [8] Nagy, Gy., Lukács, J., Török, I. (2005). Assessment of Methods in Girth Welds of Steel Pipelines. *Materials Science Forum*, 473-474, 243-248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.243>
- [9] Chován, P., Lukács, J. (2013). Structural Integrity of Damaged Steel Pipelines – Integrity Improving Using External and Internal Reinforcing. In K. Jármái, & J. Farkas (Eds.) *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures* (1st ed., pp. 607-614). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36691-8_90
- [10] *Polimer mátrixú kompozittal erősített hibrid csövek integritása: GVOP-3.1.1.-2004-05-0215/3.0* (2008). J. Lukács (Ed.). Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc.
- [11] Lukács, J.; Nagy, Gy.; Harmati, I.; Koritárné, F. R.; Kuzselláné, K. Zs. (2012). *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*. J. Lukács (Ed.). Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [12] Lukács, J., Koncsik, Zs., Chován, P. (2022). Integrity increasing of damaged transporting pipelines using fiber reinforced polymer composite wrap systems, *Engineering Failure Analysis*, 137, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106284>
- [13] Anon. (2021). *Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. Standard Practice, POF 100, November 2021*. Pipeline Operators Forum. <https://pipelineoperators.org/cdn/276341a3-f5e6-49cf-9897-de6ab41bdd5a/POF%20100%20Specifications%20and%20requirements%20for%20ILI%20-%20Nov%202021.pdf> (Letöltés időpontja: 2022. november 29.)
- [14] Anon. (2020). *Specifications and requirements for Universal POF Template (UPT) data format for in-line inspection of pipelines. Standard Practice, POF 110, November 2020 Amended November 2021*. Pipeline Operators Forum. <https://pipelineoperators.org/cdn/d8fcde8-d2de-47bd-a5b3-a66833b992be/POF%20110%20Specifications%20and%20requirements%20for%20UPT%20data%20format%20-%20Nov%202021.pdf> (Letöltés időpontja: 2022. november 29.)

A MIKROBIOLÓGIAI KORRÓZIÓ KIALAKULÁSA ÉS JELENTŐSÉGE

Kovács Judit

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkjudit@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A korrózió és azon belül a mikrobiológiai korrózió gyakori problémát okoz a különböző szerkezetekben és rendszerekben, ezért az elmúlt évtizedekben a különböző folyamatok vizsgálata a kutatók részéről kiemelt figyelmet kapott. Mivel szinte bármilyen környezetben előfordulhat a legtöbb szerkezetet érinti a probléma. A mikroorganizmusok megváltoztatják az elektrokémiai reakciókat ezáltal befolyásolják a korróziós folyamatot, ezért a különböző mikroorganizmusok és az általuk kiváltott folyamatok megismerése fontos lépés a probléma megfelelő kezelése érdekében. Jelen cikkben a különböző mikroorganizmusok jellemzése, a korróziós folyamatok és eltérő fémek esetén a korrózió hatása került összegzésre.

Kulcsszavak: mikrobiológiai korrózió, mikroorganizmusok, MIC mechanizmusok

Abstract

Corrosion, and microbially influenced corrosion is a common problem in various structures and systems, therefore the study of different processes has received special attention from the researchers in the last decades. Since it can occur in almost any environment, most structures are affected. Microorganisms can change the electrochemical reactions and thus influence the corrosion process, therefore knowledge of the different microorganisms and the processes they induce is an important step to properly manage the problem. In this article, the description of the different microorganisms, the corrosion processes and the effect of corrosion on different metals are summarized.

Keywords: microbially influenced corrosion, microorganisms, MIC mechanisms

1. Bevezetés

A károsodások alapvető formái – az alakváltozás, a törés, a korrózió, a kopás és a leromlás – közül egy vagy több köthető egy-egy iparághoz és/vagy szerkezethez, szerkezeti elemhez. A jellemző károsodási forma (formák) és az ahhoz tartozó károsodási mechanizmus(ok) alapvetően befolyásolják a szerkezetek integritását, illetve élettartamát (Lukács et al, 2012). A belső nyomással terhelt szerkezeti elemek, a csövek, a nyomástartó edények stb., élettartamának becslése, várható és/vagy maradó élettartamának meghosszabbítása, vagy csak egyszerűen annak kézbentartása, műszaki és gazdasági jelentőségű (Lukács, 2005; Koncsik, 2019; Koncsik, 2021).

A korrózió számos fémszerkezetben gyakori problémát jelent, mert a különböző szerkezetek, rendszerek, gépek stb. meghibásodásához vezet, ezáltal életveszélyt, valamint anyag-, költség-, és idővesztést okoz (Al-Sultani et al., 2021). A korrózió mindig is kulcsfontosságú probléma volt az

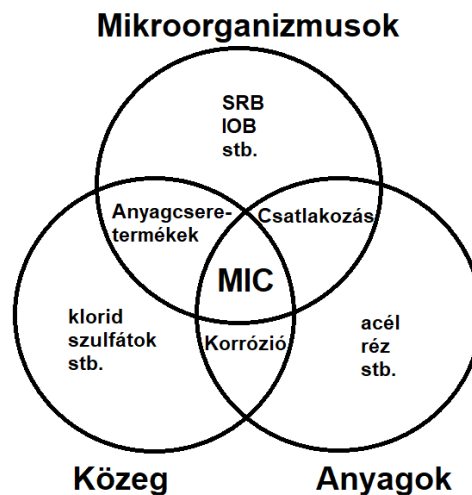
olaj- és gáziparban. Előfordulása ezen iparág minden területén megfigyelhető (Khan et al., 2021; Taleb-Berrouane et al., 2018). Ezekben az iparágakban a korrózió különböző formáit azonosították, mint például a feszültségkorróziós repedés (SCC = Stress Corrosion Cracking), korróziós fáradás, magas hőmérsékletű korrózió, H₂S okozta korrózió stb. A korrózió formáinak vizsgálata során kiderült, hogy a korrózió mikroorganizmusokból és a rendszerben végzett mikrobiológiai tevékenységekből is eredhet; ezt mikrobiológiai (eredetű) korrózióknak (MIC = microbologically influenced corrosion / microbially induced corrosion) nevezik (Videla, 2001).

Bár a MIC-ről szóló első jelentések már az 1900-as évek elején megjelentek, kialakulásának mechanizmusát csak az 1960-as évek elején kezdték el vizsgálni. A különböző folyamatok megfelelő megértése azonban hosszú időt igényelt, mivel a tudásátadás nem volt megfelelő a különböző kutatási területek, illetve azok szakemberei között. A MIC problémakör az elmúlt évtizedekben ismét széleskörű figyelmet kapott a kutatók körében (Videla, 2001; Wei et al., 2022). Mivel a jelentések alapján a működő olajkutakban a korrózió több mint 75%-át, a csővezetékrendszerekben, pedig a meghibásodások több mint 20%-át a MIC okozta (Khan et al., 2021; Wang et al., 2022). Az infrastruktúra előregedésével a kérdés még inkább kiemelt jelentőségűvé válik az olaj- és gázipar számára (Harmon, 2018). Mivel minden környezetben (például tengervíz, talaj, légkör) előfordulhat, a legtöbb szerkezet érintett (Liping et al., 2013). A MIC megtalálható hőcserélőkben, tartályokban, csövekben, erőművekben, acélművekben, papírgyárakban stb. (Little et al., 2020, Keith et al., 2021).

A MIC által okozott károsodás nem csak a fémeket, hanem számos más anyagot, köztük a polimereket, a betont és az üveget is érinti (Critchley et al., 2004). Bizonyos környezetek kedvezőnek tekinthetők a mikroorganizmusok túléléséhez és így a MIC-hez. A MIC gyakran megfigyelhető alacsony áramlási sebességű, stagnáló környezetben, megszakított működés során vagy például a csővezetékek "holtágai" esetén. A MIC általában 80 °C alatti hőmérsékleten és 10 alatti pH-szint mellett fordul elő. Ezek a feltételek optimálisak a mikroorganizmusok széles körének a növekedéséhez. A MIC olyan területeken is megfigyelhető, amelyek szerves anyagokat és törmelékeket tartalmaznak, amelyek tápanyagot és menedéket nyújthatnak a mikrobáknak (Critchley et al., 2004).

A MIC nem egy különálló korróziós forma, hanem inkább a mikroorganizmusok szinergikus kölcsönhatása. Nem önmagában hat a fém korróziójára, hanem inkább a mikrobiológiai élettevékenységek eredménye, amelyek a fém korróziós elektrokémiai folyamatára hatnak a mikrokörnyezetben; a pH, az oldott oxigén, valamint a szerves és a szervetlen vegyületek változásai révén (Liping et al., 2013). A mikrobák megváltoztatják az elektrokémiai reakciókat és gátolják, vagy felgyorsítják a fém korróziós folyamatát (Kiana et al., 2014). Jelenlétük általában felgyorsítja a legtöbb korróziós formát a folyamat során létrejött elektrokémiai reakciók révén (Lane, 2005). A különböző reakcióktól függően, közvetlenül vagy közvetve befolyásolhatják a korróziót (Little et al., 2020).

A mikroorganizmusok részvétele számos sajátosságot vezet be a korróziós folyamatba. Először is figyelembe kell venni, hogy az eredetileg kétkomponensű rendszer háromkomponensű rendszerré alakul, ezért vizsgálata során a reakcióban résztvevő három elem közötti kölcsönhatást kell figyelembe venni (1. ábra), mivel a MIC *"olyan elektrokémiai folyamat, amelyben a mikroorganizmusok képesek a korróziós reakciót elindítani, elősegíteni és felgyorsítani a rendszert alkotó három komponens – az anyag, a közeg és a mikroorganizmusok – kölcsönhatása révén"* (Khan et al., 2021). A MIC ott jelentkezik, ahol a mikroorganizmusok, a közeg és az anyagok hatása átfedésben van (Little et al., 2020).



1. ábra. A mikroorganizmusok, a közeg és az anyagok hatása (SRB = szulfátsökkentő baktériumok, IOB = vas oxidáló baktériumok) (Little et al., 2020 alapján).

A mikroorganizmusok több tulajdonságának szinergikus hatása következtében, mint például a nagy növekedési sebességük, az anyagcsere-termékeik széles választéka és a nagy felület/térfogat arányuk, nagyon aktív mikrobiológiai részvételre kell számítani a korróziós folyamatban (Videla, 2001). A legtöbb esetben a MIC morfológiák lokalizált korróziós típusok (például lyukkorrózió, réskorrózió stb.) formájában jelentkeznek (AlAbbas et al., 2013).

2. Baktériumok típusai, jellemző mikroorganizmusok

Mikroorganizmusok évmilliárdok óta léteznek, és hihetetlenül zord környezetben és rendkívül kedvezőtlen körülmények között is képesek élni. A planktonikus állapotban lévő mikroorganizmusok szabadon lebegnek a levegőben vagy vizes környezetben. Ellenállnak a durva vegyi anyagoknak, beleértve a savakat, az alkoholokat és a fertőtlenítőszereket, és ellenállnak a kiszáradásnak, a fagyásnak és a forrásnak. Egyes spórák több száz évig is képesek fennmaradni, majd kicsírázni, amint ahhoz kedvező feltételek állnak fenn (Lane, 2005). A mikroorganizmusok rendkívül változatos táplálékforrásokat hasznosítanak, és az anyagcserejük során keletkező melléktermékek némelyike károsíthatja az anyagokat. A helyhez kötött állapotban lévő mikroorganizmusok azok, amelyek egy felületre tapadtak, és védőhártyát alakítottak ki, amelyeket együttesen biofilmnek neveznek. Az anyagok felületén, vagy az anyagokkal közvetlenül érintkező helyek környezetben létrejött biofilm MIC-t eredményezhet (Larsen, 2020), és ha a MIC egyszer már megtelepedett egy rendszerben, szinte lehetetlen megszüntetni, és rövid időn belül komoly és tartós működési problémákat okozhat (Harmon, 2018).

A mikroorganizmusok képesek gyorsan szaporodni, egyesek akár 18 perc alatt megduplázódnak. A mikroorganizmusok emellett hidrogént is termelhetnek, amely szintén károsíthatja a fémeket (Kiana et al., 2014). Ha nem kezelik őket, gyorsan megtelepedhetnek különböző (például álló vizes) környezetben, és potenciálisan egy rendkívül aktív korróziós sejtet hozhatnak létre (Lane, 2005). A biofilmek számos vegyi anyaggal szemben ellenállóak a védőmembránnak (amely véd a mérgező vegyi anyagoktól, de átengedi a tápanyagokat (Kiana et al., 2014)) és a különböző vegyületek lebontására szolgáló képességüknek köszönhetően. Jelentősen ellenállóak a biocidokkal (a mikroorganizmusok

elpusztítására használt vegyi anyagokkal) szemben. Egyes baktériumok még a korróziógátlókat, például az alifás aminokat és a nitriteket is lebontják, csökkentve ezzel az inhibitor korróziógátló képességét (Lane, 2005). A korróziót okozó mikroorganizmusok elpusztítására és szaporodásuk megakadályozására a csővezeték-üzemeltetők biocideket és egyéb kémiai kezeléseket alkalmaznak, azonban a fémfelületen növekvő mikroorganizmusokra vonatkozó pontos információk nélkül a biocid kezelések gyakran hatástalanok, mivel a kezelések nem célzottan alkalmazhatók (Harmon, 2018).

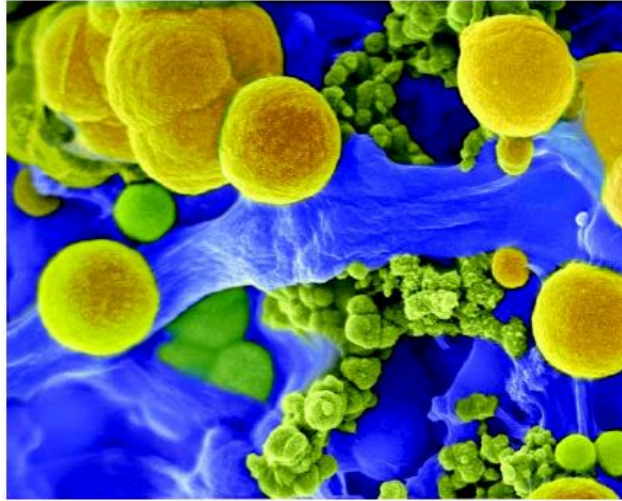
A mikroorganizmusok sokféleképpen osztályozhatók, beleértve a sejtszerkezetüket, morfológiájukat, energiaforrásukat és oxigénigényüket (Critchley et al., 2004). A korróziót befolyásoló mikroorganizmusok között vannak különböző algák, gombák és baktériumok (Kiana et al., 2014). Az algák szinte minden vízi környezetben megtalálhatók, az édesvíztől kezdve a nagy sótartalmú vizig. Fény jelenlétében oxigént termelnek (fotoszintézis), sötétben pedig oxigént vesznek fel. Az oxigén elérhetősége a sósvízi környezetben a fémek korróziójának egyik fő tényezőjének bizonyult. Az algák 0 °C és 40 °C közötti hőmérsékleten és 5,5 és 9,0 közötti pH-szinten élnek. A gombák micéliumszerkezetekből állnak, amelyek egyetlen sejtből vagy spórából fejlődnek ki. A micéliumok mozdulatlanok és makroszkopikus méretűre nőhetnek. A gombák a leggyakrabban a talajban fordulnak elő, bár egyes fajok képesek akár vízben is megélni. Szerves anyagokat hasznosítanak, és szerves savakat termelnek. A baktériumokat általában az oxigénhez való affinitásuk alapján osztályozzák. A baktériumokat alakjuk alapján gömb alakú (bacillus), rúd alakú (coccus), enyhén íves alakú (vibrio) és fonalszerű (myces) fajokra osztják tovább (Lane, 2005).

A szakirodalomban a különböző baktériumok csoportosítása nagyon eltérő lehet. A MIC folyamatokkal leggyakrabban kapcsolatba hozott típusok a következők: szulfátcsökkentő baktériumok (SRB), kén/szulfid oxidáló baktériumok (SOB), mangán /vas oxidáló baktériumok (MnOB / IOB), nyálkaképző baktériumok (SFB) és savtermelő baktériumok (APB).

A felsoroltakon kívül, a különböző közegekben, természetesen egyéb baktériumok is elfordulhatnak, amelyek közvetve vagy közvetlenül elősegítik a korrózió kialakulását (Critchley et al., 2004).

2.1 Szulfátcsökkentő baktériumok (SRB)

A szulfátcsökkentő baktériumok felelősek a MIC által okozott korróziós problémák nagy részéért. Az SRB által okozott korrózió széles körben megtalálható a feldolgozatlan, ivó- és szennyvizet szállító vízvezetékben, valamint az iszapot szállító csővezetékben, de akár a nyersolajat szállító csővezetékben is előfordulhat. Az SRB-k anaerobok (oxigénhiányos környezetben fejlődnek), ezért olyan határfelületeken helyezkednek el, ahol a biofilm védi őket az oxigéndús víztől, de egy ideig aerob környezetben is képesek túlélni, amíg kompatibilis környezetet nem találnak maguknak (Lane, 2005). Viszont, általában, a rendelkezésre álló oxigént a biofilmben lévő egyéb aerob fajok használják fel, így a biofilm alapja anaerob (Ringas, 2007). A leggyakoribb fajták 25 °C és 35 °C közötti hőmérséklet-tartományban fordulnak elő, bár vannak olyanok is, amelyek 60 °C körüli hőmérséklet esetén is jelen vannak (AlAbbas et al., 2013). Az SRB-k (2. ábra) energiájukat a szulfátok (és foszfátok) szulfiddá való átalakításából nyerik, amely aztán reakcióba lépve vagy hidrogén-szulfidot vagy vas-szulfidot képez (vas alapú fémek esetén). (A vas-szulfid az a fekete réteg, amely az SRB által létrehozott gumókban van jelen). A hidrogén-szulfid számos fémre nézve rendkívül veszélyes. Ahogy az SRB-k növekednek, korróziós termékből és biofilmből álló gumókat alkotnak, amelyek megvédik őket a környezetüktől és segítik a növekedésüket. A korrózió ezután a gumók alatt következik be, és gyakran a gumók alatt üreg formájában jelentkezik. Az üreg azonban gyakran csak akkor látható, ha a gumó eltávolításra került (Ringas, 2007).



2. ábra. Az SRB által termelt biofilm (kék) ZnS (zöld) és ZnS aggregátumok (sárga) képződését okozza a fémes cinkből (Lane, 2005).

2.2 Kén/szulfid oxidáló baktériumok (SOB)

A kén/szulfid oxidáló baktériumok olyan aerob fajok, amelyek a szulfidot vagy az elemi ként szulfátokká oxidálják. Egyes fajok a ként kénsavvá (H_2SO_4) oxidálják, ami erősen savas ($pH \leq 1$) mikrokörnyezetet eredményez (Khan et al., 2021). Ezek a vegyületek nagyon agresszívek és korrodáló hatásúak a vasra és az acélra nézve. A nagyfokú savasságot számos alkalmazásban összefüggésbe hozták a bevonó anyagok lebomlásával. Elsősorban ásványi lerakódásokban fordulnak elő, és gyakoriak a szennyvíz rendszerekben. A jelenlévő SOB típusa a karbon- és energiaforrásoktól függ. Egyesek CO_2 és szerves anyagok környezetben fejlődhetnek, míg mások szerves vegyületekből nyerik az energiát és a korbont (Ibrahim, 2020). Gyakran fordulnak elő SRB-ekkel együtt (Lane, 2005).

2.3 Mangán /vas oxidáló baktériumok (MnOB/IOB)

A vasat és a mangánt oxidáló baktériumok jellemzően az acélok korróziós üregeiben találhatók. Egyes fajokról ismert, hogy felhalmozzák az oxidációs folyamatból származó vas- vagy mangánvegyületeket (Lane, 2005). Az IOB-k a semleges és a savas pH tartományt kedvelik és 90 °C -ig előfordulhatnak. Közeliükben kloridionok halmozódhatnak fel, amelyek a korróziós termékekkel egyesülve vas-kloridot eredményeznek. A vas-klorid rendkívül korrodáló hatása a korrózióálló acélokra. Ezek a baktériumok lehetővé teszik az anaerob körülmények kialakulását, ezáltal elősegítik az SRB-k növekedését is (Critchley et al., 2004).

2.4 Nyálkaképző baktériumok (SFB)

A nyálkaképző baktériumok szerves korbont használnak tápanyagforrásként. Általában 5 és 9 közötti pH tartományban és $10\text{--}50\text{ °C}$ közötti hőmérsékleten képesek növekedni (Critchley et al., 2004). Ezek olyan aerob organizmusok, amelyek a sejteik külsején poliszacharid "nyálkát" képeznek. A nyálka szabályozza a tápanyagok bejutását a sejtekbe és különböző anyagokat, köztük biocideket is lebonthat. A nyálkaképzők felelősek a hőcserélők teljesítményének csökkenéséért, valamint a szűrők

eltömődéséért. Megakadályozhatják, hogy az oxigén elérje az alatta lévő fémfelületet, és így az anaerob organizmusok számára megfelelő környezetet teremtenek (Lane, 2005).

2.5 Savtermelő baktériumok (APB)

Az APB olyan anyagcseretermékeket termelhet, mint például az ecetsav, amelyek csökkenthetik a pH-t a biofilm-fém határfelületen. Ezek elősegíthetik a korróziót azáltal, hogy elektronokat vesznek fel a fémről (Dawuda et al., 2021). Maguk a baktériumok inkább zárt rendszerekben, például gázvezetékekben és néha zárt vízvezetékekben fordulnak elő (Lane, 2005), de gyakran kapcsolatba hozzák őket a vasbetonszerkezetek korróziójával is (Critchley et al., 2004).

3. A MIC mechanizmusai

A MIC a felületek szennyeződésével kezdődik, amely folyamat természetes módon számos környezetben előfordul. Például, amikor egy fémdarabot vízbe helyeznek, legyen az ivóvíz vagy nem ivóvíz, szinte azonnal elkezd felépülni rajta egy szerves réteg, amely túlnyomórészt töltött szerves molekulákból áll. További idő elteltével erre a felületre szerves anyagok kötődnek, és a réteg vastagsága növekszik (Ringas, 2007). A bioszennyeződés szerves és szervesetlen komponensekből áll, amelyek magukban foglalják a mikroorganizmusokat, a kicsapódott anyagokat, a részecskéket és a korróziós termékeket. A biológiai komponens a biofilmek kialakulásából ered, ahol a mikroorganizmusok felhalmozódnak a felületeken, és összetett közösségeket alakítanak ki egy szerves poliszacharidokból álló mátrixban. A biofilmek a környezettől függően számos különböző mikroorganizmusból állnak (Critchley et al., 2004).

A szakemberek számára az egyik legnagyobb kihívás a MIC azonosítása során az, hogy kapcsolatot teremtsenek a rendszerben jelen lévő mikroorganizmusok és a rendszerben tapasztalt korrózió között. Az olaj- és gáziparban a mikroorganizmusok szinte minden környezetben, különösen a csővezetékekben megtalálhatók. Az olaj- és gázvezetékeken keresztül áramló folyadékokban élnek, és biofilmeket képeznek a csövek belső felületein. A korrózióhoz több tényező is hozzájárul és a különböző korróziós mechanizmusok, köztük a MIC, ugyanazt a korróziós morfológiát eredményezhetik. Ezért kulcsfontosságú annak ellenőrzése, hogy egyértelmű kapcsolat van-e a biofilm és a korrózió között. A korróziót okozhatja például egy olyan abiotikus reakció, amelyet a víz és az oxigén jelenléte táplál, és amelyben egyáltalán nem vesznek részt mikroorganizmusok, még ha jelen is vannak (Larsen, 2020).

A mikrobiológiai aktivitás a fémdarabban/felületen mind az anódos, mind a katódos reakciókat befolyásolhatja. Az anódos reakciók a következők révén valósulhatnak meg (Videla, 2001):

- korrozív anyagcseretermékek termelése (például gombák által termelt szerves savak);
- olyan anyagcseretermékek termelése, amelyek fokozzák a közegben már jelen lévő más kémiai fajok korrozív hatását (például az SRB anyagcseréjéből származó biogén szulfidok, amelyek fokozzák a tengervízben lévő klorid korrozív hatását);
- a korróziógátlóként működő kémiai vegyületek mikrobiológiai lebontása (például a nitrátok gomba általi felhasználása; amelyek az alumínium korróziójának hatékony gátlói).

A katódos reakcióra gyakorolt mikrobiológiai hatások főként katódos vegyületek, például oxigén vagy protonok felhasználásával vagy termelésével valósulnak meg, és eredményük a korrózió sebességének lassítása vagy a fém oldódásának felgyorsítása lesz. A határfelületen lerakódott (kialakult) biofilmek jelentős diffúziós akadályt képeznek például az oxigén vagy a protonok számára (Videla, 2001).

A mikroorganizmusok a korróziós folyamatot több, egyidejűleg vagy egymás után működő mechanizmussal befolyásolják, de nagyon ritkán (például kén oxidáló baktériumok által okozott savas korrózió esetén) egyetlen ok magyarázza a mikroorganizmusok korrózióra gyakorolt hatását (Videla, 2001).

A MIC során lejátszódó folyamatokat különböző megközelítésekben különböző modellek írják le. A mechanikai modellek alkalmazása gyakran a MIC előrejelzésének előnyben részesített módszere, mivel egyszerű előrejelzéseket adnak. A legtöbb MIC-modell által figyelembe vett közös paraméter a folyadékáramlás sebessége és/vagy a folyadék típusa (például stagnáló, szakaszos vagy folyamatos), mivel a folyadékáramlás közvetlenül befolyásolja a csővezeték alján kialakuló lerakódást, különösen kis sebességű áramlások esetén (Dawuda et al., 2021).

3.1 MIC a fémekben

Mivel a MIC a korróziót gyorsító mechanizmus, várhatóan gyakrabban fordul elő a korrózió különböző formáira érzékeny fémötvözetekben és a biológiai aktivitásnak kedvező környezetben (Lane, 2005).

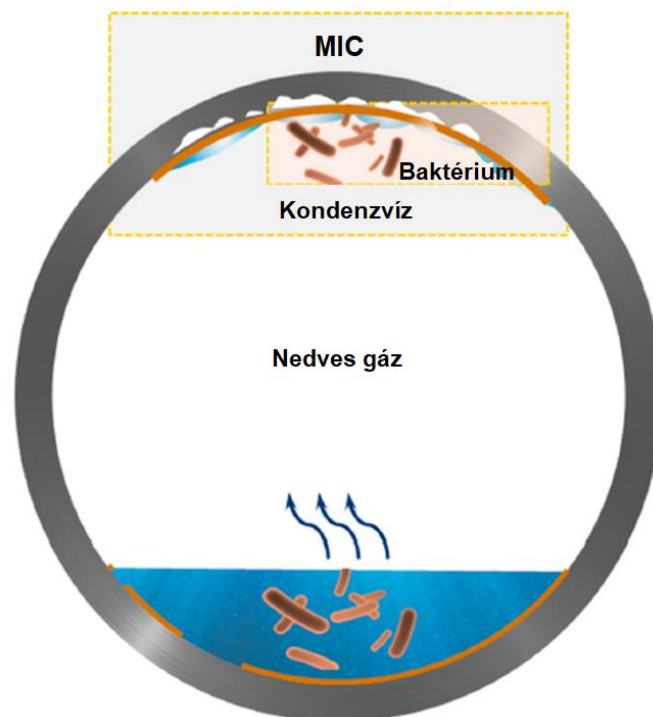
Az 1. táblázatban felsorolt alkalmazásokban használt fémek közé tartoznak a lágyacélok, korrózióálló acélok, a rézötvözetek, a nikkelötvözetek és a titánötvözetek. Általánosságban elmondható, hogy a lágyacéloknál az egyenes korróziótól a környezeti hatások okozta repedésekig (EAC = Environmentally Assisted Cracking) minden előfordulhat, míg a többi ötvözetnél általában főként lokális korróziós formák fordulnak elő. A lágyacélok, a rozsdamentes acélok, az alumínium, a réz és a nikkel ötvözetek mind hajlamosak a MIC-re, míg a titánötvözetek gyakorlatilag ellenállónak bizonyultak a MIC-kel szemben, környezeti körülmények között (Lane, 2005).

1. táblázat. MIC problémákkal küzdő rendszerek (Lane, 2005).

Alkalmazás	Problémás terület	Mikroorganizmus
Csővezeték / tárolótartály (víz, szennyvíz, gáz, olaj)	Belső terület (álló közeggel) Földalatti vezetékek és tartályok külső részei, különösen nedves, agyagos környezetben	Aerob és anaerob savtermelők SRB MnOB/IOB SOB
Hűtőrendszer	Hűtőtorony Hőcserélők Tárolótartály	Aerob és anaerob baktériumok Fém oxidáló baktériumok SFB Alga Gomba
Dokkok, mólók és egyéb vízi szerkezetek	Vízzel érintkező részek	SRB
Jármű üzemanyagtartálya	Álló közeggel érintkező részek	Gomba
Villamosenergia-termelő üzemek	Hőcserélők Kondenzátorok	Aerob és anaerob baktériumok SRB Fém oxidáló baktériumok
Tűzoltórendszer	Álló közeggel érintkező részek	Anaerob baktériumok SRB

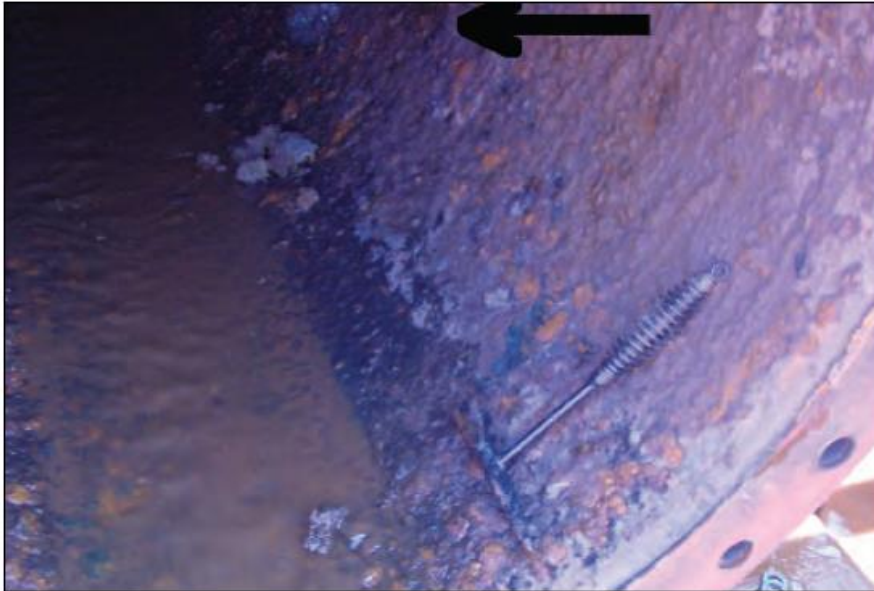
4. MIC megjelenése speciális helyeken

A mikroorganizmusokkal összefüggő korrózió megjelenhet csövek belső felületein vagy hegesztett kötéseknél is. Különböző becslések szerint a csövek meghibásodásának 20-40%-áért a MIC felelős. A legáltalánosabb károsodási forma ez esetben a lyukkorrózió, amely a csővezetékek szivárgását okozza. A MIC nem csak folyékony közeget szállító csövek esetén fordulhat elő, hanem gázvezetékek esetén is. A gázvezetékekben a mikroorganizmusok az üzemi körülmények között a korróziós folyamatokhoz elegendő, viszonylag zárt, vizet, vegyi anyagokat, elegendő tápanyagot és anyagcseretermékeket tartalmazó környezetet hoznak létre. A csővezetékek belseje és a külső környezet (például talaj) közötti hőmérséklet-gradiens hatására a belső falfelületen kondenzvíz képződik, ami vízcseppeket és/vagy vékony oldatrégeket hoz létre. A 3. ábra két olyan esetet mutat be, amikor kondenzvíz keletkezik a gázvezeték belső falfelületén. Az egyik esetben a vízcseppek a cső felületének tetején jelennek meg, míg a másik esetben az oldalfalakon kondenzálódott víz gravitáció hatására lefelé áramlik a cső aljára és ott egy vékony vízréteget hoz létre. Minkét folyamat esetén a korrózió olyan gázok, mint például a CO_2 és a H_2S oldódásakor következik be. Ezeket a folyamatokat elősegíthetik a jelenlévő mikroorganizmusok MIC-t kiváltva (Wei et al., 2022).

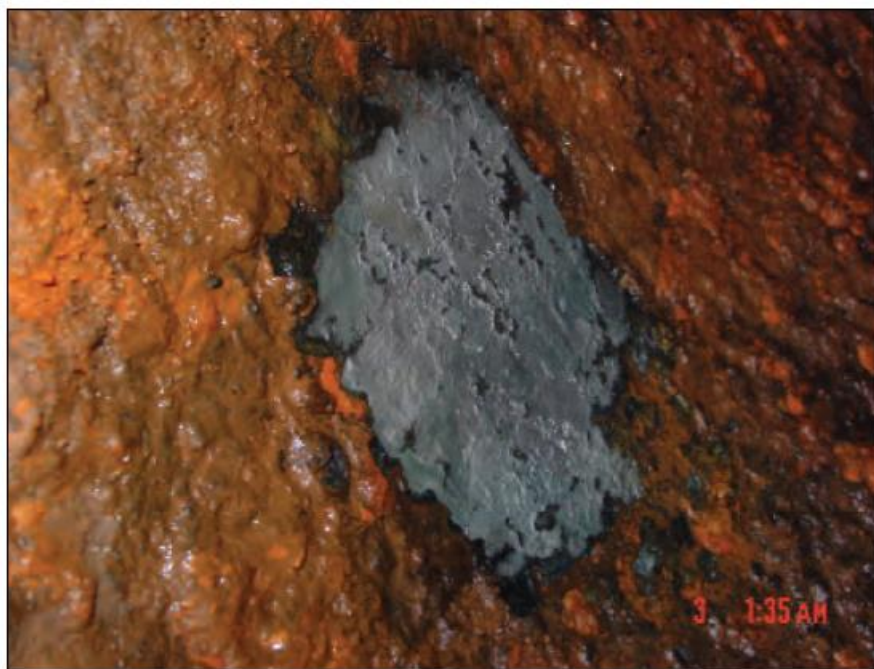


3. ábra. A csővezeték belső felületén jelenlévő kondenzvíz két különböző esete (Wei et al., 2022).

Annak ellenére, hogy sok esetben vitatott a mikroorganizmusok szerepe a korrózióban, a MIC folyamatok során az egyes korróziós formák könnyen beazonosíthatók akár a helyszínen is. Például az SRB által okozott korrózió egyszerűen beazonosítható a különböző méretű és alakú gumók jelenléte alapján, amelyek belsejében általában puha fekete anyag található, amely könnyen eltávolítható. A réteg eltávolítása után láthatóvá válik a fényes, szürke fémfelület, amely korrózióknak van kitéve. Egy cső belsejében ez a tipikus morfológia a 4. és az 5. ábrákon látható (Ringas, 2007).



4. ábra. A cső belsejében található gumók, fekete nyíllal jelölve (Ringas, 2007).



5. ábra. A gumók eltávolítás után a jellemző morfológia (Ringas, 2007).

A baktériumok el tudnak helyezkedni a felület különböző rétegeiben és bizonyos idő után a gumók mérete megnő (Ringas, 2007).

A szakirodalomban számos kutatás érhető el a mikroorganizmusok okozta korrózió kialakulására vonatkozóan hegesztett kötések esetén is. Korrózióálló acélok esetén például a sok szemcsével és

szemcsehatárral rendelkező varraton sokkal több megtapadt baktériumot mutattak ki, mint a hőhatásövezeten vagy az alapfémen. Ebből következően a szövetszerkezet hegesztés során bekövetkező változása befolyásolhatja a baktériumok kötődését, amely a hegesztett kötés szelektív korrózióját eredményezheti. Más, X80 anyagminőségen végzett vizsgálatok során, volfrámelektrodos védőgázos ívhegesztéssel létrehozott varratban alakult ki a szelektív korrózió. Az SRB által kiváltott korróziós viselkedés alapján az SRB leginkább az alapanyag és a varrat felületén tapadt meg és felgyorsította a helyi korróziós folyamatokat (Wang et al., 2022).

5. Összefoglalás

A korrózió különböző formáinak vizsgálata során kiderült, hogy a korrózió mikroorganizmusokból és a rendszerben végzett mikrobiológiai tevékenységekből is eredhet. Mivel mikroorganizmusok minden környezetben előfordulnak, így a legtöbb szerkezet például hőcserélők, tartályok, csövek, erőművek, acélművek érintettek a problémában.

A MIC által okozott károsodások nem csak a fémeket, hanem számos más anyagot, köztük a polimereket, a betont és az üveget is érintik. Ez a folyamat általában 80 °C alatti hőmérsékleten és 10 alatti pH-szint mellett fordul elő, de ettől eltérő esetekben is megjelenhet. A mikroorganizmusok megváltoztatják az elektrokémiai reakciókat és gátolják, vagy felgyorsítják a fém korróziós folyamatát. Megjelenésük miatt a korrózió során az eredetileg kétkomponensű rendszer háromkomponensű rendszerre alakul, melynek tagjai a közeg, az anyagok és a mikroorganizmusok.

A mikroorganizmusok között vannak különböző algák, gombák és baktériumok is. Az algák szinte minden vízi környezetben megtalálhatók, a gombák leggyakrabban a talajban fordulnak elő, bár egyes fajok képesek akár vízben is megélni, a baktériumok pedig szinte bármilyen környezetben előfordulhatnak. A szakirodalmakban a különböző baktériumok csoportosítása nagyon eltérő lehet. A MIC folyamatokkal leggyakrabban kapcsolatba hozott típusok a következők: szulfátsökkentő baktériumok, kén/szulfid oxidáló baktériumok, mangán /vas oxidáló baktériumok, nyálkaképző baktériumok és savtermelő baktériumok. A felsoroltakon kívül a különböző közegekben, természetesen egyéb baktériumok is elfordulhatnak, amelyek közvetve vagy közvetlenül elősegítik a korrózió kialakulását.

A szakemberek számára az egyik legnagyobb kihívása a MIC azonosítása során az, hogy kapcsolatot teremtsenek a rendszerben jelen lévő mikroorganizmusok és a rendszerben tapasztalt korrózió között. A mikrobiológiai aktivitás a fémoldatban/felületen mind az anódos, mind a katódos reakciókat befolyásolhatja. A legtöbb esetben a mikroorganizmusok a korróziós folyamatot több, egyidejűleg vagy egymás után működő mechanizmussal befolyásolják.

A MIC során lejátszódó folyamatokat különböző megközelítésekben különböző modellek írják le. A mechanikai modellek alkalmazása gyakran a MIC előrejelzésének előnyben részesített módszere, mivel egyszerű előrejelzéseket adnak. A legtöbb MIC-modell által figyelembe vett közös paraméter a folyadékáramlás sebessége és/vagy a folyadék típusa. Mivel a MIC a korróziót gyorsító mechanizmus, várhatóan gyakrabban fordul elő a korrózió különböző formáira érzékeny fémötvözetekben és a biológiai aktivitásnak kedvező környezetben. Általánosságban elmondható, hogy a lágycélnál az egyenletes korróziótól a környezeti hatások okozta repedésekig minden előfordulhat, míg a többi ötvözetnél általában főként lokális korróziós formák jelennek meg. Mivel a MIC különböző speciális helyeken például csövek belsejében vagy hegesztett kötések esetén is előfordulhat, a korrózió során lejátszódó különböző folyamatok megismerése, megfelelő vizsgálati módszerek kifejlesztése és a megfelelő védekezés biztosítása kiemelt fontosságú.

Irodalom

- [1] Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., Koritárné Fótos, R., Kuzselláné Koncsik, Zs. (2012). *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*. Lukács J. (szerk.). Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [2] Lukács, J. (2005). Dimensions of lifetime management. *Materials Science Forum*, 473-474, 361-368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.361>
- [3] Koncsik, Zs. (2019). A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9(4), 63-71. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.5>
- [4] Koncsik, Zs. (2021). Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11(2), 372-379. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.49>
- [5] Al-Sultani, K. F., Khulief, Z. T., Hasan, A. A. (2021). Characterization of microbiological influence corrosion for API 5L X46 pipeline by sulphate-reducing bacteria (SRB). *Materials Today: Proceedings* 42, 2169–2176. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.301>
- [6] Khan, M. A. A., Hussain, M., Djavanroodi, F. (2021). Microbiologically influenced corrosion in oil and gas industries: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 80–106. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-5>
- [7] Taleb-Berrouane, M., Khan, F., Hawboldt, K., Eckert, R., Skovhus, T. L. (2018). Model for microbiologically influenced corrosion potential assessment for the oil and gas industry. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 53(5), 378-392. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1483221>
- [8] Videla, H. (2002). Prevention and control of biocorrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 259–270. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00053-7)
- [9] Jayatilika, S., Okogbaa, G.: *Accelerated Life Testing*, 2014 Workshop on Accelerated Stress Testing and Reliability Conference, Saint Paul, Minnesota, Egyesült Államok, pp. 1-21.
- [10] Wei, B., Xu, J., Sun, C., Cheng, Y. F. (2022). Internal microbiologically influenced corrosion of natural gas pipelines: A critical review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 102, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.jingse.2022.104581>
- [11] Wang, Q., Zhou, X., Su, H., Zhang, M., Li, Z., Wu, T. (2022). Accelerated sulfate reducing bacteria corrosion of X80 pipeline steel welded joints under organic carbon source starvation. *npj Materials Degradation*, 6, 82. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00291-9>
- [12] Harmon, A. (2018). *Microbiologically-Influenced Corrosion (MIC) Testing Service: Fast-qPCR Test is Helping the Oil and Gas Industry Turn Around a Multi-Billion-Dollar Problem*. GTI Brochure, Illinois, Egyesült Államok
- [13] Lipin, L., Yajun, Z., Ping, X., Lingfeng, Y., Kangda, T. (2013). The mechanism and control methods of microbiologically induced corrosion on the pipeline. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5(12), 472-475.
- [14] Little, B. J., Blackwood, D. J., Hinks, J., Lauroc, F. M., Marsilic, E., Okamoto, A., Rice, S. A., Wade, S. A., Flemming, H. C. (2020). Microbially influenced corrosion – Any progress? *Corrosion Science*, 170, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
- [15] Keith, B., Aneta, N. (2021). *Investigation into a Microbiologically Induced Corrosion (MIC) failure of an onshore pipeline*. Hazards 31 Symposium series No. 168.
- [16] Critchley, M., Javaherdashti, R. (2004). *Metals, microbes and MIC – A review of microbiologically influenced corrosion*. *Corrosion & Prevention*, 037, pp. 1-8.

- [17] Zarasvand, K. A., Rai, V. R. (2014). Microorganisms: Induction and inhibition of corrosion in metals. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 87, 66-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.10.023>
- [18] Lane, R. A. (2005). Under the Microscope: understanding, Detecting and Preventing Microbiologically Influenced Corrosion. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 5(10-12), 33-38. <https://doi.org/10.1361/154770205X65891>
- [19] AlAbbas, F. M., Williamson, C., Bhola, S. M., Spear, J. R., Olson, D. L., Mishra, B., Kakpovbia, A. E. (2013). Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.10.014>
- [20] Larsen, K. R. (2020). Diagnosing Microbiologically Influenced Corrosion in a Pipeline, *Material Performance*.
- [21] Ringas, C. (2007). Internal corrosion of slurry pipelines caused by microbial corrosion: causes and remedies, *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 381-384.
- [22] Ibrahim, A. A. (2020). *Study of the Chemistry of Soured and Chemically Treated Reservoir Fluids and Potential Impact on Microbial Influenced Corrosion in Oil and Gas Production Facilities*. PhD thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland.
- [23] Dawuda, A. W., Taleb-berrouane, M., Khan, F. (2021). A probabilistic model to estimate microbiologically influenced corrosion rate. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 908-926. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.006>

A MIKROBIOLÓGIAI KORRÓZIÓ VIZSGÁLATI MÓDSZEREI

Koncsik Zsuzsanna

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen publikációban a mikrobiológiai korrózió vizsgálati lehetőségeivel foglalkozunk. A különösen érintett csővezetékek helyszíni vizsgálati, értékelési módszereit tekintjük át, majd röviden bemutatjuk a laboratóriumban, ellenőrzött körülmények között végzett mikrobiológiai korróziós vizsgálatok lehetőségeit is. A szakirodalmi ajánlások alapján javaslatot teszünk a mikrobiológiai korróziós folyamatok monitorozására és annak kiegészítésére laboratóriumi vizsgálatokkal. Végezetül összefoglaljuk azokat a paramétereket, amelyek segítik a mikrobiológiai korróziós károsodás elkerülését, megelőzését.

Kulcsszavak: mikrobiológiai korrózió, korrózió vizsgálata, korrózió megelőzése

Abstract

In this paper, we address the possibilities of investigating microbiological corrosion. We will review the on-site inspection and assessment methods for particularly affected pipelines, and briefly present the possibilities of microbiological corrosion testing under controlled conditions in the laboratory. On the basis of the literature recommendations, a proposal is made for monitoring microbiological corrosion processes and complementing it with laboratory tests. Finally, a summary of the parameters that help to avoid and prevent microbiological corrosion damage is given.

Keywords: microbiological corrosion, corrosion test, prevention of corrosion

1. Bevezetés

Az MIC (microbially influenced corrosion) mozaikszót széles körben használják arra a típusú korrózióra, amikor mikroorganizmus jelenléte és aktivitása feltételezhető. Európában és Dél-Amerikában elterjedt a biokorrózió elnevezés is, ami egy kicsit zavaró, ugyanis Észak-Amerikában a biokorrózió elnevezést az emberi szervezetben lévő implantátumok korróziójára használják. A korrózió többnyire határfelületi jelenség, amely erőtejesen függ az oldott oxigén koncentrációjától, sók jelenlététől és kémiai összetételétől, a kapcsolódó elektrolit vezetőképességtől, redox potenciáljától és pH értékétől. Mindezeket befolyásolja egy mikrobiológiai filmréteg jelenléte, amely a határfelületeket kolonizálja (Little et al., 2020).

„A MIC a rossz anyagválasztás és a rossz menedzsment döntések eredménye” (MIC workshop Singapore, 2018), ezért fontos egyrészt a megfelelő diagnosztikája, másrészt az okok megszüntetéséhez szükséges döntések meghozatala (Little et al., 2020). Az elmúlt 25 évben több, mint 2000 publikáció jelent meg a MIC témában. A publikációk nagy része hibák körüli anekdotákból, helyszíni, vagy laborvizsgálatok bemutatásából áll. Little és társ szerzői szerint (Little et al., 2020) a mikrobiológiai korrózió „3 M” eredménye: mikroorganizmus (mikrobiológia), metál, médium, vagy – bővebben kifejtve –, a jelenlévő baktériumok, gombák, egyéb mikroorganizmusok, a fém felülete és a jelenlévő közeg, annak kémiai összetétele, fizikai tulajdonságai, hőmérséklete, áramlási viszonyai. Ha jobban megnézzük, ez valójában három különböző szakmai területet jelent, különböző nyelvvezetettel és vizsgálati módszerekkel. Ezeket kellene valahogyan összhangba hozni, hogy a három tényező együttes értékelésére sor kerülhessen. A MIC minden iparágban problémát jelent, ahol biofilm képződik fém felületen. Scott, áttekintve a témakör (akkori) szakirodalmát megállapította, hogy a legtöbbször feltett kérdés a következő (Scott, 1993): Mi lesz a várható korróziós sebessége „x” anyagnak, ha rajta egy agresszív mikroorganizmus terjeszkedik? Most, további közel 30 évvel később, ez a kérdés még mindig egy nyitott kérdés.

A publikáció további részében, áttekintve a vonatkozó szakirodalom egy részét, összefoglaljuk a mikrobiológiai korrózió vizsgálati módszereit helyszíni és laboratóriumi körülmények között, megvizsgáljuk a monitorozási lehetőségeit és összefoglaljuk a mikrobiológiai korrózió megelőzésében szerepet játszó tényezőket.

2. Mikrobiológiai korrózió vizsgálati módszerei

A mikrobiológiai korrózió vizsgálata, akár valós ipari, akár laboratóriumi környezetben, alapvetően kétféle módszerrel történhet (Videla, 2001): mikrobiológiai elemzéssel, vagy elektrokémiai elemzéssel. Más irodalmak több alcsoportra osztják a vizsgálati módszereket, de azok mindegyike valamilyen rendezési elv szerint besorolható ebbe a két típusú vizsgálati módszerbe.

2.1. Mikrobiológiai korróziós károsodások helyszíni vizsgálati módszerei

Ipari környezetben a következő fémek és ötvözetek esetében azonosítottak már ipari korróziót: szén acélok, ausztenites acélok, martenzites kis ötvöztartalmú rozsdamentes acélok (< 6% Mo), réz és ötvözetek, nikkel/réz ötvözetek, alumínium ötvözetek. Nem azonosítottak még mikrobiológiai korróziót titán ötvözeteken és nagy nikkel tartalmú ötvözeteken (Little et al., 2020).

Little és szerzőtársai (Little et al., 2020) a kutatásaik során megállapították, hogy legtöbb károsodáselemzés esetében csak akkor gondolnak a mikrobiológiai korrózióra, ha az abiotikus és fizio-kémiai magyarázatok már nem elegendőek a lerakódás természetének megértéséhez, a korrózió károsodást okozó hatásának és előrehaladásának azonosításához.

Lee és Little (Lee et al., 2020) a diagnosztikai módszerekkel foglalkoztak. Vizsgálataik során megállapították, hogy számos tradicionális és modern vizsgálati molekuláris technika félrevezető eredményt szolgáltat. A metallográfiai megjelenés, a lyuk morfológiája nem alkalmas a mikrobiológiai korrózió diagnosztikájára. A közel gömb, félgömb alakú gödröcskék az acélon, különösen varrat közelében lehetnek a mikrobiológiai korrózió következményei, de a szemrevételezés alapján nem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy a károsodást mikrobiológiai korrózió okozta. A mikroorganizmus, többnyire az SRB (szulfát redukáló baktérium) baktérium jelenlétét is igazolni szükséges.

Számos szakirodalom (Videla, 2002; Little et al., 2015; Flemming et al., 1996/a; Flemming et al., 1996/b; Kearns et al., 1994) foglalkozik azzal, hogy hogyan lehet a mintákat begyűjteni, tárolni, milyen módszerekkel lehet megvizsgálni azokat, mik ezeknek a módszereknek az előnyei, hátrányai, és legfőképpen mik a korlátai.

Videla szerint, a hagyományos ipari környezetben, a mikroorganizmusok számszerű értékelése erőteljesen korlátozódott a planktonikus populációra (Videla, 2001). A megfelelő monitorozási módszert kiválasztva, az adott ellenőrzési pontról, a minta begyűjtését követően a keletkezett biofilm közvetlenül megfigyelhető SEM alkalmazásával vagy optikai mikroszkóppal. A SEM vizsgálathoz hosszadalmasabb előkészület szükséges, mert a mintát megfelelően rögzíteni, sóatlanítani, dehidratálni, és fagyasztva szárítani kell. Néhány berendezés már alkalmas nagynyomású gáz alkalmazására (környezeti SEM technológia), ami lehetővé teszi a nedves minták vizsgálatát a természetes környezetükben, anélkül, hogy a felépítésüket roncsolnánk, megtakarítva ezzel a mintaelőkészítési időt is. A SEM vizsgálatok alkalmazását számos publikáció bizonyítja (Al Abbase et al., 2013; Al-Sultani et al., 2021; Li et al., 2018), a vizsgálat segítségével azonosítani lehet a kártékony mikroorganizmust és megfigyelhető a károsodott fém felülete is.

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok jóval egyszerűbbek és olcsóbbak. Ebben az esetben átvilágításos biológiai mikroszkópokat használnak, a baktériumokat pedig fluoreszkáló tégelyben tartják. Ezzel a módszerrel a mintában lévő sejtek száma számlálható, és lehetőséget biztosít a különböző egyedek azonosítására is.

A biofilm közvetett számszerű elemzése magában foglalja: az életképes egyedek megszámlálást, a biomassza értékelését, továbbá a biomassza aktivitásának a mérését (Videla, 2001). Az eddigi vizsgálati eredmények alapján az a megállapítás tehető, hogy ez utóbbi az egyik legfontosabb mérőszám. Radiorespirometrikus technika alkalmazása kellően érzékeny és gyors módszer a biofilmben lévő aktivitás meghatározására. Ezt a módszert különösen az SRB baktériumok aktivitásának jellemzésére használják. A vizsgálat eredménye nem a jelenlévő SRB baktériumok száma, hanem azok aktivitása, amely jobban jellemzi a korróziós folyamatot azáltal, hogy kvantitatív információt szolgáltat a biogén szulfid mennyiségéről (mennyiségi egység/idő), amelyet a biofilm hozott létre (Videla, 2001).

Szintén Videla az elektrokémiai módszerek alkalmazását is bemutatja (Videla, 2001.). A mikroorganizmusok a fém felületek elektrokémiai állapotának megváltoztatásával befolyásolják a korróziót. Ezek a változások aztán számos következménnyel járhatnak: lokális korrózió megjelenése, az általános korrózió sebességének változása, de akár a korrózió gátlása is. Amikor elektrokémiai mérési technikák kerülnek alkalmazásra a fém felületének aktuális állapotát figyelembe kell venni. A fém és a környező elektrolit közötti határfelületet meghatározott eloszlású elektromos töltés jellemzi, ami a köztük lévő dupla réteg növekedésének kedvez. A jelen tudásunk a fém/oldat közötti határfelületről a csepegtetett higany elektródával végzett kísérleti vizsgálaton alapul. A higany és különböző víz bázisú elektrolitos oldat közötti határfelület viselkedése úgy értelmezhető, mint egy ideálisan polarizálható határfelület, habár a biofilm jelenléte drasztikusan megváltoztatja a klasszikus elektrokémiai alapelveket, amelyeket a korróziós tanulmányok korábban leírtak.

Nyílt körű vagy spontán korróziós potenciál változása az időben mérhető a villamos feszültség értékek különbségeként, ha a fémet korróziós közegbe merítjük és használunk egy megfelelő referencia elektródot. Az első SRB baktériummal végzett kísérletek hirtelen változásokat jeleztek a potenciál értékében az aktivitás irányában. Az eredmények hasznosnak bizonyultak a baktériumok által okozott gyorsított korróziós hatás kezdetének a jelzésére.

A másik egyszerűen mérhető és hasznos elektrokémiai paraméter az oxidációs-redukációs potenciál, az úgynevezett redox potenciál. A redox potenciál esetén a redukció és az oxidáció aránya egyenlő. A redox potenciál maga függ az oxigén koncentrációtól, a hőmérséklettől és a környezet pH-jától. A mikrobiológiai korrózióval foglalkozó irodalmakban a redox potenciált annak a mérésére használták, hogy egy adott környezet az SRB baktériumok növekedésének kedvez-e, vagy sem.

Az elmúlt évek során számos elektrokémiai technika született a korróziós sebesség értékelésére szervesen korrozív közegben, amelyeket aztán átvettek és alkalmaztak mikrobiológiai korrózióval foglalkozó esetekre is. Ilyen módszerek például: polarizációs ellenállás mérés, alternáló áram módszerek (elektrokémiai impedancia spektroszkópia), elektrokémiai zaj, osztott-cellás mérések (Videla, 2001).

Egy későbbi forrásmunka (Little et al., 2020) azonban már eleve elveti a korábban említett planktonikus populáció vizsgálatát. Úgy találták, hogy ez nem ad információt sem a mikroorganizmusok mennyiségére, sem a biofilmen belüli elhelyezkedésére vonatkozóan. A probléma megoldása, hogy a sejtek közvetlen megszámlálására összpontosítottak, amelyeket – a DNS-specifikus festékek segítségével – molekuláris mikrobiális közösségek elemzésére használtak. Ezeknek a módszereknek is megvannak azonban a maguk korlátai és torzításai, amelyeket figyelembe kell venni (Al-Awahdi, 2013).

Sajnálatos és egyelőre érthetetlen módon a sejtek száma és a mikrobiológiai korrózió kinetikája nem hozható összefüggésbe, függetlenül a mennyiségi módszertől. Ezért a mikrobiális mennyiségi meghatározás csak jelezni tudja a mikrobák jelenlétének mértékét, de nem teszi lehetővé a mikrobiológiai korrózió előrejelzését vagy diagnosztizálását. A mikroorganizmusok alacsony számban lehetnek mikrobiológiai korrózióért felelősek, míg ugyanezen organizmusok nagy száma nem feltétlenül jelenti a korróziós folyamatban való erős részvételt.

A következő NACE (National Association of Corrosion Engineers) International vizsgálati módszerek célja, hogy iránymutatást nyújtsanak a mikrobiológiai korrózió helyszíni diagnosztizálására:

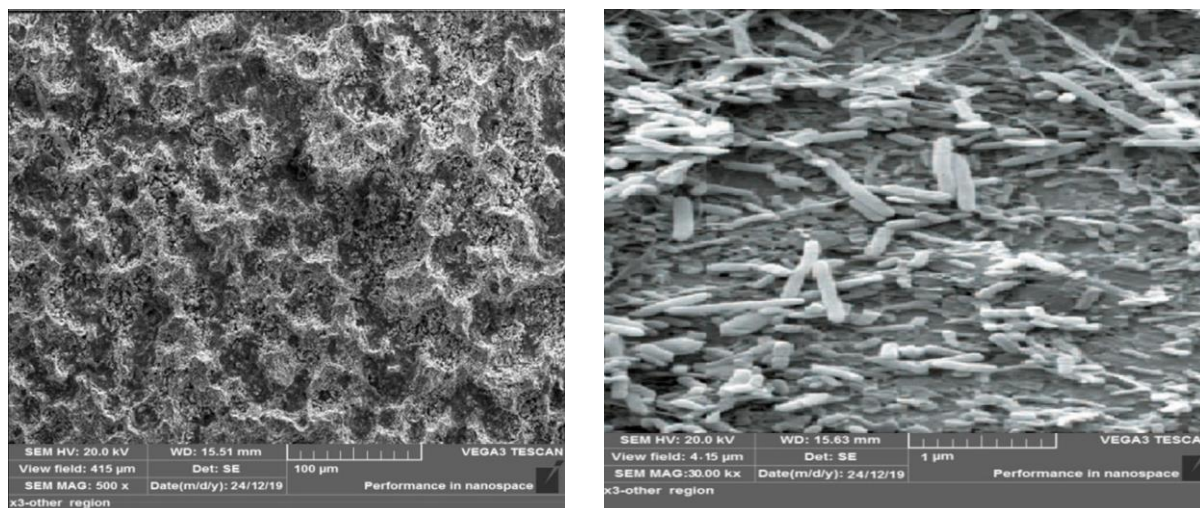
- TM0106-2016, Detection, Testing, and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) on External Surfaces of Buried Pipelines;
- TM0194-2014, Field Monitoring of Bacterial Growth in Oil and Gas Systems;
- TM0212-2018 Detection, Testing, and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion on Internal Surfaces of Pipelines.

Little és szerzőtársai (Little et al. 2020) további diagnosztizálási módot láttak mineralógiai módszer segítségével; a vizsgálat során a korrózió ásványtanát használták fel a mikrobiológiai korrózió diagnosztizálására. A biofilmekben elszaporodó mikroorganizmusok mikrokozmoszt hoznak létre a biofilm és az alapfém közötti határfelületen, amelyben eltérő lehet a hőmérséklet, a nyomás, az oldott oxigén és a pH-érték az elektrolitétől, vagyis eltérő a szerves és a szervesen nem élő koncentrációja. Következésképpen, a korróziós termékek biomineralizációjából származó korróziós termékek különbözhetnek azoktól, amelyek abiotikus környezetben keletkeznek. Például acél abiotikus környezetben bekövetkező korróziója során vas-oxidok és oxi-hidroxidok keletkeznek, magnetit (Fe_3O_4), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), lepidokrokit ($\gamma\text{-FeO(OH)}$), goethit (FeOOH) és hematit (Fe_2O_3). Ezzel ellentétben, ha a környezetben baktérium is jelen van bakteriális vas-oxid (BIOS) keletkezik, mind friss mind tengervíz jelenlétében, a keletkező vegyület a két soros ferrihidrát. A ferrihidrát megtalálható azokon a felületeken, ahol vasoxidáló baktériumok (IOB) vannak jelen. A ferrihidrát egy gyenge kristályrendszerrel bíró ásvány, amely idővel goethitté vagy hematittá alakul (Mendili, 2013; Gerke, 2012).

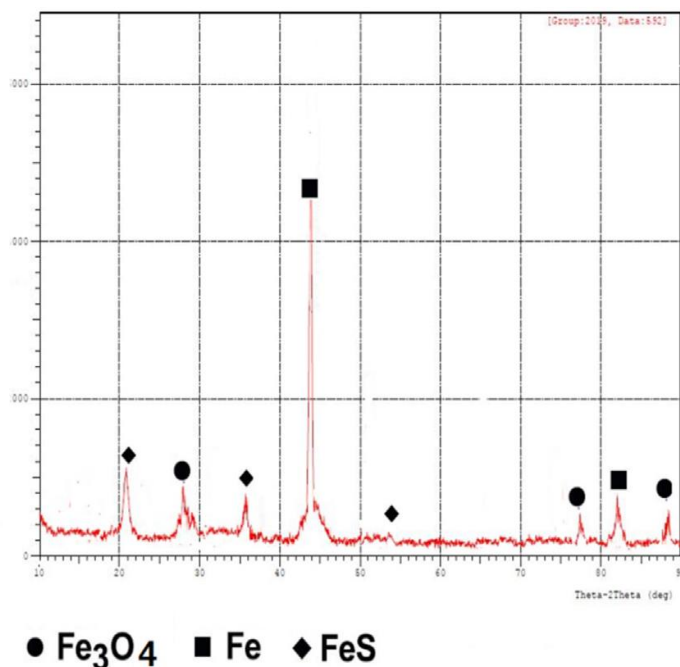
McNeil és munkatársai a korróziós termékek mineralógiáját értékelték röntgen diffrakciós adatok, termodinamikai stabilitási diagramok, azaz kétdimenziós fázisegyensúlyi diagramok segítségével (McNeil et al. 1991), két, egymástól független fázisegyensúlyi rendszer által szabályozott változóval (azaz a pH-értékkel és a potenciállal). Arra a következtetésre jutottak, hogy néhány fémszulfid a felszínközeli természetes környezetben csak mikrobiológiai aktivitással állítható elő. Például a tetragonális mackinawite (FeS_{1-x}), amit az SRB vasoxidokból állít elő, és jelenléte SRB által befolyásolt korrózióra utal. Ezt a következtetést alátámasztotta Jack, földbe fektetett szénacél gázcsonnák esetében is (Jack, 2002). Djurleit, a kovellin és a kalkocit magas hőmérsékletű polimorfjainak a jelenléte a felületen ásványtani bizonyítékok a réz-nikkel ötvözetek SRB által befolyásolt korróziójára (McNeil et al., 1992). Aerob körülmények között a mangán-oxid és mangán és/vagy vas oxidáló hatású baktériumok jelenléte egy lehetséges mikrobiológiai korrózió indikátora (Linhardt, 2010; Emerson, 2019; Lee et al., 2019).

A helyszíni vizsgálatok köre tovább bővíthető a kémiai vizsgálatokkal. A legegyszerűbben úgy dönthető el a helyszínen, hogy jelen vannak-e korróziót okozó baktériumok, vagy sem, hogy az érintett korrodált területből kivágunk egy kisebb darabot, majd azt meggyújtva, ha égett haj vagy hús szaga keletkezik, akkor jelen vannak baktériumok. Ha ettől pontosabb vizsgálat szükséges, akkor azt a tényt kell kihasználni, hogy az élő organizmusok mindegyike termel adenozin trifoszfátot (ATP), léteznek egyszerű foszfor-tesztelő eszközök, amelyek a helyszínen alkalmazhatók. Laboratóriumban a röntgendiffrakciós spektrum segít a foszfor elemzésében (Little et al., 2020).

Egy további közlemény (Al-Sultani et al., 2021) API 5L X46 anyagminőségű, polietilén védőszigeteléssel bevonatolt csővezeték SRB mikrobiológiai korróziós károsodását három vizsgálati módszerrel elemezte: a közeg kémiai összetételének elemzése, a csővezeték tömegvesztesége, ehhez egy $10 \times 10 \times 5$ mm dimenziójú próbatestről eltávolították a biofilmet és a korróziós közeget Clark-oldattal, majd tömegméréssel határozták meg a korrózió mértékét. A harmadik vizsgálati módszer a polarizációs teszt volt. A kiváltott csőszakasz további laboratóriumi vizsgálata során szkenningszkennelési elektronmikroszkópos (lásd 1. ábra) és röntgendiffrakciós (lásd 2. ábra) vizsgálatot is végeztek, amelyek bizonyították az SRB baktériumok jelenlétét.



1. ábra. SEM felvétel SRB korrodált felületről, és maga az SRB baktérium (Al-Sultani, et al. 2021).



2. ábra. SRB baktériumok kimutatása röntgendiffrakció segítségével (Al-Sultani, et al. 2021).

2.2. A mikrobiológiai korrózió vizsgálata laboratóriumi kísérletek segítségével

A mikrobiológiai korróziós reakciók oxidációkon és redukciókon alapulnak, amelyek egy és két elektron átadásával járnak. Ezek a reakciók mikroorganizmus/elektrolit, (közeg)/fém specifikusak. Számos közelmúltbeli publikációban az elektrokémia segítségével mutatták ki a fémspecifikus reakciókat azonos elektrolit/mikroorganizmus expozíció jelenlétében. A jelentések azt is megerősítik, hogy egyetlen mikroorganizmus egyetlen szubsztrátumon lévő tiszta kultúrájának elektrokémiai hatását az elektrolit befolyásolja. Például, a *Geobacter sulfurreducens* 304L jelű rozsdamentes acélra gyakorolt hatása függ az elektrondonor és az akceptor koncentrációjától (Little et al., 2020).

Néhány mikrobiológiai korrózióval foglalkozó szakember kutatja az abiotikus elektrolit-összetétel és a korróziós hatás közötti összefüggést. A kritikus lyukasztási potenciált az abiotikus elektrolitok korrozivitásának értékelésére használják az agresszív-anion és a gátló-anion arányának a segítségével. A lyuk- és a réskorrózió nem stabil egy elektrolit/fém kombináció esetében a kritikus lyukasztási potenciál alatti potenciálon. A lyukasztási potenciálok aktívabb (negatív) értékek felé tolódnak el, ha az arány nagyobb, mint 1, azaz az agresszív anionok (például Cl⁻) koncentrációja nagyobb, mint a gátló anionoké. Ezzel szemben a lyukasztási potenciál nemesebb (pozitív) értékek felé tolódik el a gátló anionok (például szulfátok, nitrátok, foszfátok és nitritek) megnövekedett szintje esetén. A mikrobiális növekedés számára tápanyagként és elektronakceptorként szolgáló oxianionok lehetnek korróziógátlók. Ahogy a mikroorganizmusok növekednek, megváltoztatják a gátló és az agresszív anionok koncentrációi közötti összefüggéseket, azaz az elektrolit korrodálóbba válhat. Zárt rendszerekben, vagy a környezet mikroszintjén a mikroorganizmusok a növekedés során folyamatosan változtatják ezeket az arányokat (azaz asszimilációs és disszimilációs reakciók). Ezen arányok kis

változásai drámaian befolyásolhatják az elektrolit korróziós hatását egy adott fémre (Little et al., 2020).

A laboratóriumi kísérletek célja egy adott mikrobiológiai oxidációs vagy redukciós reakció bemutatása a mikroorganizmusok/elektrolitok (közegek)/fémek és növekedési feltételek nagyon specifikus kombinációinak a kiválasztásával. A gyors mikrobiális növekedés biztosítása érdekében az elektrolitokhoz általában vitaminokat, ásványi anyagokat és más növekedésfokozókat (például élesztőkivonatot) adnak. Egyes mikrobiológiai korróziós kísérletekben akár 5 g/l élesztő-koncentrációt is használnak. Az élesztő azonban a felületeken szorbeálódik, kelátként kötődik a fémekhez, és elektronközvetítőket, például riboflavint is tartalmaz. Alternatívaként, más kutatók, élesztő helyett bizonyos vitamin-kombinációkat alkalmaznak, hogy stimulálják a mikroorganizmusokat. Számos laboratóriumi elektrokémiai mikrobiológiai-kísérlet meghatározott (gyakran kifejezetten a mikrobák növekedésére tervezett) táptalajjal és egy gondosan kalibrált, specifikus mikroorganizmusokból álló inokulummal kezdődik. A kísérleti körülmények azonban általában drasztikusan eltérnek a reális terepi/környezeti körülményektől, és jelentősen befolyásolhatják a vizsgálat eredményeit. A kísérlet végén az elektrokémiai tapasztalásokat a kísérlet elején bejuttatott mikroorganizmusoknak tulajdonítják. Fontos, hogy a felületen lévő mikroorganizmusok azonosságát ritkán, vagy egyáltalán nem ellenőrzik ténylegesen, vagyis azt, hogy a kísérlet nem volt-e szennyezett, ami megzavarja a vizsgálati eredményeket.

A laboratóriumi kísérleteket rendszeresen szegényesen jellemzett táptalajokon végzik, amelyeket további információk nélkül soha nem lehetne megismételni, különösen a növekedési faktorok koncentrációját illetően. Mivel nincsenek szabványok és nincsenek ajánlott gyakorlatok a laboratóriumi kísérletek elvégzésére, minden laboratórium hajlamos arra, hogy a mikrobiológiai kísérletekben a saját elektrolit receptjét használja. Ilyen körülmények között megbízható laboratóriumok közötti összehasonlításokat nem lehet végezni. Hasonlóképpen, mivel nincsenek szabványok a kísérleti eljárások részleteinek jelentésére, az eredmények független ellenőrzésére is kevés lehetőség van.

Az elektrokémiai technikák általában egy felületre kiterjedő, átlagos jelet produkálnak, míg a mikrobiológiai korrózió egy lokalizált jelenség. A külső jeleket nem, vagy csak kis mértékben igénylő elektrokémiai technikákat használják annak bizonyítására, hogy a mikrobiológiai korrózió sokféle közegben és mikroorganizmusban előfordulhat, de nem szolgáltatnak mechanisztikus információkat. Ilyen információkat a nagy jelű polarizációs technikákból lehet nyerni, amelyek több száz millivolt és több volt közötti potenciál letapogatást igényelnek. A nagy jelpolarizációk azonban irreverzibilis változásokat okoznak a felületi tulajdonságokban, és megzavarhatják a biofilmeket. A korrózió értékelésére szolgáló elektrokémiai technikákat általában tápanyagban gazdag közegben végezték, amely nem közelíti meg a természetes vagy az ipari szempontból releváns elektrolitokat, és amelynél nehéz/lehetetlen a steril kontrollok fenntartása. A mikrobiológusok és az elektrokémikusok közötti kommunikációt megnehezítette az azonos, de eltérő jelentésű kifejezések használata, például közvetlen elektrontranszfer (Little et al., 2020).

3. Mikrobiológiai korróziós folyamatok ellenőrzése, kontrollálása

A mikrobiológiai folyamatok monitorozására (Videla, 2001) két fő típust különít el: az egyik típus közvetlenül a rendszerbe, a másik típus pedig a mellékáramlatba integrált. A közvetlenül integrált rendszerek a nagynyomású rendszerben felügyelik a megtelepedő baktériumokat, anélkül, hogy

nyomáscsökkenést okoznának. A mellékáramlatba integrált rendszerek a fő ággal párhuzamosan futnak, attól teljesen elszigetelve, a csőben áramló közeg egy részét monitorozva. Ennek a típusú monitorozásnak az az előnye, hogy teljesen független a fő közeg szállítástól és további laboratóriumi vizsgálatokra közvetlenül információk gyűjthetők.

Little és szerzőtársai szintén közvetlenül az áramló közeg útjában elhelyezhető szondákat részesítik előnyben, mert ezekkel korán észlelhető a biofilm keletkezése, illetve bakteriális érintettség esetén a szonda kivehető és laboratóriumi vizsgálatok végezhetőek (Little et al. 2020). A hagyományos szondákat (BIOGEORGE, BIOX és ALVIM) úgy tervezték, hogy a biofilm jelenlétét detektálják (Licina et al., 1999; Bruijns et al., 2001; Cristiani, 2008; Carvalho et al., 2013; Cristiani, 2014; Cristiani et al., 2014; Pavaello et al., 2010).

A szondák különböző kialakításúak, de mindegyik a biofilmre adott elektrokémiai választ méri. Azok az iparágak, amelyek közvetlen kapcsolatot mutattak ki a biofilmek kialakulása, az elektrokémiai válasz és az anyagok mikrobiológiai korróziója között, a biofilm-monitorokat használhatják a megelőző intézkedések ütemezéséhez, például, csőgörények alkalmazása vagy biocidok hozzáadása. Iannucci és munkatársai elektroaktív baktériumok monitorozására egy olyan rendszert javasoltak, amely, a baktériumon, mint üzemanyag-cellán keresztül áramló áram mérésén alapul (Iannucci et al., 2019).

4. Mikrobiológiai korrózió elkerülése, megelőzése

A mikrobiológiai korrózió első jeleinek detektálásakor szinte azonnal szükséges a higiéniai kezelés. Erre vonatkozóan azonban nem találunk a szakirodalomban ajánlást, legfeljebb a biocidok alkalmazását. Nem igazán volna megoldás az érintett terület kiváltása sem, hiszen amellet, hogy rendkívül költséges, a környezet ugyanaz marad, a kiváltott részek hasonló módon újra ki lennének téve a mikrobiológiai korrózióknak (Ibrahim et al., 2018). A biocidok alkalmazása azonban újabb problémákhoz vezethet, lehetnek túlélő baktériumok, amelyek így ellenállóvá válhatnak egy későbbi beavatkozás biocidjére, illetve maga az alkalmazott méreganyag sem kerül tisztításra a későbbiekben. Mindezekon túlmenően, a baktériumok elpusztítása nem egyenlő a fertőzött terület tisztításával. A visszamaradó biomassza még deaktivált állapotban is befolyásolhatja a korrózió lefolyását abiotikusan és heterogenitásokat hoz létre a felületen (Enning et al., 2014; Liengen et al., 2014).

Léteznek fizikai kezelések is, mint például egy detektált mikrobiológiai korróziós kolónia mechanikai eltávolítása akár tisztítógörény segítségével. Ez a módszer csak a görényezhető csővezetékek esetében használható. Amennyiben nem passziválták például foszfáttal, a görényezés potenciálisan fel is gyorsíthatja a korróziót (Verleun, 2004). További fizikai kezelés az UV sugárzás alkalmazása, azonban ez a módszer – bár nagyon hatékony a mikroorganizmusok ellen – többnyire gyakorlatilag nem használható, mert a sem a csővezeték külső szigetelt része, sem a belső fala nem sugározható be UV sugárzással.

Az ultrahang elméletileg kavitációs buborékokat hoz létre a vízben, amelyek – amikor kipukkannak – károsan hatnak a mikroorganizmusokra. Azonban ez a módszer csak egy ajánlás maradt, mert az ultrahang energiáját drasztikusan csökkenti a korrodált réteg jelenléte (Pound et al., 2005).

A hagyományosan alkalmazott kémiai kezelés (Khan et al., 2021) során az az általános felfogás, hogy széles spektrumú biocidokat alkalmaznak, amelyek a lehető legtöbb mikroorganizmust elpusztítják. Egy további probléma, hogy a biocidoknak a biofilmen belül kell hatniuk a

mikroorganizmusokra, ahol a sejtek sokkal toleránsabbak, mint a planktonikus esetekben (Flemming et al., 2016)

A biológiai módszerek egyik alap gondolata, hogy gátolják a korróziót támogató baktériumok aktivitását nem MIC-asszociált mikroorganizmusok segítségével. Ez az elképzelés azon a megfigyelésen alapul, hogy nem minden baktérium okoz korróziót. A "mikrobiológiailag befolyásolt korrózió" kifejezés elismeri, hogy egyes mikroorganizmusok bizonyos közegekben gátolhatják (Kim et al., 2018) vagy akár átalakíthatják az olyan reaktív korróziós termékeket, mint a goethit vagy a lepidokrokit, olyan stabil ásványokká, mint például a vivianit és sziderit (Kooli et al., 2019). Meg kell jegyezni azonban, hogy a mikroorganizmusok általi korróziógátlásra vonatkozó biológiai módszerek egyike sem érte el a gyakorlati alkalmazást és a sikert.

Bármilyen bevonat, amely elszigeteli a korrózióra hajlamos felületeket az elektrolittól, némi korrózióvédelmet biztosít. A mikrobiológiai korrózióval szembeni védelemre jellemzően olyan bevonatokat használnak, amelyeket már korábban is használtak a hagyományos korrózióvédelem során, például poliuretánok, fluorozott vegyületek, epoxigyanták, poliimidek, szilikonok, kőszénkátrányos epoxik, polivinil-kloridok és amorf fémek (Abdolahi, 2014). A bevonatokkal az a probléma, hogy mechanikusan sérülhetnek, valamint biológiailag lebomolhatnak, és az így keletkező hibák gyorsan a lokális korrózió aktív anódos helyévé válhatnak, amelyek vonzhatják a mikroorganizmusokat.

A katódos védelem önmagában nem elegendő védelem a biofilm képződés megelőzésére. Ha már biofilm képződött, a mikrobiológiai korrózió nem fékezhető meg a segítségével, kivéve, ha az alkalmazott potenciál sokkal negatívabb, mint a szabványos ipari potenciál, ami viszont megnövekedett üzemeltetési költségeket jelent.

A fém felületek polarizációja megakadályozhatja azt a mechanizmust, amellyel a baktériumok befolyásolják a korróziót. A polarizáció vagy a feszültség megfordítása minimalizálhatja az elektronátvitelt a fém szubsztrátumok között, és gátolhatja azokat a mikroorganizmusokat, amelyek anyagcseréje az extracelluláris elektrontranszportra támaszkodik. A mikrobiális elektrontranszportnak a fémes szubsztrátummal való megfordítására szolgáló potenciális polírozás szintén ígéretes technika lehet a mikrobiológiai korrózió mérséklésére (Little et al., 2020).

Végül meg kell említenünk, hogy a korróziós problémák nagymértékben minimalizálhatók a megfelelő anyagválasztással (Kahn et al., 2021). A mikrobiológiai korrózió előfordulások esetében, ahol a korrózió hatás általában helyi jellegű, az első kritérium az anyaggal szemben a helyi korrózióval, például a lyuk- és a réskorrózióval szembeni nagyfokú ellenállás. Számos olyan tényező létezik, amelyek befolyásolhatják a mikrobiológiai korrózióknak kitett anyagok élettartamát. Ezek közül néhány: a szerkezeti anyagok tervezési előírásai, a gyártási folyamat, az üzemeltetés és a karbantartás, valamint a környezeti feltételek. A megfelelő anyagválasztásnak megfelelő tervezéssel kell párosulnia, például a rendszer (geometriai) kialakítása nem szabad, hogy elősegítse a korróziót a rések, a pangó körülmények és a nem megfelelő vízelvezetés révén. Továbbá, még a megfelelő anyagválasztás mellett is mindig szükség van a mikrobiológiai korrózió elleni kiegészítő intézkedésekre, mint például bevonat, biocidok, inhibitorok és katódvédelem.

5. Összefoglalás

Az olaj- és gázipar számára a mikrobiológiai korrózió jelensége nem ismeretlen. A helyszíni diagnosztizálása és a laboratóriumi kísérletei, illetve az azokhoz használt vizsgálati módszerek ennél a

típusú károsodásnál különbözőek. A helyszínen alkalmazható módszerek egyike a meghatározott típusú mikroorganizmusok DNS és ATP azonosításán alapszik. Az úgynevezett mineralógiai ujjlenyomat egyértelmű bizonyítékot szolgáltat a mikrobiális korrózió jelenlétére. Továbbá a biomineralizáció eredményeként amorf, instabil ásványok keletkezhetnek, amelyeknek azonosítása speciális folyamat eredménye. A laboratóriumi vizsgálatok során, ellenőrzött körülmények között, mesterségesen előállított korróziós környezetben, 28-30 napos korróziós vizsgálatok folynak, amelynek eredményét nem lehet összefüggésbe hozni a terepen tapasztalt korróziós folyamatokkal.

Az irodalom áttekintése alapján megállapítható, hogy a MIC-kutatásban számos hiányosság van – például a laboratóriumi és a terepi expozíciós körülmények közötti különbség, a mikrobiológusok és az elektrokémikusok közötti kommunikációs szakadék, valamint a laboratóriumi kísérletekből származó, MIC-ről szóló közzétett jelentések és a reprodukálható eredmények közötti szakadék. A téma további kutatása mind a terepen, mind laboratóriumi körülmények között a jövőben is fontos feladat.

Irodalom

- [1] Videla, A. H. (2001). Microbially induced corrosion: an updated overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 48, 176-201. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00081-6)
- [2] Stott, J. P. G. (1993). What progress in the understanding of microbially induced corrosion has been made in the last 25 years? A personal viewpoint. *Corrosion Science*, 35, 667-673. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90202-R](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90202-R)
- [3] Little, B. J., Blackwood, D. J., Hinks, J., Lauroc, F. M., Marsilic, E., Okamoto, A., Rice, S. A., Wade, S. A., Flemming, H. C. (2020). Microbially influenced corrosion – Any progress? *Corrosion Science*, 170, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
- [4] Videla, H. (2002). Prevention and control of biocorrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 259-270. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00053-7)
- [5] Little, B. J., Lee, J. (2015). Microbially influenced corrosion: an update. *International Materials Reviews*, 59, 384-393. <https://doi.org/10.1179/1743280414Y.3840000000035>
- [6] Lee, J. S., Little, B. L. (2020). *Microbiological Effects*. ASTM Publication MNL20 Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation, 3rd edition.
- [7] Flemming, H.-C., Heitz, E., Sand, W. (1996). Checklist for the recognition of MIC. In: E. Heitz, W. Sand, H.C. Flemming (Eds.), *Microbially Influenced Corrosion of Materials - Scientific and Technological Aspects*. (1st ed., pp. 461-463). Springer, Heidelberg.
- [8] Kearns, J. R., Little, B. J. (1994). *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*. ASTM, Philadelphia, Publ. Code No. 04-012320-27.
- [9] Al-Awahdi, H., Dashti, N., Khanafer, M., Al-Mailem, D., Ali, N., Radwan, S. (2013). *Bias problems in culture-independent analysis: a representative study on hydrocarbonoclastic bacteria*. Springer Plus, 2, 369. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-369>
- [10] Mendili, Y. E., Abdelouas, A., Bardeau, J. F. (2013). Insight into the mechanism of carbon steel corrosion under aerobic and anaerobic conditions. *Physical Chemistry Chemical Physics* 15, 9197-9204. <https://doi.org/10.1039/C3CP50853F>
- [11] Gerke, T. L., Scheckel, K. G., Ray, R. I., Little, B. J. (2012). Can dynamic bubble templating play a role in corrosion product morphology? *Corrosion*, 68(2):025004-7. https://doi.org/10.5006/1.3683226_025004-1-025004-9

- [12] McNeil, M. B., Jones, J. M., Little, B. J. (1991). Production of sulfide minerals by sulfatereducing bacteria during microbiologically influenced corrosion of copper. *Corrosion*, 47, 674–677. <https://doi.org/10.5006/1.3585306>
- [13] Jack, T. R. (2002). *Biological Corrosion Failures*. In: *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention* (2nd ed., pp. 881–890). ASM International.
- [14] McNeil, M., Little, B. J. (1992). Corrosion mechanisms for copper and silver objects in near surface environments. *Journal of the American Institute for Conservation*, 31, 355–366. <https://doi.org/10.1179/019713692806066574>
- [15] Linhardt, P. (2010). Twenty years of experience with corrosion failures caused by manganese oxidizing microorganisms. *Materials and Corrosion*, 61, 1034–1039. <https://doi.org/10.1002/maco.201005769>
- [16] Emerson, D. (2019). The role of iron oxidizing bacteria in biocorrosion: a review. *Biofouling*, 34, 989–1000. <https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1526281>
- [17] Lee, J. S., Little, B. J. (2019). A mechanistic approach to understanding microbiologically influenced corrosion by metal-depositing bacteria. *Corrosion*, 75, 6–11. <https://doi.org/10.5006/2899>
- [18] Licina, G. J., Carney, C. A. (1999). *Monitoring Biofilm Formation and Incipient MIC in Real Time*. Paper 175, NACE Int., Houston. <https://www.onepetro.org/conference-paper/NACE-99175>
- [19] Bruijs, M. C. M., Venhuis, L. P., Jenner, H. A., Daniels, D. G., Licina, G. J. (2001). Biocide optimization using an on-line biofilm monitor. *Journal of Power Plant Chemistry*, 3, 400–405. <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/2324/articles/2871/Biogeorge.pdf>
- [20] Cristiani, P., Perboni, G., Debenedetti, A. (2008). Effect of chlorination on the corrosion of Cu/Ni/70/30 condenser tubing. *Electrochimica Acta* 54, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.05.081>
- [21] Carvalho, M., Cristiani, P., Perboni, G. (2013). Monitoring by an electrochemical integrated system the corrosion antifouling treatment on aluminum brass condenser tubes. *ECS Transactions*, 50, 267–274. <https://doi.org/10.1149/05031.0267ecst>
- [22] Cristiani, P. (2014). Risk assessment of biocorrosion in condensers, pipework and other cooling system components. In: T. Liengen, R. Basseguy, D. Feron, I. Beech, V. Birrien (Eds.), *Understanding Biocorrosion. Fundamentals and Applications* (pp. 357–384). Woodhead Publishing, Cambridge.
- [23] Cristiani, P., Perboni, G. (2014). Antifouling strategies and corrosion control in cooling circuits. *Bioelectrochemistry*, 97, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.01.002>
- [24] Pavanello, G., Faimali, M., Pittore, M., Mollica, A. (2011). Exploiting a new electrochemical sensor for biofilm monitoring and water treatment optimization. *Water Research*, 45, 1651–1658. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.003>
- [25] Iannucci, L., Parvis, M., Cristiani, P., Ferrero, R., Angelini, E., Grassini, S. (2019). Novel approach for microbial corrosion assessment. *IEEE1570417904, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68, 1424–1431. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2905734>
- [26] Ibrahim, A., Hawboldt, K., Bottaro, C., Khan, F. (2018). Review and analysis of microbiologically influenced corrosion: the chemical environment in oil and gas facilities.

- Corrosion Engineering, Science and Technology*, 53, 549–563. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1511326>
- [27] Enning, D., Garrelfs, J. (2014). Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. *Applied and Environmental Microbiology*, 80, 1226–1236. <https://doi.org/10.1128/AEM.02848-13>
- [28] Liengen, T., Féron, D., Basseguy, R., Beech, I. B. (2014). *Understanding Biocorrosion*. Eur. Fed. Corr. Publ. 66, Elsevier Publ.
- [29] Verleun, T. (2004). *Cleaning of Oil and Gas Pipelines*. Pigging Products and Services Association (PPSA). www.ppsa-online.com/papers.php
- [30] Pound, B. G., Gorfu, Y., Schattner, P., Mortelmans, K. E. (2005). Ultrasonic mitigation of microbially influenced corrosion. *Corrosion*, 61, 452–463. <https://doi.org/10.5006/1.3280645>
- [31] Flemming, H.-C., Wingender, J., Szewzyk, U., Steinberg, P., Rice, S.R., Kjelleberg, S. (2016). Biofilms: an emergent form of microbial life. *Nature Reviews Microbiology*, 14, 563–575. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- [32] Kim, J.-S., Chowdury, N., Yamasaki, R., Wood, T. K. (2018). Viable-but-nonculturable and persister describe the same bacterial stress stage. *Environmental Microbiology Reports*, 20, 2038–2048. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14075>
- [33] Kooli, W. M., Junier, T., Shakya, M., Monachon, M., Davenport, K. W., Vaideeshwaran, K., Vernudachi, A., Marozau, I., Monrouzeau, T., Gleasner, C. D., McMurry, K., Lienhart, R., Rufener, L., Perret, J.-L., Sereda, O., Chain, P. S., Joseph, E., Junier, P. (2019). Remedial treatment of corroded iron objects by environmental *Aeromonas* isolates. *Applied and Environmental Microbiology*, 85. <https://doi.org/10.1128/AEM.02042-18 e02042-e8>
- [34] Abdolahi, A., Hamzah, E., Ibrahim, Z., Hashim, S. (2014). Application of environmentally friendly coatings toward inhibiting the microbially influenced corrosion (MIC) of steel: a review. *Polymer Reviews*, 54, 702–745. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.946188>
- [35] Al-Sultani, K. F., Khulief, Z. T., Hasan, A. A. (2021). Characterization of microbiological influence corrosion for API 5L X46 pipeline by sulphate-reducing bacteria (SRB). *Materials Today: Proceedings* 42, 2169–2176. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.301>
- [36] AlAbbas, F. M., Williamson, C., Bholá, S. M., Spear, J. R., Olson, D. L., Mishra, B., Kakpovbia, A. E. (2013). Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.10.014>
- [37] Li, Q., Wang, J., Xing, X., Hu, W. (2018). Corrosion behavior of X65 steel in seawater containing sulfate reducing bacteria under aerobic conditions. *Bioelectrochemistry*, 122, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.03.003>
- [38] Khan, M. A. A., Hussain, M., Djavanroodi, F. (2021). Microbiologically influenced corrosion in oil and gas industries: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 80–106. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-5>

VENTILÁTOR JÁRÓKERÉK KIEGYENSÚLYOZÁSÁRA SZOLGÁLÓ KLIPSZ FEJLESZTÉSE ÉS JÁRÓKERÉK KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Ebben a cikkben összefoglalásra kerülnek a kiegyensúlyozó klipszek fejlesztési lehetőségei és azok eredményei. A kutatás egyik fő iránya a Robert Bosch Energy and Body Systems Kft.-től kapott forgó elem kiegyensúlyozásánál használt „S” klipsz súlyának csökkentése. Az újonnan kifejlesztett klipsz geometriák értékelése végeselemes modellezéssel történt, az eddig használt klipszek alapján. Az egyes geometriák alkalmassága a klipszek nyitóereje alapján került összehasonlításra. Annak biztosítására, hogy a használatban lévő klipszek szimulációi a valóságot tükrözzék, egy klipsz nyitóerő mérőberendezés került megtervezésre és legyártásra. A meglévő klipszekkel elvégzett szimulációk alapján kialakításra került egy „ATI” klipsz, amelynél vizsgáltuk a klipsz és a járókerék kapcsolatát is. A fizikai vizsgálatok lényege a klipsz szerelése közben létrejövő alakváltozásainak az elemzése volt.

Kulcsszavak: ventilátor járókerék, kiegyensúlyozó klipsz

Abstract

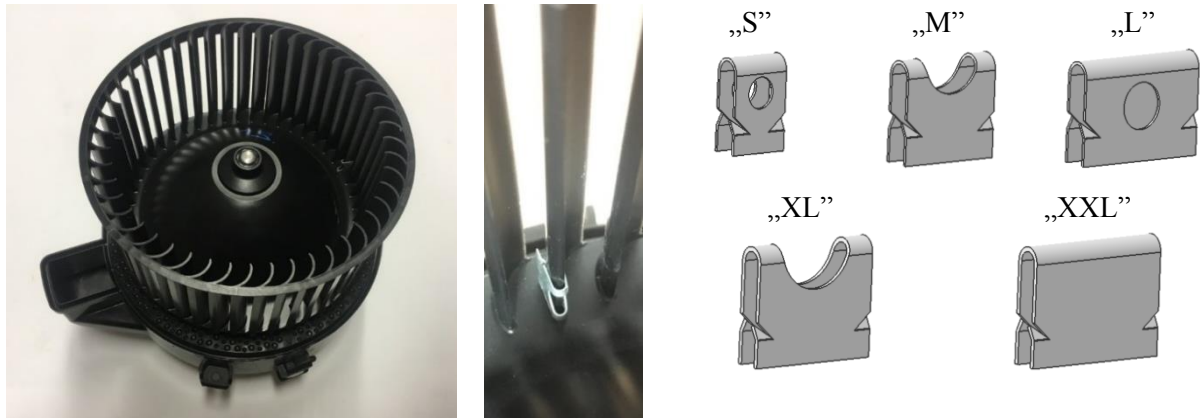
In this article the possibilities for the development of balancing clips and their results during the FIEK project were summarized. One of the main directions of the research is to reduce the weight of the "S" clip used to balance the rotating element received from Bosch. The newly developed clip geometries were evaluated using finite element modeling based on the clips used so far. The suitability of each geometry was compared based on the opening force of the clips. Based on the simulations performed with the existing clips, a new clip was created and named "ATI". The connection of the new clip and the impeller was also examined. The essence of the performed physical tests is the analysis of the deformation of the clips created during the installation of the impeller on the blade.

Keywords: ventilator impeller, balancing clips

1 Bevezetés

A Miskolci Egyetem és a Robert Bosch Energy and Body Systems Kft. (továbbiakban: Bosch) együttműködésével az autóiparban alkalmazott járókerék fejlesztése folyt a FIEK kutatás-fejlesztési program keretein belül. Célja a járókerék működés közbeni zaj- és vibrációs szintjének csökkentése volt, amely több párhuzamosan futó kutatási programban valósult meg. A bemutatásra kerülő kutatás célja az új geometriával – az eredeti szériaterméknel alkalmazott technológiák segítségével – megvalósuló termék kiegyensúlyozásra szolgáló klipszek fejlesztése.

A kutatás egy radiális járókerék fejlesztésére irányul, amelyet a gépjárművek klímarendszerében alkalmaznak. A BDLC modulhoz fröccsöntéssel készülő járókerékre egy példa az 1. ábrán látható. Az egyes alkatrészekben fröccsöntés során létrejövő inhomogenitások üzemi körülmények között rezgéseket hozhatnak létre, amelyek különösen nagy fordulatszámokon károsodásokat okozhatnak. Ahhoz, hogy elkerüljék az üzemeltetés során a stabilitásvesztést, illetve ennek következményeit, kiegyensúlyozó acél-klipszeket alkalmaznak.



1. ábra. A járókerék, a rajta elhelyezett kiegyensúlyozó klipsz és a kiegyensúlyozásra szolgáló acél klipszek 3D modelljei (forrás: Robert Bosch Energy and Body Systems Kft.).

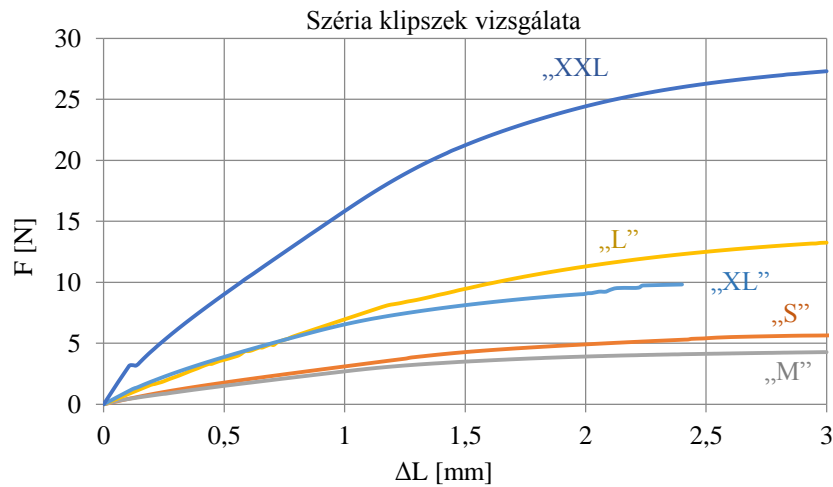
Ezek a klipszek a járókerék lapátjaira, illetve a fém rotoron egy, a tengelyre merőlegesen elhelyezkedő részére kerülnek fel. A kiegyensúlyozás elvégzéséhez különböző méretű és geometriájú klipszek állnak rendelkezésre. A vizsgálat tárgyát képező járókerék kiegyensúlyozására öt különböző tömegű klipszet alkalmazhatnak (1. ábra).

A járókerékre maximum hat darab klipszet helyezhetünk el és egy lapátra nem szerelhetünk egynél több klipszet, azaz a klipszek járókeréken való elhelyezésének vannak korlátai. Amennyiben az alkalmazott klipszvariációk számát növeljük, akkor a kiegyensúlyozási lehetőségek növekednek, és ez pontosabb kiegyensúlyozást eredményez. Az is előfordulhat, hogy ezáltal kevesebb klipszet kell alkalmazni, ami jelentős költségmegtakarítást eredményezhet.

2 Ventilátorkerék kiegyensúlyozásánál használt klipszek vizsgálata

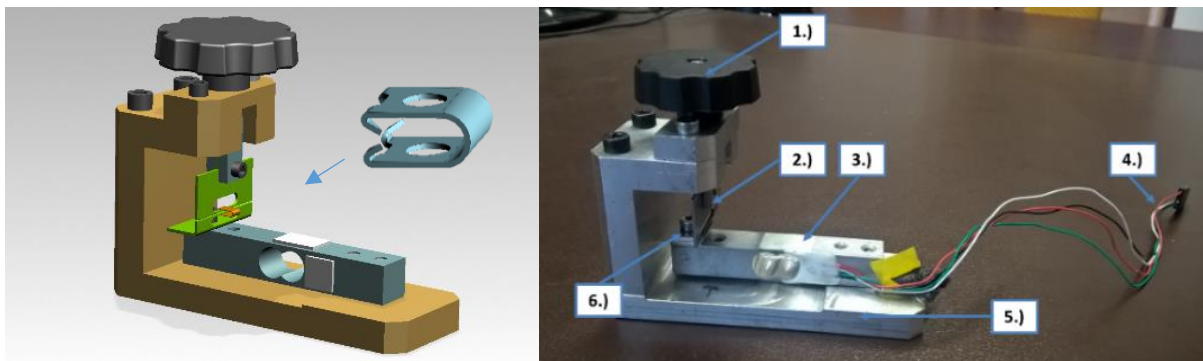
A kutatás egyik fő iránya ventilátorkerék kiegyensúlyozásánál használt klipszek tömegének csökkentése. A fejlesztés alapvető irányát a jelenlegi legkisebb, „S” elnevezésű klipsz tömegének csökkentése jelölte ki.

Az új klipszek 3D modelljeinek elkészítése után az első feladatunk a gyárthatósági elemzés volt. Az újonnan kidolgozott geometriák értékelését végeselemes modellezéssel végeztük el, az eddig elkészült használatban lévő széria klipszek alapján. Amennyiben létrehozunk a valóságot tükröző szimulációt, az új klipszek tulajdonságainak ellenőrzése az előző modellezés alapján végrehajtható lesz. Az alkatrész szerelésekor az általa kifejtett szorítóerő megegyezik a két párhuzamos oldalának nyitásához szükséges erővel, azaz a nyitóerővel, ezért az egyes geometriák megfelelőségét, összehasonlítási alapját ennek meghatározásával végeztük el. A modellezés során létrejött nyitóerő-elmozdulás ($F-\Delta L$) összefüggéseket mutatja a 2. ábra.



2. ábra. Leggyakrabban alkalmazott klipszek nyitóerő-elmozdulás diagramja.

Annak eldöntésére, hogy a használatban lévő klipszek szimulációi a valóságot tükrözik-e, vagy sem, egy klipsz nyitóerő mérőberendezést terveztünk meg és gyártottunk le. A berendezés használati mintaoltalomra került a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatalnál. A modellezések alapján megtervezett mérőkészülék 3D-s modelljét és a legyártásra került mérőberendezést a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. Kiegyensúlyozó klipsz nyitóerő mérőberendezés.

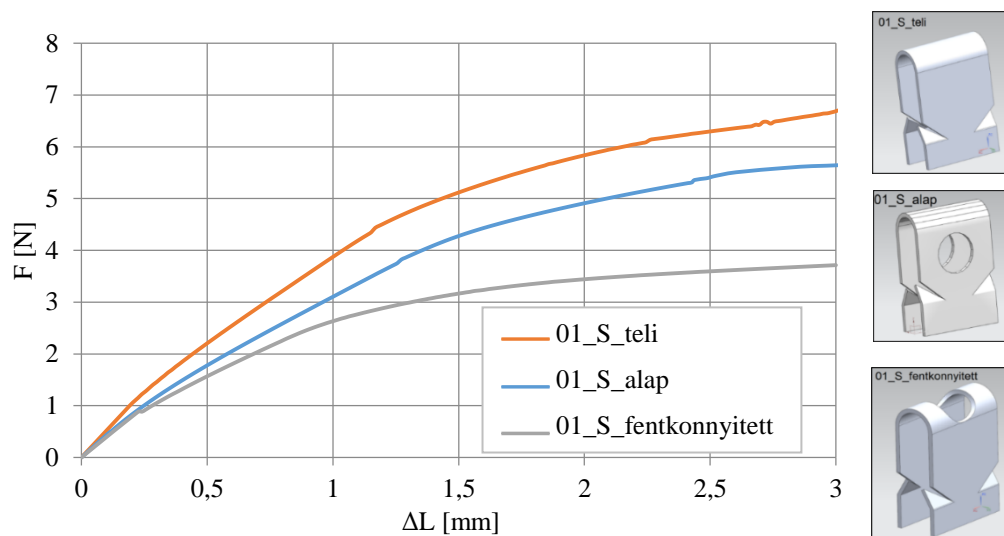
A vizsgálat során három referenciapontban történt mérés, és mindegyik klipszen öt-öt mérést végeztünk. A mérettípusonként kapott értékek átlagát, az egyes nyitási pozíciókban, az 1. táblázat tartalmazza. A virtuális és fizikai mérések jó egyezést mutattak.

1. táblázat. A mérettípusonként kapott nyitóerő értékek átlaga [N].

Nyitási pozíció [mm]	S	M	L	XL	XXL
1	2,79	2,675	6,309	6,346	13,15
1,5	4,204	4,064	9,875	9,786	20,69
2	5,75	5,549	13,58	12,85	29,04

2.1 Új klipsz fejlesztése

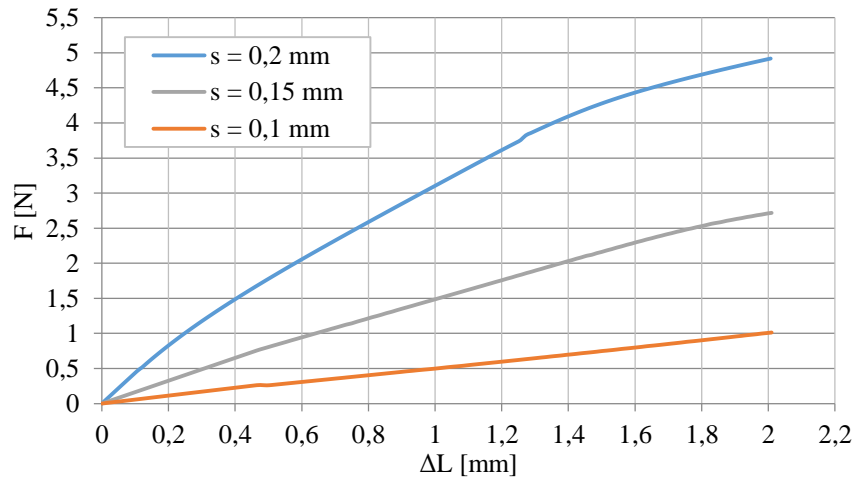
Mivel az újonnan tervezett klipszok jelentős változatosságot mutathatnak a geometriai kialakításukban, célszerűnek tartottuk az egyes könnyítő elemek (furat, illetve könnyítés) hatásának vizsgálatát. A könnyítés hatásának vizsgálatát az „S” klipsz alapján végeztük el, a 4. ábra szerint. Fontos megemlíteni, hogy ennél a vizsgálatnál a térfogat-állandóságot nem vettük figyelembe, csak a könnyítéseket módosítottuk.



4. ábra. Könnyítések hatása az „S” klipszre.

A 4. ábraán három kialakítás nyitóerő-elmozdulás (F-ΔL) diagramja látható, referenciának a szerelés során alkalmazott „S” geometriát tekintettük, amelynek a lap részén furat található. Az „S” alap geometriához képest nagyobb nyitóerő-elmozdulás értékeket adott az „S” teli klipsz. A legkisebb nyitóerő az „S” fent könnyített klipsz esetében mérhető. Ahogy arra már a 4. ábra alapján számítani lehetett, a hajlított részen elhelyezett furat jelentősen csökkenti a nyitási erőt. Az ábra alapján az a következtetés vonható le, hogy amennyiben a tömeg csökkentésére van szükség, célszerűbb ezt az oldalsó párhuzamos felületeken történő furatok elhelyezésével végrehajtani, ugyanis ezek kisebb mértékben csökkentik a szorítóerőt, mint a hajlított hosszban elhelyezett furatok.

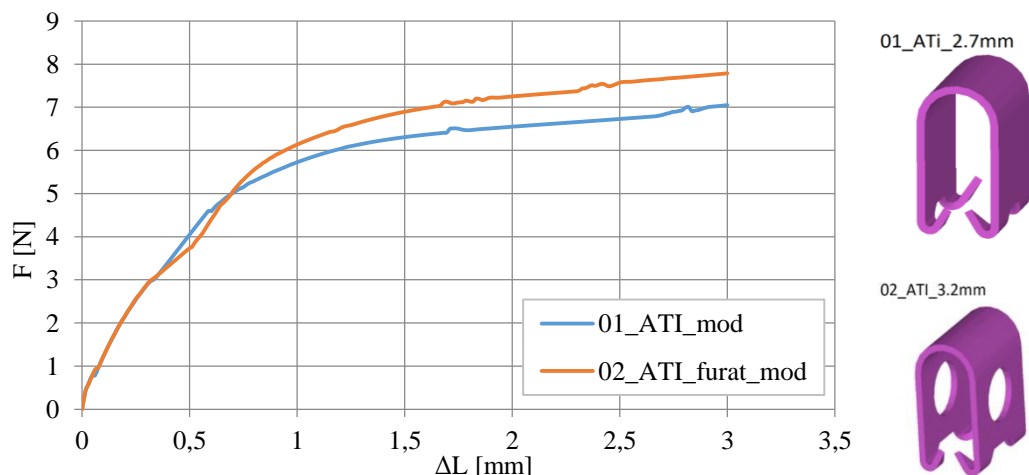
A klipsz tömegének csökkentésének legegyszerűbb módja az lenne, ha az adott klipsz geometriát egy, az eddiginél vékonyabb lemezből gyártanánk le, a pillanatnyilag 0,2 mm vastagságú lemez helyett tehát 0,1 mm-es lemezt vastagságot alkalmaznánk. A 5. ábra alapján egyértelműen látszik, ahogy arra számítani lehetett, a csökkenő lemezt vastagság csökkenő nyitási erőket eredményez.



5. ábra. Lemezvastagság változtatásának hatása.

A jelenleg alkalmazott 0,08 g-os klipsz szorítóereje 2 mm-es nyitás esetén 4,8 N. Az elvárás az lenne, hogy a fele akkora tömegű, 0,04 g-os klipsz szorítóereje ennek az értéknek legalább a felét érje el. A feleakkora lemezvastagsághoz ezzel szemben 1 N-os szorítóerő tartozik. Az 5. ábraán bemutatott három mérés eredménye alapján tehát arra lehet következtetni, hogy a lemezvastagság csökkentése, bár a tömegcsökkentésnek ez a legegyszerűbb módja, hatványozottan csökkenti a szorítóerőt, amely nem megengedhető a klipszek lerepülése miatt. Ezek alapján kijelenthető, hogy amennyiben lehetőség van rá, a lemezvastagság csökkentését el kell kerülni.

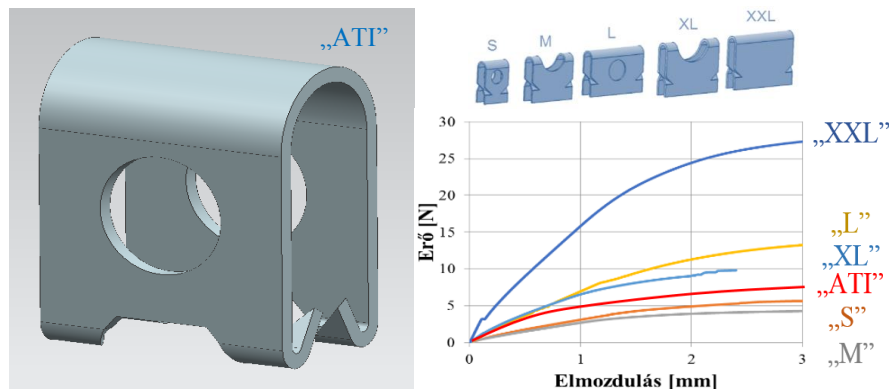
A meglévő klipszekkel elvégzett szimulációk alapján levont következtetéseket az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben (ATI) tervezett klipszekben is felhasználtuk, emellett a támasztófülek kialakítását is jelentősen megváltoztattuk az eddigiekhez képest, a lehető legstabilabb rögzítés elérése érdekében. Az „ATI”- névre keresztelt klipszek összehasonlítását a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézete által tervezett klipszek nyitóerő-elmozdulás diagramjai.

A 6. ábraán 01_ATI néven az Intézetben tervezett első klipsz látható. Ennek lényege, hogy egy, a derékszögnél nagyobb szögben történő hajlítással érjük el a fülek pozícióját, ezzel növelve jelentősen a támasztófülek merevségét. Az ábrán jól látható, hogy a térfogat-állandóság figyelembevételével, amennyiben a síklapokon furatot helyezünk el, a szorítóerőt leginkább befolyásoló egységet, a hajlított rész hosszát majdnem 0,5 mm-rel lehet megnövelni, ami a szorítóerőben is majdnem 1 N-os növekedést eredményez.

A vizsgálatok eredményeként az egyik legjobbnak ítélt Miskolci Egyetem által kialakított klipsz prototípusa legyártásra is került (7. ábra), amelyek üzemi körülmények között is jól szerepeltek.

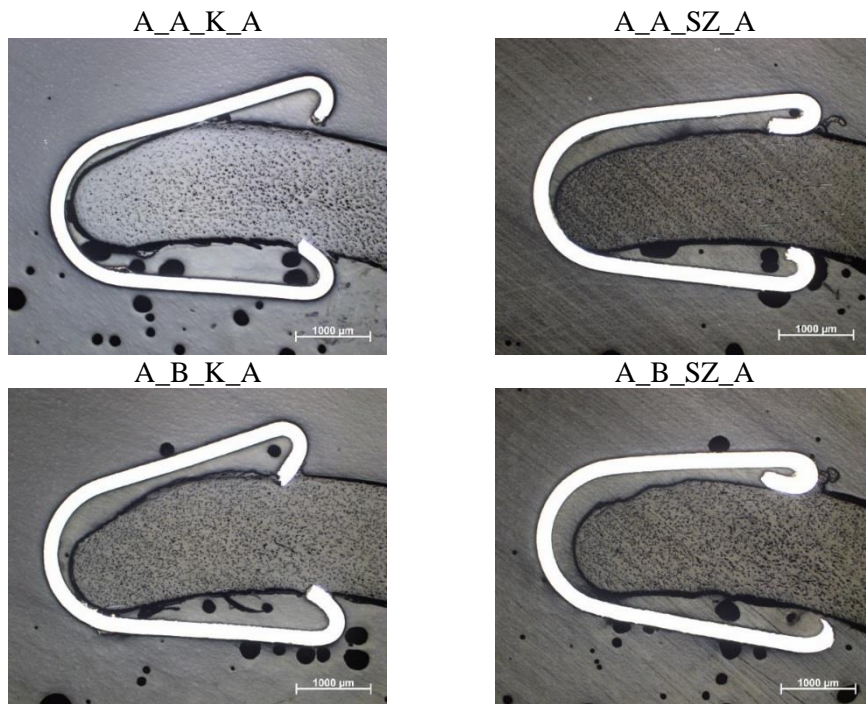


7. ábra. A Miskolci Egyetem Anyagszerkeztetani és Anyagtechnológiai Intézete által tervezett klipsz és annak elhelyezkedése a leggyakrabban alkalmazott klipszek nyitóerő-elmozdulás diagramjában.

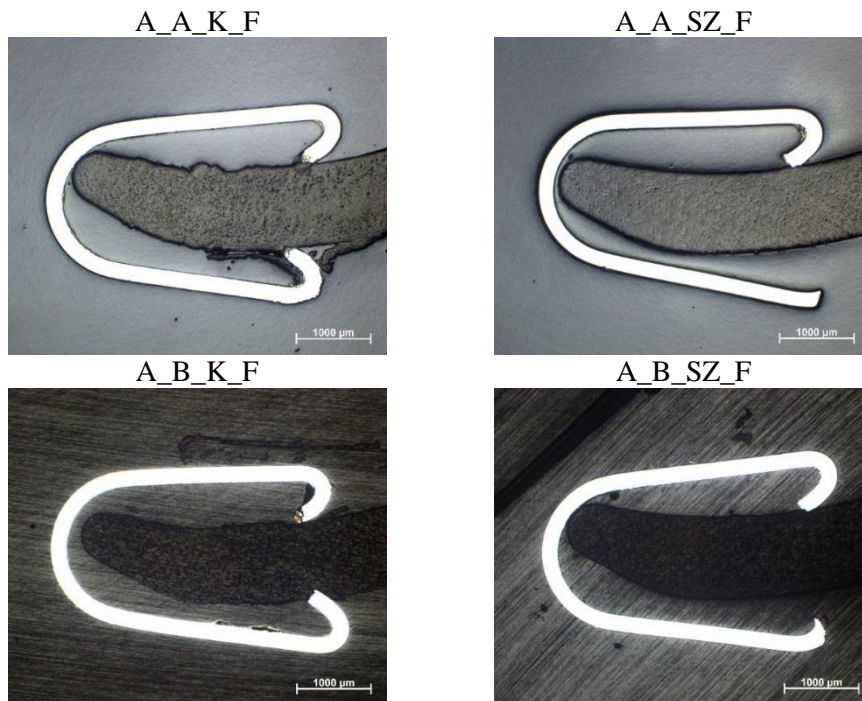
2.2 Kifejlesztett klipsz járókerék kapcsolata

Az új „ATI” klipszek járókerék kapcsolatának vizsgálata érdekében a Bosch munkatársai a gyártósoron klipszeket helyeztek fel a ventilátor járókerék lapátok alsó és felső síkjára, amelyet átadtak számunkra elemzésre. A vizsgálat lényege, a klipszek alakváltozásának elemzése a járókerék lapátjára történő szerelése közben, a lapát felületén létrejövő karcok, esetlegesen kialakuló mikrorepedések vizsgálata.

A minták gyantába öntését követően csiszolókat készítettünk. A próbatestekről készült legjellemzőbb képeket a következő ábrákon mutatjuk be. A 8. ábra a járókerék lapát alsó síkjára, míg a 9. ábra a járókerék lapát felső síkjára felszerelt „ATI” klipszekről készült N = 25x-ös nagyítású mikroképeket mutatja. A próbák azonosítása céljából a következő jelölésrendszert alkalmaztuk. Első jel a klipsz nevét jelöli (ATI), a második a klipsz felszerelésének típusát (A- hosszabb oldal a domború részen, B - hosszabb oldal a homorú részen), a harmadik a felszerelés módját (K - kézzel, SZ - szerszámmal), a negyedik pedig a klipsz felszerelésének a helyét (A - lapát alsó síkja, F - a lapát felső síkja) jelenti.



8. ábra. A járókerék lapát alsó síkjára felszerelt klipszokről készült $N = 25\times$ -ös nagyítású mikroképek.



9. ábra. A járókerék lapát felső síkjára felszerelt klipszokről készült $N = 25\times$ -ös nagyítású mikroképek.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a lapát az alsó síkon vastagabb, mint a felső síkon. Ebből adódóan az alsó síkra felhelyezett klipszeknek nagyobb nyitása van, ezért ezekben az esetekben nagyobb szorító erővel rendelkeznek.

További megállapítás, hogy a szerszámmal szerelt klipszek esetében a felső síkra szerelés során nem, de az alsó síkra szerelés során minden esetben tapasztalható a klipszek kapaszkodó fogainak alakváltozása. Ez az jelenti, hogy az alsó síkra szerelés során nincs elegendő hely a szerszámban a klipsz megfelelő szétnyílására, egyik szerelési típusban sem. A Bosch által a prototípusokon eddig végzett tesztelések során ez nem okozott gondot, de ebből adódóan bizonyulhat erősnek a klipsz, ezért a klipszek szerelő szerszámának kismértékű módosítása indokolt lehet.

3 Összefoglalás

A végeselemes modellek segítségével virtuális környezetben megvizsgáltuk a jelenleg használatban lévő klipszeket. Az egyes geometriák megfelelőségét, az ott kapott nyitóerők összehasonlítása alapján végeztük el. Annak eldöntésére, hogy a használatban lévő klipszek szimulációi a valóságot tükrözik-e, vagy sem, egy klipsz nyitóerő mérőberendezést terveztünk meg és gyártottunk le. A készülékkel jól reprodukálható méréseket tudunk végezni a használatban lévő klipszeken.

A vizsgálatok eredményeként a legjobbnak ítélt, Miskolci Egyetem által kialakított klipsz prototípusa legyártásra került. A legyártott prototípusok üzemi körülmények között jól szerepeltek.

Vizsgáltuk az új „ATP” klipszek járókerék kapcsolatát. Az elvégzett fizikai vizsgálatok lényege a klipszek alakváltozása a járókerék lapátra történő szerelése közben, a lapát felületén létrejövő karcok, esetlegesen kialakuló mikrorepedések vizsgálata, amely alapján megalapításra került, hogy a szerelő szerszám kismértékű módosítása indokolt lehet.

4 Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

Irodalom

- [1] Szabó, F. J., Várkuliné, Sz. Á. (2019). Finite element study of a ventilator rotating elements. *International Review of Mechanical Engineering*, 13(6), 326-331. <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i6.17145>
- [2] Kovács, P. Z., Gál, V., Rónai, L., Várkuliné, Sz. Á. (2020). Ventilátor járókerék kiegyensúlyozására szolgáló klipszek fejlesztése. *GÉP*, 71(5-6), 105-109.
- [3] Rónai, L., Kovács, P. Z., Gál, V. (2021). Design an Opening Force Measuring Device for Balancing Clips. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 6(2), 220-225. <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2021.2.18>
- [4] Kovács, P. Z., Rónai, L. (2021). Elektromechanikus klipszmérő, 5258, NSZO: G01B 7/16; G01L 1/22, Ügyszám: U2000037, Benyújtás országa: Magyarország.
- [5] Kovács, P. Z., Várkuliné, Sz. Á., Gál, V. (2021). Ventilátor kiegyensúlyozó klipsz, 92864, Ügyszám: D2000031/12, Benyújtás országa: Magyarország.

A TERMIKUS ÖREGEDÉS HATÁSA A PWR REAKTOR TARTÁLY ÉLETTARTAMÁRA

Fodorné Cserépi Mariann

Tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mariann.cserepi@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az elmúlt évtizedek visszatérő problémája az atomerőművek élettartam meghosszabbítása. Az élettartam meghosszabbítás kérdéskörében fontos tényező az atomerőmű nem cserélhető elemeinek állapota. Mérlegelni kell nem csak gazdasági, hanem mérnöki szempontok alapján is, hogy meddig üzemeltethető egy erőmű, mikor jön el az ideje az új erőmű építésének, illetve mi az az időszak, amit egy korábbi, jól működő berendezés még probléma nélkül át tud hidalni. Ezen döntési mechanizmusban fontos szerepet játszik az erőmű elemeinek, különös tekintettel a nem cserélhető elemek élettartam meghatározása, amelyet sok paraméter befolyásol. Ezek közül egy paraméter csoportot képeznek a reaktor tartály üzemeltetése során vizsgált mechanikai tulajdonságok, amelyek közül ebben a cikkben a termikus öregedés okozta problémákat összegzem.

Kulcsszavak: PWR reaktor, termikus öregedés, élettartam meghosszabbítás

Abstract

The recurring problem of the past decades is the extension of the lifetime of nuclear power plants. The condition of the non-replaceable elements of the nuclear power plant is an important factor in the issue of lifetime extension. It is necessary to consider, not only from economic, but also from engineering points of view, how long a power plant can be operated, when it is time to build a new power plant, and what is the period that a previous, well-functioning equipment can still bridge without problems. An important role in this decision-making mechanism is determined by the lifetime of the elements of the power plant, especially the non-replaceable elements, which is influenced by many parameters. One of these parameter groups is the mechanical properties tested during the operation of the reactor vessel, of which the problems caused by thermal aging were summarized in this article.

Keywords: PWR reactor, thermal aging, lifetime extension

1. Bevezetés

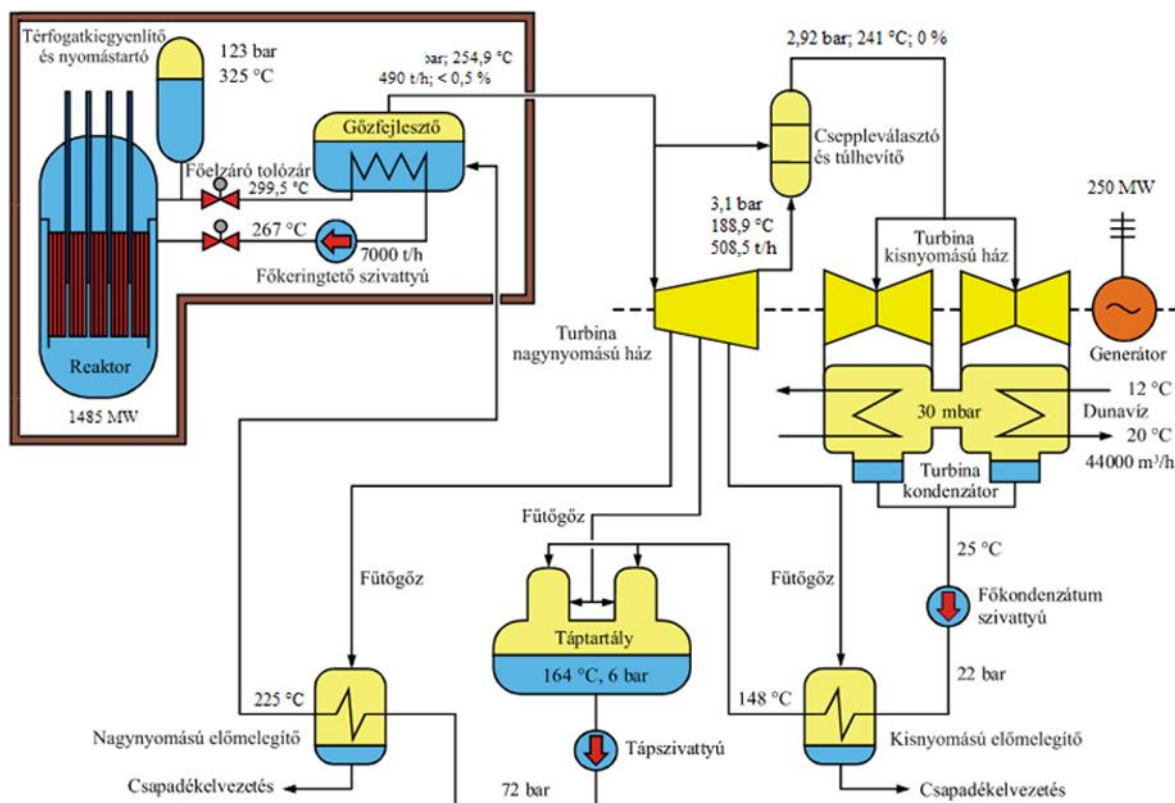
Az elmúlt évtizedekben gyakran előtérbe kerülnek olyan események, amelyek újra és újra előtérbe helyezik az atomerőművek élettartam meghosszabbításával kapcsolatos megfontolásokat. Egyik oldalról nagy nyomás nehezedik az atomerőműveket üzemeltető országokra, hogy az emberek, felületes ismereteik alapján, félelmet éreznek és elutasítják a nukleáris létesítmények telepítését és üzemeltetését. Másik oldalról szintén nagy nyomás nehezedik az üzemeltetőre, hogy minél nagyobb százalékban sikerüljön kiszorítani az energia termelésből az üvegház hatású gázok termelésével járó

energiaipari létesítményeket. Ehhez járulnak hozzá a közelmúlt eseményei, amelyek a kialakuló energia válság felé taszítják az egyes országokat, különösen azokat, amelyek nem rendelkeznek megfelelő természeti adottságokkal kellő mennyiségű alternatív energia termeléséhez. Ezen események és megfontolások alapján tekintem át a meglévő erőművek élettartam hosszabbításához szükséges legfontosabb berendezés, a reaktor tartály élettartam meghosszabbításához szükséges paraméterek közül a termikus öregedés okozta károsodást.

2. A fejlesztés irányát kijelölő megfontolások

Az alapvető fejlesztési szempontok közé tartoznak az erőművekkel szemben támasztott követelmények változásai. A megfelelési követelmények szigorításában nagy szerepet játszanak az üzemzavarok és a balesetek kivizsgálása során feltárt tapasztalatok. Ilyen jelentősebb balesetek, mint például Three Mile Island (USA 1979), Csernobil (Szovjetunió 1986), Fukushima (Japán 2011). A több mint 60 év alatt több mint 15 000 reaktorév üzemeltetési tapasztalat gyűlt össze. Ezeket számos irodalom dolgozza fel (Yamaji et al., 2019).

Az 1. ábra a Paksi atomerőmű hősémáját ábrázolja, amelyen jól láthatók az erőmű egyes elemeinek üzemi hőmérséklet és nyomás értékei.



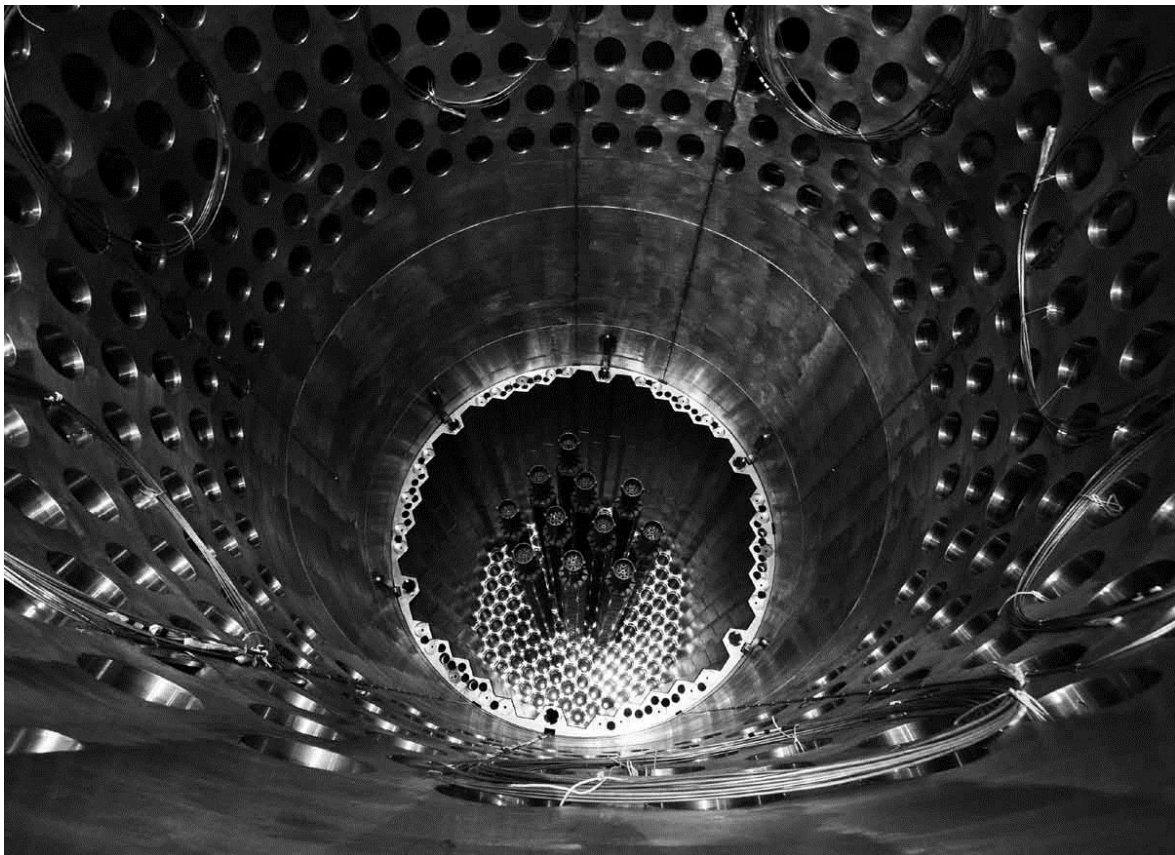
1. ábra. A Paksi Atomerőmű hősémája (Nagyné, 2006).

A tervezési követelmények között szerepel, hogy a reaktor tartálynak (RPV = Reactor Pressure Vessel) túl kell élnie minden üzemzavari eseményt, illetve amelyekről feltételezhető, hogy 100 ezer működési évente bekövetkezhet. Ez a szerkezeti elem adja a mérnöki gátak rendszerében a harmadik mérnöki gátat, amely védi a környezetet a radioaktív anyagok környezetbe való kikerülésétől (Gillemot, 2008).

Ennek kapcsán az egyes elemek vizsgálata és élettartam meghatározása is központi probléma. Az atomerőmű élettartamának meghatározása során talán a legfontosabb elem a reaktor tartály nyomástartó edénye. Ennek cseréje ugyanis gazdaságossági megfontolások alapján nem lehetséges, így alapvetően meghatározza az erőmű élettartamát. Ebből következik, hogy az atomerőművek fejlesztésének meghatározó irányvonala az eredetileg 30-40 évre tervezett RPV-k élettartamának a meghosszabbítása. A legújabb irányelvek elvárása a 60-80 évre való meghosszabbításokat jelenti (Gillemot, 2008).

Meghatározó folyamatok az erőmű üzeméből adódó környezeti hatások okozta öregedési folyamatok, amelyek az acél nyomástartó berendezéseket érintik. A harmadik generációs reaktortípusok között, megkülönböztethetünk nyugati és orosz típusú PWR reaktorokat, de – függetlenül ettől – mindegyik típusnak hasonló követelményeknek kell megfelelnie és hasonló öregedési mechanizmusokat kell elviselnie (Gillemot, 2008).

A PWR típusú reaktor tartály belső kialakítása látható a 2. ábrán.



2. ábra. PWR reaktor tartály (Rosatom, 2015).

A PWR reaktor tartályok víz moderátoros és víz hűtőközeggel rendelkező nagynyomású rendszerelemek. Szerkezetileg kovácsolt gyűrűkből készülnek, amelyeket hegesztéssel egyesítenek, majd hőkezeléssel hozzák egyenletes szövetszerkezetűre és előírt mechanikai tulajdonságúra a hegesztési folyamat során kialakuló változó szövetszerkezetet és mechanikai tulajdonságokat. Ezt követi egy anyagvizsgálati folyamat, amely magába foglalja a törésmechanikai hibaelemzéseket és a szilárdsági tesztek egyaránt (Gillemot, 2008).

A felhasználásra kerülő anyagok tekintetében fontos szerepet játszik a réz, a foszfor és a nikkel. Ezek az anyagok csökkentik a neutron sugárzás okozta keményedési és ebből következően az anyag ridegedési mechanizmusait. A sugárzás okozta mikroszerkezeti változásokat korábban nehezen lehetett egyértelműen azonosítani, a vizsgálóberendezések fejlődése azonban lehetővé tette ezen problémák feltárását. Segítségükkel az ötvöző elemek hatásai is egyértelműen magyarázhatóvá válnak (Gillemot, 2008).

Az RPV működéséhez szükséges előírások közé tartozik a termikus öregedés, az alacsony aktivitás, a jó hegeszthetőség, a neutron besugárzással szembeni ellenálló képesség, a megmunkálhatóság, illetve a nagy szilárdság. A PRV-hez használt acélok, fő fejlesztési iránya olyan anyagminőség és gyártási eljárás együttes kialakítása, amely nemcsak megfelel az előírt feltételeknek, hanem lassítja az öregedési folyamatokat is. Az PRV öregedését elsősorban a gyorsneutronok által okozott besugárzás okozza; ezt követi a termikus öregedés okozta fáradási mechanizmus. Fontos megemlíteni még a tartály kisciklusú fáradás okozta öregedést is (Gillemot, 2008).

3. Termikus öregedés

Termikus öregedés alatt azokat az anyagban lejátszódó folyamatokat értjük, amelyek a magas hőmérsékleten történő üzemelés hatására, az üzemidő alatt, az anyag szerkezeti tulajdonságainak a megváltozását eredményezik. Ezek a tulajdonságbeli változások a vizsgálat tárgyát képező anyag mechanikai tulajdonságainak romlásában észlelhetők, jelentős mértékben az anyag ridegedési tulajdonságainak a romlására (ABOS, 2009).

Az anyagok ridegedési tulajdonságai a hőmérséklet csökkenésével romlanak. A ridegtörés bekövetkezésekor az anyag törése makroszkópikus képlékeny alakváltozás nélkül megy végbe. A hőmérséklet hatására bekövetkező elridegedés során, az anyagban lejátszódó diffúziós folyamatok, amelyek hosszú idő alatt zajlanak le, magasabb hőmérséklet hatására felgyorsulnak, és az anyag mechanikai tulajdonságainak romlásához vezetnek (ABOS, 2009).

A PWR üzemi hőmérséklete 270-320 °C között mozog. Ez a hőmérséklet önmagában nem indokolja az acél anyagában bekövetkező súlyos anyagtulajdonságbeli romlást. Ezen hőmérsékleti tartományban, a PWR reaktorokra jellemző 123-162 bar nyomás mellett, a diffúziós folyamatok felgyorsulnak, amit a neutron sugárzás hatása is erősít (Gillemot, 2008). Ehhez az üzemállapothoz tartozó 3. generációs reaktortípusok néhány jellemző üzemi paraméterét foglalja össze az 1. táblázat.

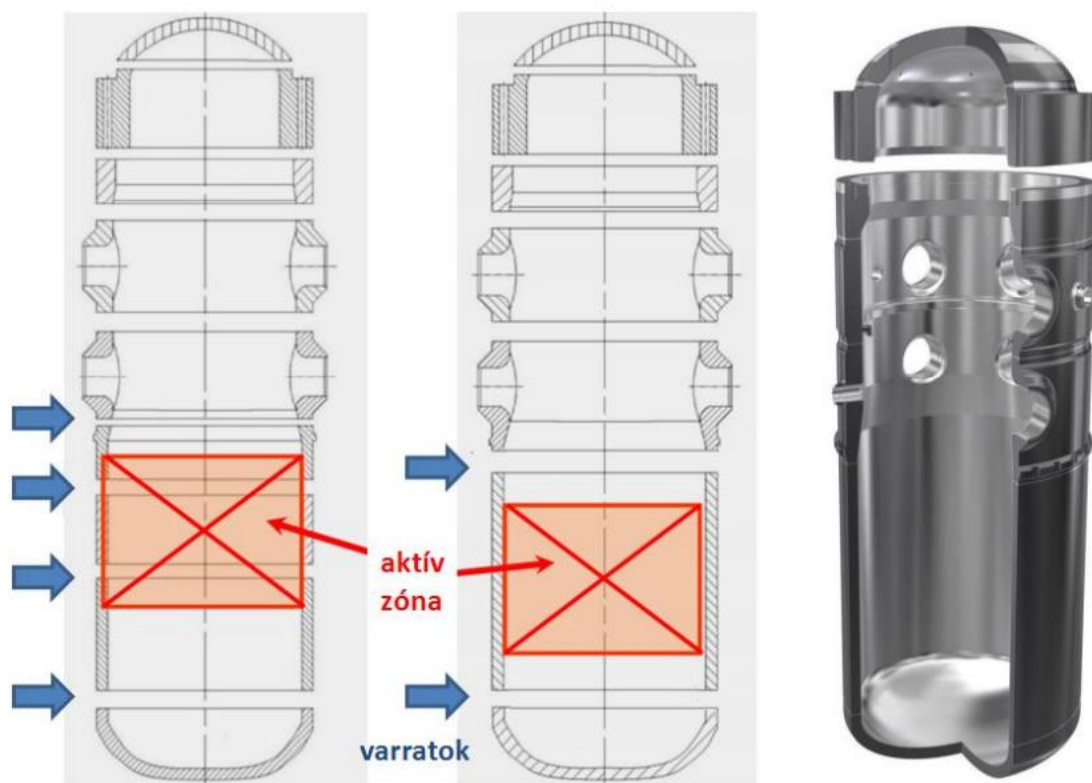
Leállítás és indítás során a hőmérséklet változások miatt feszültségek lépnek fel különösen a reaktor falában (Gillemot, 2008).

A reaktor tartály anyaga nagy szilárdságú, alacsony karbon tartalmú acél. A gyűrűk kialakítása során a kovácsolás célja, a megfelelő tartályalak kialakításán túl, a szövetszerkezet kedvező befolyásolása. A tartály belső felülete plattírozással vékony (körülbelül 7 mm (Trampus, 2004-2005)) korrózióálló acélréteget kap. A tartályon belüli elemek korrózióálló acélból készülnek (Gillemot, 2008; Cserháti, 2014).

1. táblázat. A 3. generációs VVER-1000 reaktorok jellemzői (Pátzay, 2011).

Jellemző	V-320	V-428	V-466
Üzemidő [év]	30	40	60
Névleges hőteljesítmény [MW _{el}]	3000	3000	3000
Gőznyomás névleges terhelésen [MPa]	6,27	6,27	6,27
Gőz hőmérséklete névleges terhelésnél [°C]	278,5	278,5	278,5
A fűtőelem tartózkodási ideje a reaktorban [év]	3	3 (max.4)	3 (max.4)
Kiegészi szint átlagértéke (egyensúlyi ciklus) [MW _{nap} /kgU]	40,2	43	47,2
Betöltési üzemanyag dúsítás [%]	4,4	3,9	4,28

Azok a hegesztési varratok, amelyek az aktív zóna magasságába esnek, a tapasztalatok alapján fokozottan ki vannak téve a sugárzás okozta károsodásnak a tartály többi részéhez képest. Ezért a tervezők törekednek arra, hogy ne kerüljenek hegesztési varratok az aktív zóna magasságába (Gillemot, 2008; Cserháti, 2014). A hegesztési varratok aktív zónából való kiemelésére és darabszámának csökkentésére láthatunk példát a 3. ábrán.



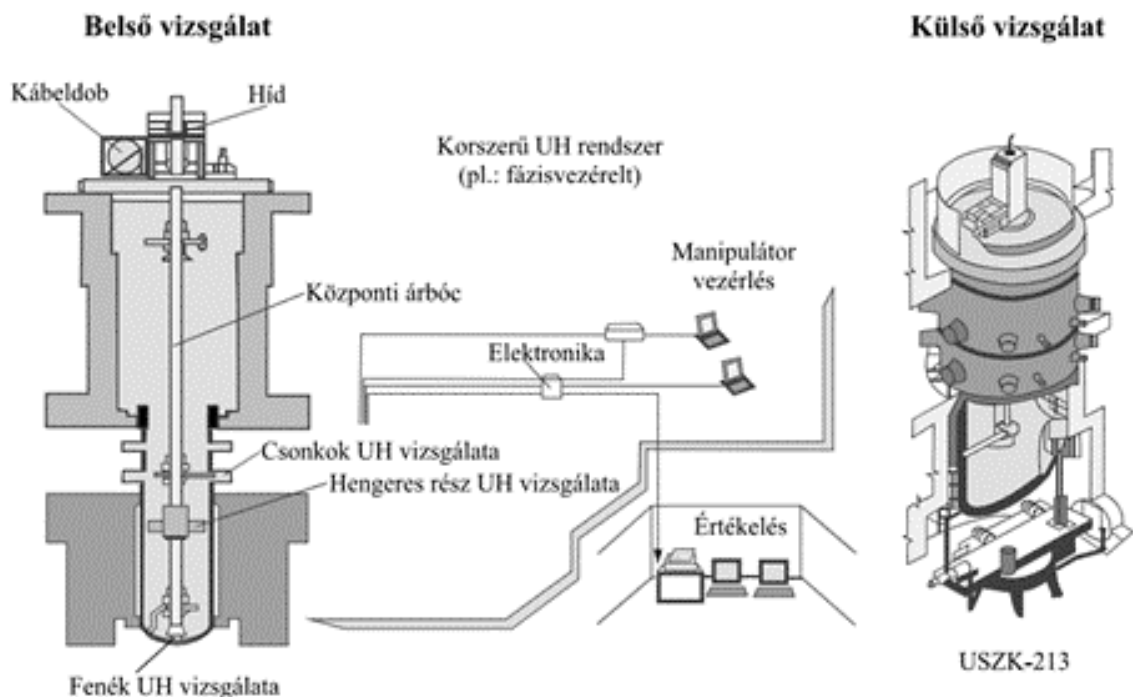
3. ábra. Kevesebb és a zóna határain kívüli varrat a legújabb VVER reaktortartályon (Cserháti, 2014).

Meg kell említeni az egyes kampányok indítása és leállása során kialakuló hőmérséklet-változásokat. Indítás és leállítás során a hőmérséklet változása okoz kisciklusú terhelést a tartály anyagában, ami repedések kialakulásához vezethet. Ezt fokozza az a tény, hogy a tartály vázát adó szerkezeti acél és a belső falon elhelyezkedő korrózióálló réteg hőtágulási együtthatója eltérő, így további repedések kialakulásához vezethet az egyes kampányok indítás és befejezése során (Gillemot, 2008).

Az előzőekben tárgyalt folyamatok becslése és feltárása fontos szerepet játszik az atomerőművek élettartamának becslése és meghosszabbítása során. A rendszerek öregedésének elemzésének része a hibahelyek meghatározása és az öregedési folyamatok becslése. Az öregedés helyeinek meghatározásában az üzemidő alatt felmerülő igénybevételek, feszültségkoncentrációs helyek és korróziós zónák meghatározása játszik jelentős szerepet. Az élettartam elemzés során, figyelembe veszik az egymásra szuperponálódó folyamatok együttes hatásait. Ezen elemzések alapjául szolgálnak az üzemeltetési stratégiának, a karbantartás és időszakos vizsgálatoknak. Az öregedési folyamatok feltárása, elemzése és kezelése a tervezéstől, az üzemeltetésen keresztül a szerkezet életciklusának legvégéig meghatározó folyamat (Gillemot, 2008; ABOS, 2009; Trampus, 2004-2005).

Az öregedési folyamatok monitorozására, alapként, a kazánok és nyomástartó edények előírásait lehet figyelembe venni, majd ennek előírásait kell alakítani az erőművek üzemeltetése során felhalmozódott tapasztalatok alapján (Gillemot, 2008).

Monitorozásra felhasznált vizsgálatok elsősorban roncsolásmentes anyagvizsgálatokat jelentenek (4. ábra). Ezek során olyan vizsgálati módszereket alkalmaznak, amelyek végrehajtása nem akadályozza a berendezés üzemeltethetőségét, illetve későbbi felhasználhatóságát (Gillemot F., 2008) (ABOS 2009) (Trampus P., 2004-2005).



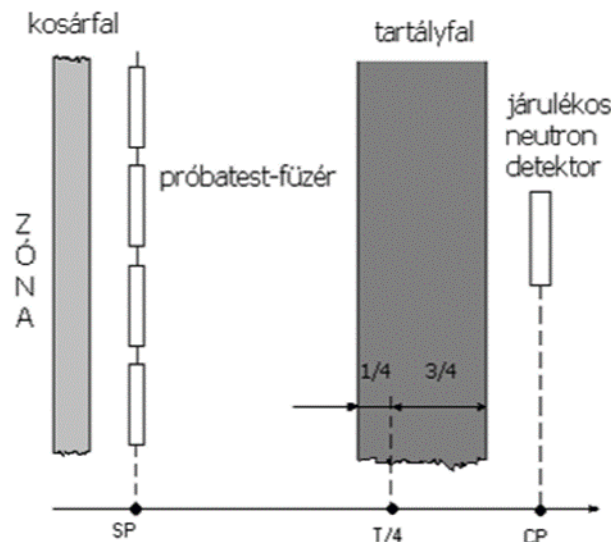
4. ábra. Reaktortartály belső és külső ultrahangos vizsgálata (Trampus, 2004-2005).

Első számú vizsgálati módszer minden esetben a szemrevételezés, ezt követik a folyadékbehatolásos, a mágneses, a radiográfiai, az ultrahangos (4. ábra), az örvényáramos, az akusztikus emissziós és a tömörségvizsgálatok. Ezen módszerek feltárják, nem csak a felületre kifutó, de a felület alatt elhelyezkedő folytonossági hibákat is. Itt kell megemlítenünk, hogy elfogadottak olyan nem szabványos vizsgálati módszerek is, amelyek az egyes módszerek kombinációjából tevődnek össze (Gillemot, 2008; ABOS, 2009; Trampus, 2004-2005).

Az anyagvizsgálatok során kapott eredményeket összehasonlítják, az előírt elfogadási szintekhez tartozó értékekkel. Ha az eredmények túllépik az elfogadási szinteket, akkor intézkedések tesznek az eredmények egyéb vizsgálatlal történő meghatározása érdekében, vagy pedig a berendezés javítására (Gillemot, 2008; ABOS, 2009; Trampus, 2004-2005).

Fontos eredményeket szolgáltatnak a roncsolásos vizsgálatok adatai is, amelyek a reaktortartályba helyezett, a reaktor anyagát tartalmazó próbatest füzerről származó próbatestek vizsgálatából származnak. Ezek vizsgálatát egy-egy kampányt követő kivétel esetén végzik el, majd az adatait és az eredményeit elemzik (Gillemot, 2008; ABOS, 2009; Trampus, 2004-2005).

A roncsolásos anyagvizsgálatokhoz használt próbatest füzér elhelyezkedésére láthatunk példát az 5. ábrán.



5. ábra. Reaktor tartály szerkezeti rajza a próbatest füzér elhelyezkedésével (Trampus, 2004-2005).

Ezen üzem közbeni roncsolásmentes és üzemlet követő roncsolásos vizsgálatok biztosítanak megfelelő adatmennyiséget a reaktor tartály öregedésének becslésére, elemzésére és az üzemidő meghosszabbításának a tervezésére.

4. Összefoglalás

A termikus öregedés fontos bemenő paraméter a reaktor tartály és ezen keresztül a reaktor blokk élettartamának meghatározásában. Ugyanakkor nem szabad elfelejtkeznünk arról a tényről, hogy a termikus öregedés hatása összeadódik a reaktor üzemeltetése során a neutron sugárzás okozta öregedési folyamatokkal és a hőmérsékletváltozások okozta kisciklusú fáradás jelenségével. Hatása nem elhanyagolható, de önállóan nehezen meghatározható. A blokk teljes életciklusa során figyelemmel

kell kísérni azt, folyamatos monitorozással. Ma már roncsolásmentes anyagvizsgálatok széles tárháza áll rendelkezésre, hogy a termikus öregedés hatásait nyomon követhessük, az eredmények ismeretében pedig több modell áll rendelkezésünkre az erőmű élettartamának becslésére.

Irodalom

- [1] Yamaji, B., Boros, I., Rádi, R. D. (2019). *Atomerőművek II. tanfolyami jegyzet*. BME Nukleáris Technikai Intézet.
- [2] Nagyné, Sz. A. (2006). *Korróziós jelenségek komplex értelmezése atomerőművi gőzfejlesztőkben*. PhD értekezés, Pannon Egyetem, Kémia Doktori Iskola, Veszprém.
- [3] Gillemot, F. (2008). Review on Steel Enhancement for Nuclear RPVs. *Metals*, 11(12), 2008. <https://doi.org/10.3390/met11122008>
- [4] Rosatom, (2015). The VVER today – Evolution, Design, Safety. State Atomic Energy Corporation Rosatom. <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>
- [5] Pátzay, Gy. (2011). *Atomenergetika és nukleáris technológia – Egyetemi tananyag*. BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék. https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/60/02/dd/1/Atomenergetika_animaciok_nelkul.pdf
- [6] Trampus P. (2004-2005). *A reaktortartály szerkezeti integritása – különös tekintettel az üzemidő hosszabbításra*. Doktori értekezés, Petten (NL) – Bicske.
- [7] *ABOS 1-2 rendszerelemek, komponensek termikus ridegése miatti élettartam-korlát elemzése*. Dokumentáció azonosító: 4500156483/2009/2.
- [8] Csoma, Gy. (1997). *Atomerőművek üzemtana – A reaktorfizika és -technika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest.
- [9] Cserháti, A. (2014). Reaktorkovácsok. *Nukleon*, 7(3), 168. https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/7_3_168_Cserhati.pdf

A. Függelék

**A 2022-es esztendő legfontosabb intézeti és
Intézethez kötődő eseményei**

Időpont	Esemény
Január 7.	Jónás Szabolcs PhD értekezésének nyilvános véde se MS Teams platformon, „summa cum laude” minősítéssel. Az értekezés címe: Klincselt kötések kísérleti és szimulációs vizsgálata. (Témavezető: Dr. Tisza Miklós egyetemi tanár.)
Január 18.	Gépészmérnöki MSc anyagtechnológiai és hegesztéstechnológiai specializáción végzett hallgatók záróvizsgálata .
Február 3.	Intézeti oktatói-kutatói értekezlet .
Február 24.	Intézeti oktatói-kutatói „tudománymetriai továbbképzés” .
Április 22.	Hallgatóink részt vettek az Országos Hegesztési Versenyen , Budapesten, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen.
Április 25-29.	Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia adjunktus Eramus+ oktatói mobilitás programban vett részt Finnországban, a University of Oulu társintézményében.
Május 18.	Dr. Anastasiia Symonova a Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (Ukrajna) egyetem docense az ERASMUS program keretében előadást tartott az intézeti könyvtárban. Az előadás címe: Mechanical engineering technology for military purposes.
Május 19 – 21.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Kovács Judit PhD hallgató, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Révész Lilla Mónika (DINAS Kft.), Sahm Alden Abd Al AI PhD hallgató és Sas Illés PhD hallgató (Elektro-MontőrING Kft.) részt vett és előadásokat tartott Kecskeméten, a Magyar Hegesztési Egyesület (MAHEG) szervezésében megrendezett XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencián .
Május 19.	A XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencián (Kecskemét) a Magyar Hegesztési Egyesület Rittinger János Díját vette át Révész Lilla Mónika volt gépészmérnök hallgatónk, a Dinas Kft. minőségirányítási vezetője, mesterszakos diplomamunkájának elismeréseként. Diplomamunkájának címe: Az utókezelés hatása a hegesztett kötések nagyciklusú fáradással szembeni ellenállására. (Témavezető: Dr. Lukács János egyetemi tanár.)
Június 1.	Gál Viktor PhD értekezésének műhelyvitája az intézeti könyvtárban. Az értekezés címe: Nagyszilárdságú acéllemezek alakítási határállapotának kísérleti vizsgálata. (Témavezető: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens, társ-témavezető: Dr. Kovács Péter Zoltán egyetemi docens.)

Időpont	Esemény
Június 8.	Shiraz Ahmed Siddiqui PhD értekezésének műhelyvitája az intézeti könyvtárban. Az értekezés címe: Enhancing the Tribological Performance of X42Cr13 Steel by Simple and Duplex Treated CrN and DLC Coating. (Témavezető: Dr. Marosné Dr. Berkes Mária egyetemi tanár.)
Június 9.	Gépészmérnöki BSc anyagtechnológiai specializáción és gépészmérnöki MSc anyagtechnológiai és hegesztéstechnológiai specializáción végzett hallgatók záróvizsgálója .
Június 13.	Nemzetközi hegesztő szakirányú továbbképzési szakon (EWE/IWE) végzett hallgatók záróvizsgálója .
Június 16.	A doktori (PhD) képzés keretében sikeres komplex vizsgát tett Dessie Jemal Ebrahim (témavezető: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens), Lucas Alexandre de Carvalho (témavezető: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens) és Sas Illés (témavezető: Dr. Lukács János egyetemi tanár) a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolában.
Június 23.	Az Intézet előterjesztésére, Prof. Dr. Gerald Wilhelm, a Münchener Alkalmazott Tudományok Egyetem (Munich University of Applied Sciences) professzora átvette a Professor Honoris Causae Facultatis Artium Mechanicarum et Rerum Informaticarum Universitatis Miskolcensis címet.
Június 23.	A „ Miskolci Egyetem Kiváló Tudományos Szerzője II. díj ” elismerést vett át Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, a hegesztés területén 2021-ben végzett kiemelkedő publikációs tevékenységéért.
Június 23.	Nemzetközi hallgatói nagykövet (International Student Ambassador – ISA) kinevezést vett át a brazil származású Lucas Alexandre de Carvalho PhD hallgató (témavezető: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens).
Június 24-25.	Hegesztési Nyári Egyetem a Magyar Hegesztési Egyesület és az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet közös szervezésében, a Miskolci Egyetemen.
Június 26-30.	A Magyar Hegesztési Egyesület és Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgáló Egyesülés Alapítvány támogatásával Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia adjunktus részt vett és előadást tartott Várnában, a 14th International Conference on Electron Beam Technologies konferencián.
Július 4-6.	„Digitális e-learning eszközök módszertana és alkalmazása a műszaki felsőoktatásban” című angol nyelvű továbbképzés a D-EWI (Digital Training for European Welding Inspectors) projekt keretében, a Miskolci Egyetemen.

Időpont	Esemény
Július 7.	Intézeti tanévzáró értekezlet a Miskolci Egyetemi Sportcentrumában.
Július 11.	Shiraz Ahmed Siddiqui PhD értekezésének nyilvános védése a MTA Miskolci Akadémiai Bizottsága Székházának Dísztermében, „summa cum laude” minősítéssel. Az értekezés címe: Enhancing the Tribological Performance of X42Cr13 Steel by Simple and Duplex Treated CrN and DLC Coating. (Témavezető: Dr. Marosné Dr. Berkes Mária egyetemi tanár.)
Július 17-22.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens és Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia adjunktus részt vett és előadásokat tartott Tokióban, a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW – International Institute of Welding) 75. Éves Közgyűlésén és Nemzetközi Konferenciáján (75th Annual Assembly and International Conference).
Augusztus 19.	A „Magyar Érdemrend Lovagkereszt (polgári tagozat)” kitüntetés t vette át Dr. Lukács János egyetemi tanár Budapesten, a Pesti Vigadóban, a hegesztett szerkezetek integritása és élettartam gazdálkodása területén folytatott több mint négy évtizedes, kiemelkedő kutatói-oktatói tevékenysége elismeréseként..
Augusztus 30.	Intézeti oktatói-kutatói értekezlet .
Augusztus 31.	A „Miskolci Egyetem Érdemes Oktatója” elismerést vette át Dr. Kovács Péter Zoltán egyetemi docens, aki több mint két évtizede végez színvonalas oktatási tevékenységet az anyagtudomány, a képlékenyalakítás és a mechanikai technológiák területén. A „Miskolci Egyetem Kiváló Dolgozója” kitüntetés telt át Cszakás Géza tanszéki mérnök, több évtizedes, anyagvizsgálati területen végzett kimagasló szakmai munkájáért
Szeptember 1.	„Kiváló Kutató Dékáni Dicséret” -ben részesült az indiai származású Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens, aki 2021-ben szerzett PhD fokozatot és eredményeit számos, nemzetközi szinten is jegyzett folyóiratban publikálta. „Kiváló Dolgozó Dékáni Dicséret” -ben részesült Kőmíves Mariann dékáni referens, aki az elmúlt öt évben magas színvonalon látta el az Intézet tanulmányi adminisztrációval kapcsolatos feladatait, valamint aktívan részt vett az intézeti továbbképzések és rendezvények szervezésében.

Időpont	Esemény
Szeptember 8 – 9.	Fülöp Fruzsina PhD hallgató, Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Kovács Judit PhD hallgató, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Dr. Marosné Dr. Berkes Mária egyetemi tanár, Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens, Pusta Jalalova PhD hallgató, Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens, Sahm Alden Abd Al Al PhD hallgató és Sas Illés PhD hallgató (Elektro-MontőrING Kft.) részt vett és előadásokat tartott a Miskolci Egyetem szervezésében megtartott International Conference on Vehicle and Automotive Engineering (VAE2022) online konferencián.
Szeptember 12-16.	Dr. Antti Kaijalainen és Dr. Vahid Javaheri a finnországi University of Oulu intézményből hivatalos látogatást tett az Intézetben, az Erasmus+ program keretében.
Szeptember 15.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens átvette a Bolyai János Kutatói Ösztöndíj oklevelét a Magyar Tudományos Akadémián, Budapesten.
Szeptember 22.	Gál Viktor PhD értekezésének nyilvános védése a Miskolci Egyetemen, „summa cum laude” minősítéssel. Az értekezés címe: Nagyszilárdságú acéllemezek alakítási határállapotának kísérleti vizsgálata. (Témavezető: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens, társ-témavezető: Dr. Kovács Péter Zoltán egyetemi docens.)
Szeptember 23.	Emlékkülés Dr. Tisza Miklós egyetemi tanár halálának évfordulóján, a Miskolci Egyetem Díszaulájában.
Szeptember 23 – október 21.	Emlékkiállítás Dr. Tisza Miklós egyetemi tanár halálának évfordulóján, a Miskolci Egyetem Díszaulája előtti területen.
Szeptember 30.	Elindult az Európai Ellenálláshegesztő Specialista (EWS-RW) és Európai Kiemelt Hegesztő (ESP-RW) képzés 10, illetve 1 fő részvételével.
Október 5 – 7.	Dr. Kuzsella László egyetemi docens részt vett és előadást tartott Balatonfüreden a XXX. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencián és Szakkiállításon .
Október 24-28.	Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens Erasmus+ oktatói mobilitás programban vett részt Gliwicében, a Silesian University of Technology társintézményében.
November 11.	Életének 91. évében elhunyt Dr. Béres Lajos ny. egyetemi docens.

Időpont	Esemény
November 22-23.	Dr. Gerald Wilhelm a Münchener Alkalmazott Tudományok Egyetem (Munich University of Applied Sciences) professzora hallgatójával együtt látogatást tett az Intézetben és megtekintette a két egyetem közös Hegesztés-technológiai Laboratóriumában lévő berendezések telepítését. Szakmai konzultációra kerül sor a Messer Hungarogáz Kft. képviselőivel a laboratórium tevékenységének támogatásáról.
November 24-25.	Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd, Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Dr. Kovács Péter Zoltán egyetemi docens, Sahm Alden Abd Al Al PhD hallgató és Tedik Gábor PhD hallgató (Pausits Kft.) részt vett és előadásokat tartott Temesvárott, a Román Hegesztési és Anyagvizsgáló Intézet (ISIM – National R&D Institute for Welding and Material Testing) szervezésében megrendezett Innovative Technologies for Joining Advanced Materials (TIMA22) elnevezésű konferencián.
November 25.	Dr. Dr. Béres Lajos ny. egyetemi docens (1932 – 2022) temetése a miskolci Mindszenti temetőben.
November 28.	A Verarbeiten Pausits Kft. és a Miskolci Egyetem között kötött hivatalos együttműködési megállapodás bejelentése. A vállalat ügyvezetője, Pausits Valér és műszaki vezetője, Terdik Gábor szakmai egyeztetéseket folytatott a Kar és az Intézet képviselőivel, továbbá hallgatói tájékoztató megtartására is sor került.
November 30.	„A Miskolci Egyetem Kiemelkedő Kutatója a 2022. évben” elismerést vett át Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens és Dr. Lukács János egyetemi tanár a Miskolci Egyetem nemzetközi tudományos láthatósága érdekében végzett kutatómunkájukért és kiemelkedő publikációs tevékenységükért.
December 15.	Intézeti évváró értekezlet.

B. Függelék

**Emlékfüzet Prof. Dr. Tisza Miklós halálának
évfordulóján**



MISKOLCI
EGYETEM



EMLÉKÜLÉS és EMLÉKKIÁLLÍTÁS

Prof. Dr. Tisza Miklós

halálának évfordulóján



Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros

2022. szeptember 23.



Mechanikai Technológiai Tanszék (1980)

PROGRAM

09:50-ig: A vendégek érkezése

10:00 – 11:30: Emlékezés

11:30 – 11:45: Az Emlékkiállítás megnyitása

11:45 – 12:45: Záró beszélgetések, frissítő



Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet (2019)

SZAKMAI ÉLETRAJZ

1972 óta dolgozott a Miskolci Egyetemen (korábban Nehézipari Műszaki Egyetem), munkába állása óta a Gépészmérnöki és Informatikai Kar (korábban Gépészmérnöki Kar) Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében (korábban Mechanikai Technológiai Tanszékén).

Egyetemi tanár, a műszaki tudomány doktora (DSc), 1991 és 2018 között a Mechanikai Technológiai Tanszék vezetője, 2013-ban az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet alapító igazgatója, 1981-től 1990-ig a Tanszék Képlékenyalakítási szakcsoportjának vezetője.

1986-tól 1989-ig osztályvezető a Tudományszervezési és Nemzetközi Osztályon, 1987-től 1999-ig projektigazgató a Projekt Irodán, majd Intézményfejlesztési Program Irodán, 2000-től 2003-ig fejlesztési rektorhelyettes.

Legfontosabb szakmai-tudományos tisztségei külföldi tudományos testületekben: IDDRG Executive Committee member, 1989-től, Vice-President, 1994-től, President, 1996-1998 között; Human Capital Mobility Network Scientific Board member, 1994-től; ESAFORM Scientific Board member, 1996-től; Member of the New York Academy of Sciences, 1997-től; Member of Board of Directors of EsaForm, 2004-től; Member of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, 2005-től, valamint tagja több konferencia sorozat tudományos bizottságának és több folyóirat szerkesztő bizottságának.

Legfontosabb szakmai-tudományos tisztségei hazai tudományos testületekben: a Magyar Tudományos Akadémia, Anyagtudományi és Technológiai Bizottságának (MTA ATB) tagja, 1981-től, elnöke, 2002-től-2008-ig; a MTA ATB Képlékenyalakítási Albizottság tagja, 1981-től, a MTA ATB Gyártási Rendszerek Albizottság tagja, 1991-től; a Magyar Tudományos Akadémia Miskolci Akadémiai Bizottság (MTA MAB) Anyagismereti Bizottságának titkára, 1981-1994 között, MTA MAB Képlékenyalakítási Albizottság elnöke, 1986-tól, MTA MAB Gépészeti Szakbizottság tagja, 1990-től, elnöke 2008-tól; a Miskolci Egyetem Gépészeti Tudományok Doktori Tanácsának tagja, a Mechanikai Technológiai alprogram vezetője, 1993-tól; a Miskolci Egyetem Sályi István Doktori Iskola Tanácsának tagja, az Anyagtudományi és anyagtechnológiai program vezetője, 2000-től, a Doktori Iskola elnöke, 2009-től; a BME Gépészmérnöki Kar Habilitációs és Doktori Tanácsának tagja, 1998-tól; a Miskolci Egyetem Hatvany József Doktori Iskola Tanácsának tagja, az Anyagtudományi és anyagtechnológiai informatikai rendszerek program vezetője, 2000-től.

Oktatási, tudományos és szakmai tevékenysége szűkebb és tágabb környezete számára egyaránt példaadó, hazai és nemzetközi kapcsolataival, sokrétű vezetői tevékenységével évtizedeken keresztül, alkotó módon és kiemelkedő eredményességgel szolgálta a Tanszék, az Intézet, a Kar és az Egyetem fejlődését, hazai és nemzetközi ismertségének és elismertségének erősödését.

Fontosabb kitüntetései és elismerései: Miniszteri Dicséret (1977), Műszaki Irodalmi Díj (1980), OMBKE Nívódíj (1981), Munka Érdemrend Bronz fokozata (1982), Kiváló Munkáért (1989), GTE Egyesületi Érem (1993), Signum Aureum Universitatis (1994), Gábor Dénes Díj (1998), Honoris Cause Universitatis Cluj-Napoca (2002), Akadémiai Díj (2004), Kari Emlékérem (2005), Charles Simonyi-díj (2006), Magyar Érdemrend Tisztikereszt (2009), Műszaki Irodalmi Díj (2009), GTE Zorkóczy Emlékérem (2012), Pro Universitate (2012), Miskolci Egyetem Díszpolgára (2014), Google Scholar H index Emléklap (2018).

(Prof. Dr. Tisza Miklós által készített szakmai életrajz szerkesztett változata)

EMLÉKÜLÉS

Prof. Dr. Tisza Miklós (1949. január 2. - 2021. szeptember 27.)
halálának évfordulóján

Időpont: 2022. szeptember 23. 10:00 óra

Helyszín: a Miskolci Egyetem Díszaulája

PROGRAM

Üdvözlés

Rektori köszöntő

Prof. Dr. Horváth Zita, a Miskolci Egyetem rektora

Tisza Miklós, a sokoldalú vezető

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar dékánja

Tisza Miklós, az MTA doktora, a Sályi István Gépészeti tudományok Doktori Iskola vezetője

Prof. Dr. Páczelt István, az MTA rendes tagja

Zenei betét

Tisza Miklós, az International Deep Drawing Research Group (IDDRG) egykori elnöke (online)

Nico Langerak, Department Manager, Applications & Engineering at Tata Steel in Europe, President of IDDRG

Tisza Miklós, a szakma kiváló művelője, a hazai szakmai közélet meghatározó szereplője

Prof. Dr. Czinege Imre, a Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola egykori főigazgatója, a Széchenyi István Egyetem első rektora

Tisza Miklós, a Mechanikai Technológiai Tanszék harmadik tanszékvezetője, az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet első igazgatója

Dr. Lukács Zsolt, az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet igazgatója

Zárszó

EMLÉKKIÁLLÍTÁS

Prof. Dr. Tisza Miklós (1949. január 2. - 2021. szeptember 27.)
halálának évfordulóján

Időtartam: 2022. szeptember 23. – 2022. október 21.

Helyszín: a Miskolci Egyetem Díszaulája előtti tér (a Főbejárattal szemben)

MEGNYITÓ

Időpont: 2022. szeptember 23. 11:30 óra

Tisza Miklós, a pályatárs, élete és munkássága

Prof. Dr. Danyi József, a Kecskeméti Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskola egykori főigazgatója, a Kecskeméti Főiskola egykori rektora



Évzáró ünnepség az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézetben (2013)

Tisza Miklós kezében az egyetemi doktori értekezése (1977) tárgyát képező könnyűfém bányabiztosító tám egy szelete, fején a „Járműipari anyagfejlesztések: célzott alapkutatás az alakíthatóság, hőkezelés és hegeszthetőség témaköreiben (autotech)” című projektre utaló sapka



Diákévek Debrecenben

1955 – 1967

Általános iskolai tanulmányait a **József Attila-telepi iskolában** végezte, 1955 és 1963 között. Közben, 1959-ben, beiratkozott a **Simonffy Emil Állami Zeneiskola** zongora tanszakára, ahol szolfézs, zongora és zeneirodalom tantárgyakból folytatott tanulmányokat, egészen 1963-ig.

A tehetséges, szorgalmas és kitűnő előmenetelű diáknak egyenes útja vezetett a debreceni, akkor és ma is rangos **Mechwart András Gépipari Technikumba**. A Technikumban eltöltött négy év meghatározó volt az életében, mind a megszerzett magas szintű tudás, mind az ott kapott nevelés és életre való felkészítés terén.

Kötődése középiskolájához is példaértékű volt, rendszeresen visszajárt az intézménybe, mint **volt Mechwart-os diák** segítette azt, és számos iskolai rendezvény szervezésében vállalt aktív szerepet. 2017-ben megkapta az 50 éves szakmai tevékenységét elismerő Díszoklevelet, az átadó ünnepségen Ő mondta a köszöntő beszédet.



Érettségi tabló (1967)

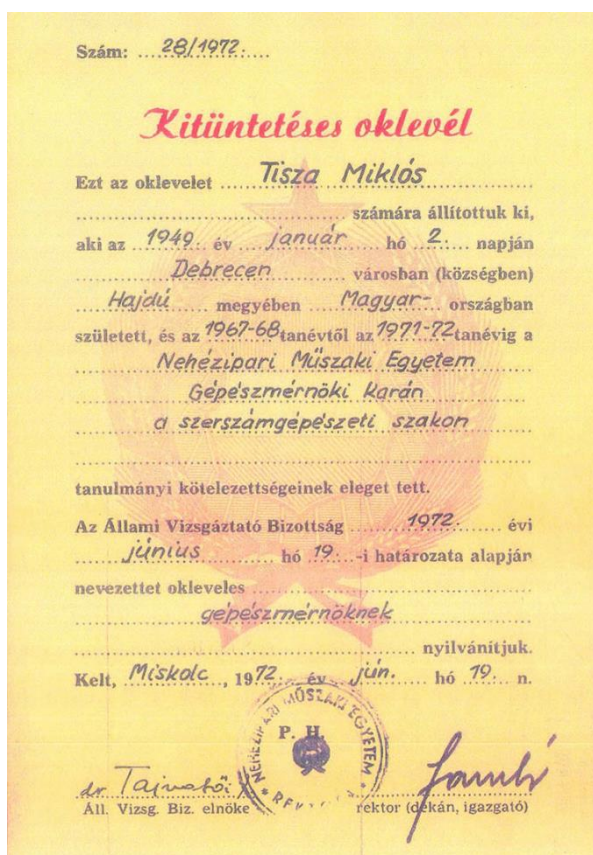
Tanulmányok a Nehézipari Műszaki Egyetemen

1967 – 1972

Sikeres felvételi vizsga után, 1967 szeptemberében kezdte meg tanulmányait a **Nehézipari Műszaki Egyetem** (ma Miskolci Egyetem) **Gépészmérnöki Karának** (ma Gépészmérnöki és Informatikai Kar) **Szerszámgépészeti szakán**.

Beköltözve a Dudujkára, a tanulmányi munka mellett a diákélet és a közösségi élet terén is nagy aktivitást mutatott. Mindvégig kiváló **tanulmányi eredményei** alapján évente megkapta a kari Tanulmányi Emlékérmet, egyszer annak bronz, négyszer pedig annak arany fokozatát. Bekapcsolódott a **hallgatói szervezetek munkájába**, képviselte hallgatói társait az Egyetem különböző szervezeteiben, továbbá aktív szereplője volt a **diák-hagyományok ápolásának**.

A sikeres öt év után **kitüntetéses gépészmérnöki oklevelet** szerzett, megkapta a hallgatói szervezet **Becsületdiplomáját**, valamint „A végző Gépész évfolyam” **Tanulmányi Alapítvány díját**.



Kitüntetéses gépészmérnöki oklevél (1972)



Becsületdiploma (1972)

Ifjú oktató, kutató a Mechanikai Technológiai Tanszéken

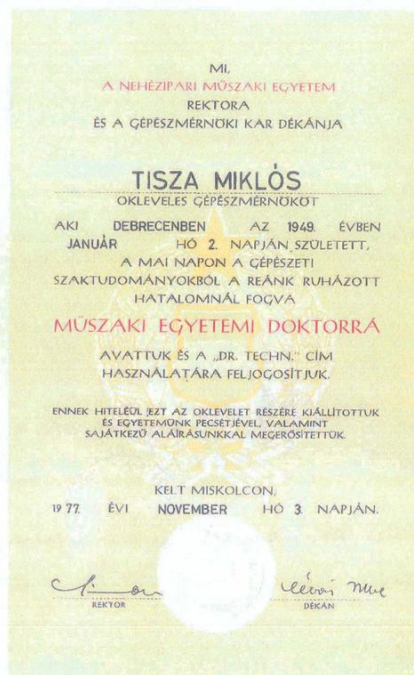
1972 – 1981

Végzése után, Dr. Romvári Pál tanszékvezető egyetemi tanár felkérésére pályázott a Mechanikai Technológiai Tanszék egyetemi tanársegédi állására. A tanszéki kollektíva, amely hallgatóként már jól ismerte Őt, nagy örömmel fogadta be soraiba.

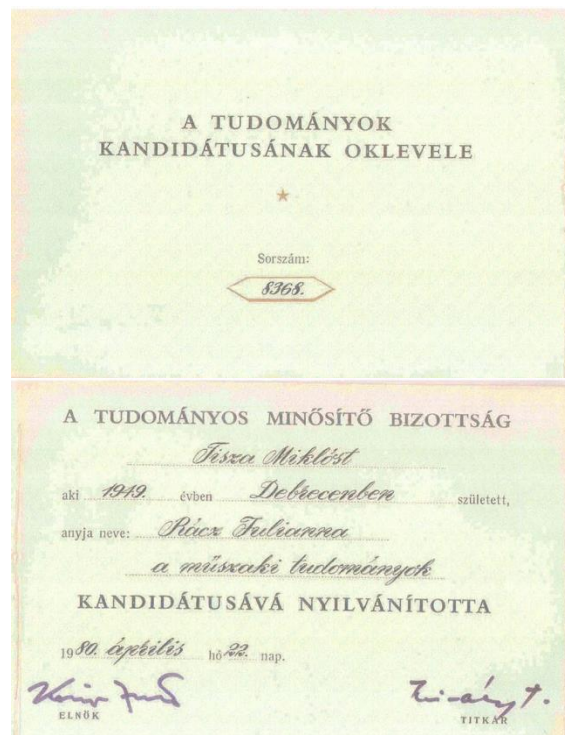
Ifjú tanársegédként aktívan kapcsolódott be a Tanszék oktató és kutató munkájába. **Oktatási tevékenységét** a metallográfia, az anyagismeret, az anyagvizsgálat, a képlékenyalakítás és a lemezalakítás témájú tantárgyak oktatásával kezdte. **Kutatási tevékenységét** a képlékenyalakítás különböző területeire irányultan végzett.

Előrehaladása példamutatóan alakult:

- 1972 – 1976: **egyetemi tanársegéd**;
- 1977: benyújtotta **egyetemi doktori értekezését** (dr. techn.) „Könnyűfém bányabiztosító szerkezet rugalmas-képlékeny hajlításának elméleti és kísérleti vizsgálata” címmel, amelyet „summa cum laude” minősítéssel védett meg;
- 1976 – 1979: **ösztöndíjas aspiráns** a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológiai és Anyagszerkezzettani Intézetében, Dr. Prohászka János akadémikus irányításával;
- 1980: a sikeres aspirantúrát követően „Az ultrahang hatása a képlékeny alakváltozás elemi folyamataira és a mélyhúzás technológiai paramétereire” címmel nyújtotta be **kandidátusi értekezését** (CSc), amelyet 100%-os pontszámmal védett meg;
- 1979-1981: **egyetemi adjunktus**.



Műszaki egyetemi doktori oklevél (1977)



Műszaki tudományok kandidátusa oklevél (1980)

Vezető oktató-kutató a Mechanikai Technológiai Tanszéken, az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben

1981 – 2013

Az aspiránsi időszak letelte után **vezető oktató**ként tért vissza a Tanszékre, vezetője lett a **Képlékenyalakító szakcsoport**nak, amely ezzel új lendületet nyert és kezdeményezője volt a Képlékenyalakító Szakmérnöki Szak és az idegen nyelvű szakképzés elindításának, a CAD/CAM rendszerek, a számítógépes technológia- és szerszámtervezés bevezetésének.

Külföldi tanulmányútjaival (British Council ösztöndíjak) építette a Tanszék kapcsolatait, több hónapot töltött vezető intézetekben: University of Manchester Institute of Science and Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine.

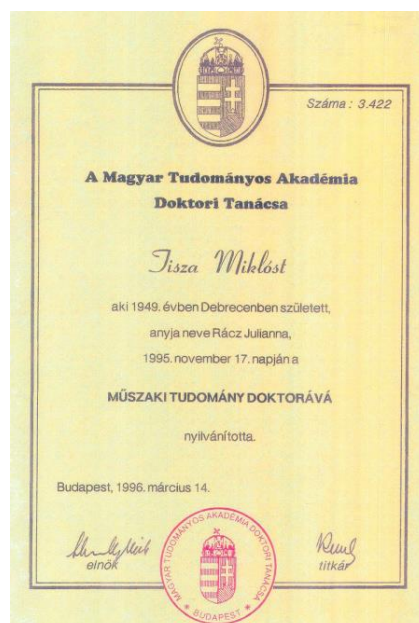
Kutatómunkájának központjában a **számítógépes mérnöki módszerek alkalmazásának kutatása** állt. A **G/6 keretprogram** részeként témavezetőként irányította a Nehézipari Műszaki Egyetem, a Budapesti Műszaki Egyetem és a Gépipari Technológiai Intézet együttműködésében végzett munkát. Az e területen elért eredményeket foglalta össze 1994-ben, az „*Anyagtudományi eredmények és számítógépes mérnöki módszerek alkalmazása a képlékenyalakításban*” című **akadémiai doktori értekezésében**.

Mérföldkövek

- 1981 – 1994: egyetemi docens
- 1994: habilitáció (Dr. habil)
- 1994 – 2021: egyetemi tanár
- 1996: a műszaki tudomány doktora (DSc)
- 2019-től: Professor Emeritus



Habilitációs előadás (1994)



**Műszaki tudomány doktora oklevél
(1996)**

Vezetői feladatok, egyetemi közélet

1972 – 2021

Hallgatóként és azt követően, a kialakult gyakorlatnak megfelelően fiatal oktatóként, vezető szerepet vállalt az akkori **ifjúsági szervezetben** (KISZ). A 70-es években volt a Gépészmérnöki Kar titkára, majd az egész egyetemi ifjúságot irányító ifjúsági szervezet vezetője (1980-1983).

Első nagyobb feladatként a Prof. Dr. Romvári Pál rektorhelyettes által irányított **Tudományszervezési és Nemzetközi Osztály vezetője** lett. Az Osztály fogta át az Egyetem egész tudományos kutató munkáját, valamint a nagy értékű ipari és szerződéses munkák keretében végzett kutatásokat. Ez az időszak egyrészt a hazai kutatás-fejlesztés irányító szervezetével, másrészt a dinamikusan bővülő hazai iparral való együttműködés szempontjából volt igen nagy jelentőségű. Az Osztály másik nagy feladatköre a nemzetközi kapcsolatok erősítése volt, a kelet-európai szocialista országokkal való együttműködések bővítése a nyugat-európai országok irányába.

Az 1980-as évek közepén a magyar kormány a felsőoktatás jelentős korszerűsítését, az európai felsőoktatási térhez való felzárkózást tűzte ki célul, amelynek a pénzügyi feltételét a Világbankkal kötött szerződés biztosította. Az egyetemi megvalósításhoz **fejlesztési programiroda** alakult, amelyet **projektigazgatóként**, majd fejlesztési **rektorhelyettesként** irányított. A fejlesztések központi eleme az 1996-ban kidolgozott Intézményfejlesztési Terv (IDP), illetve az arra épülő Beruházási Program (CIP) alapján elnyert projekt volt. Megújult a Miskolci Egyetem oktatási struktúrája, a Campus épületeinek jelentős része, nagy volumenű gép és műszer beszerzésekre került sor.

Több mint két évtizeden keresztül volt a Mechanikai Technológiai **Tanszék vezetője**, egy rövid ideig az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai **Intézet igazgatója**, és öt éven át a Mechanikai Technológiai **Intézeti Tanszék vezetője**.

A kezdetektől részt vett a **doktori (PhD) képzésben**, alapító **törzstagként** a Gépészmérnöki Karon megalakult Sályi István Gépészeti Tudományok **Doktori Iskolában**, amelynek egy évtizeden át **vezetője** volt (2009 – 2018). Hosszú éveken keresztül részt vett a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola munkájában is.

Mérföldkövek

- 1991. január 1. – 2013. október 31.: tanszékvezető (Mechanikai Technológiai Tanszék)
- 1986 – 1989: osztályvezető (Tudományszervezési és Nemzetközi Osztály)
- 1987 – 1999: projektigazgató ((Világbanki) Projekt Iroda, illetve Intézményfejlesztési Program Iroda)
- 2000. január 1. – 2003. július 31.: fejlesztési rektorhelyettes
- 2013. november 1. – 2013. december 31.: intézetigazgató (Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet)
- 2013. november 1. – 2018. december 31.: intézeti tanszékvezető (Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék)

Hazai és nemzetközi tudományos szervezetekben végzett tevékenység

1972 – 2021

1972 óta tagja a **Gépipari Tudományos Egyesületnek** (GTE), 1980-tól a GTE Központi Képlékenyalakító Szakosztály vezetőségi tagja, a GTE Borsod megyei szervezete Képlékenyalakító Szakosztályának elnöke. A GTE keretében 1989-ben megszervezte a **International Deep Drawing Research Group (IDDRG)** magyar nemzeti bizottságát, 1989 és 1998 között a Magyar Nemzeti Bizottság titkári, 1998-tól a Bizottság elnöki teendőit látta el.

A **Magyar Tudományos Akadémia Miskolci Akadémiai Bizottságának** (MTA MAB) alapítás óta tagja, 1981-től 1994-ig ellátta az MTA MAB Anyagszerkezeti és Technológiai Bizottságának titkári teendőit. 1986 óta az MTA MAB Anyagszerkezeti és Technológiai Bizottsága Képlékenyalakítási Albizottságának vezetője. 1990 óta a MAB Gépészeti Szakbizottság, valamint a Kohászati Szakbizottság Anyagtudományi Bizottságának tagja, 2008-tól a MAB Gépészeti Szakbizottság elnöke.

1986 óta tagja a **Magyar Tudományos Akadémia Anyagtudományi és Technológiai Bizottságának** (MTA ATB). A Bizottságon belül tagja, illetve vezetője volt a Képlékenyalakítási Albizottságnak, a Gyártási Rendszerek Albizottságnak, valamint a Modellezés és Szimuláció a Képlékenyalakításban Munkabizottságnak. 2002-től 2008-ig az MTA ATB elnöke.

Tagja volt a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara Habilitációs Bizottságának és Doktori Tanácsának. Aktív szereplője a Magyar Tudományos Akadémia tudományos minősítő tevékenységének, kandidátusi és akadémiai doktori értekezések bírálójaként és bizottsági tagjaként.

Szoros szakmai kapcsolatokat ápol a hazai felsőoktatási intézmények társ tanszékeivel és intézeteivel, valamint a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány intézeteivel.

1989 óta tagja (az 1954-ben alapított) **International Deep Drawing Research Group**-nak (IDDRG). 1994-től a világszervezet elnökhelyettese, majd betöltötte a világszervezet elnöki tisztét (1996-1998). 1990 óta tagja a **European Scientific Association for Forming of Materials**-nak (ESAFORM), tagja volt a szervezet Tudományos Tanácsának és Igazgató Tanácsának. 1990 óta tagja az **International Conference on Technology of Plasticity** (ICTP) – a képlékenyalakítás legátfogóbb világszervezete – Tudományos Tanácsának (Standing Advisory Board of ICTP), valamint az **International Institution for Production Engineering Research** (CIRP) Képlékenyalakítási Tudományos Tanácsának (Scientific Technical Committee). 1997 óta tagja a **New York Academy of Science**-nek.



ICTP



ESAFORM



Hazai és nemzetközi projektek

1994 – 2019

Legfontosabb hazai projektek (2004 – 2015)

- TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029: Járműipari anyagfejlesztések: célzott alap kutatás az alakíthatóság, hőkezelés és hegeszthetőség téma-köreiben (2013-2015), szakmai vezető
- TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0002: Járműipari Felsőoktatási és Kutatási Együttműködés (2013-2015) Járműipari PhD képzési program, szakmai vezető
- TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001: A felsőoktatás minőségének javítása kiválósági központok fejlesztésére alapozva a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területein (2011-2013), Innovatív anyagtechnológiák alprojekt, szakmai vezető
- TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008: A Miskolci Egyetemen működő tudományos képzési műhelyek összehangolt minőségi fejlesztése (2011-2013), Sályi István Doktori alprogram, szakmai vezető
- HEFOP-3.3.1-P.-2004-06-0012/1.0: Moduláris rendszerű CAD/CAM/FEM kompetencia kurzusok szervezése és lebonyolítása felsőfokú végzettséggel rendelkezők át-, illetve továbbképzésére (2005-2007), szakmai vezető
- HEFOP-3.3.1-P.-2004-06-0039/1.0: Felsőfokú CAE képzés, Anyagtechnológiai folyamatok alprojekt, szakmai vezető

Legfontosabb nemzetközi projektek (1994 – 2019)

- H-2020 NMBP-2016-2017/H2020-NMBP-GV-2016 „Low Cost Materials Processing Technologies for Mass Production of Lightweight Vehicles – LoCoMaTech” (2016-2019), a magyar projekt résztvevő (Miskolci Egyetem) szakmai vezetője
- EUREKA_HU_08_ISMFP_ME „Development of Powerful Incremental Sheet Metal Forming” (2008-2012), szakmai vezető
- VIF-CA NMP2-CT-2004-507331 „Virtual Intelligent Forming” (2004-2008), a magyar partner szakmai vezetője
- ENFORM-IC15-CT98-0824 “Environmental Friendly Lubricants in Deep-drawing of Steel Sheet metals” (2000-2002), a magyar partner szakmai vezetője
- NATO SFP 972655 „Fracture mechanical investigations of atomic power plant materials” (2000-2002), a magyar partner szakmai vezetője
- ERB C15CT960715 „Lifetime Management of Transit Oil and Gas Pipelines in CCE/NIS Countries – LIMATOG” (1997-1999), a magyar partner szakmai vezetője
- PECO-NIS ERBCIPDT 940632 „Numerical and Physical Modelling of Materials Forming Processes – NUPHYMAT” (1994-1998), a magyar partner szakmai vezetője

Tudományos és Technológiai Együttműködés (TÉT) bilaterális projektek (1995 – 2001)

- Magyar-Szlovén: „RASH Tool” (1995-1996); „Theoretical, Experimental and Finite Element evaluation of Modern Sheet Metal Forming Processes” (1998-1999); „Integral Control of Sheet Metal Forming Processes by FEM Simulations – INTFEM” (2004-2005)
- Magyar-Német: D-27/98: „Experimental study and finite element adaptation of material laws and yield criteria for modern materials” (1998-1999); Dtart-03/04: „Enhanced and more reliable FEM codes for analysing sheet metal forming processes” (2004-2005)
- Magyar-Koreai: KOR-1/2000: „Inverse finite element determination of material and yield constants of sheet materials” (2001-2003)
- Magyar-Japán: JAP-1/1998: „FEM analysis of metal-ceramic composite joints” (1998-2000)
- Magyar-Ukrán: UK-15/99: „Lifetime management of transit oil- and gas pipelines” (1999-2001)

Publikációs tevékenység

Az időrendben első és utolsó publikáció bibliográfiai adatai a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT)

(1) Tisza, M.: Az ultrahang energia alkalmazása huzal és csőgyártásánál. In: IV. Vaskohászati Hidegalakító Konferencia, Dunaújváros, Magyarország (1974) pp. 67-69., 3 p.

...

(668) Béres, G. J. ; Lukács, Zs. ; Tisza, M.: Material parameters sensitivity on springback modelling of simple bending process. Key Engineering Materials 926 pp. 992-999., 8 p. (2022)

Kivonat az MTMT közlemény és idéző összefoglaló táblázatából

Közlemény típusok	Száma	Hivatkozások	
	Összes	Független	Összes
I. Tudományos folyóiratcikk	153	465	497
<i>ebből külföldi kiadású szakfolyóiratban idegen nyelven</i>	43	423	452
II. a) Könyv, szerzőként	6	63	79
<i>ebből idegen nyelvű</i>	3	60	62
II. b) Könyv, szerkesztőként	13	---	---
III. Könyvrészlet	2	4	5
IV. Konferenciaközlemény folyóiratban vagy konferenciakötetben	299	144	162
<i>ebből idegen nyelvű</i>	179	138	156
Közlemények összesen (I-IV.)	473	676	743
Absztrakt	4	2	2
További tudományos művek	144	34	36
Összes tudományos közlemény	621	712	781
Hirsch index (a disszertációk és egyéb típusú idézők nélkül)	13	---	---
Oktatási művek	33	---	---
<i>ebből felsőoktatási tankönyv idegen nyelvű</i>	5	2	2
Oltalmi formák	5	0	0
Közérdekű vagy nem besorolt művek	5	0	0
További közlemények	4	0	0
Idézők disszertációban, egyéb típusban	---	153	153
Összes közlemény és összes idézőik	668	902	972

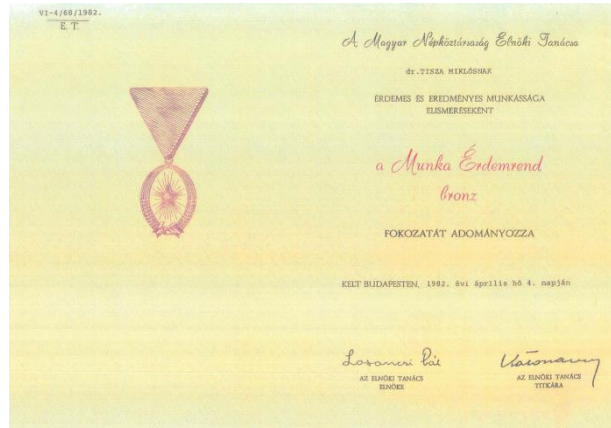
A publikációs tevékenységért kapott elismerések

- Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) Műszaki Irodalmi Díj (1980),
- Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) Nívódíj (1980),
- Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) Műszaki Irodalmi Díj (2009),
- Emléklap a Miskolci Egyetemnek és jogelődeinek 2017. év végére a Google Scholar szerinti legtöbbet hivatkozott művek között való szereplésért (2018),
- A Miskolci Egyetem Kiváló Tudományos Szerzője a 2020. évben (2020)
- A Miskolci Egyetem Kiváló Kutatója a 2021. évben (2021, postumus)

9. tárló

Fontosabb kitüntetések és elismerések

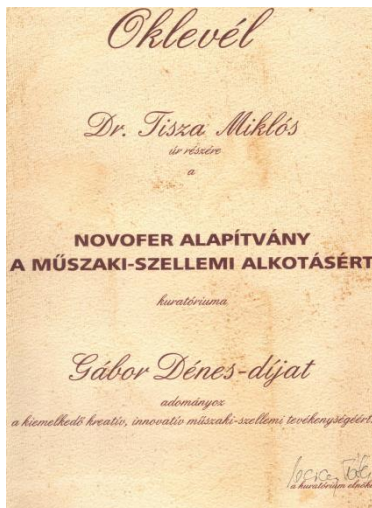
Tanulmányi Emlékérem Bronz fokozat (1968)
Tanulmányi Emlékérem Arany fokozat (1969, 1970, 1971, 1972)
Aranykoszorús KISZ jelvény (1970)
Becsület Diploma (1972)
KISZ Érdem-érem (1972)
Miniszteri Dicséret (1977)
Munka Érdemrend Bronz fokozata (1982)
Kiváló Munkáért – Magyar Köztársaság
Minisztertanácsa (1989)
GTE Egyesületi Érem (1993)
Signum Aureum Universitatis (1994)
Széchenyi Professzori Díj (1996)
Akadémiai Díj (1997)
Gábor Dénes-díj (1998)
Kari Jubileumi Emlékérem (1999)
Honorary Professor, Cluj-Napoca (2002)
Bálint Lajos Pro Scientia Technologiae
A technológiatudományért érem (2002)
Akadémiai Díj (2004)
Kari Emlékérem (2005)
Charles Simonyi-díj (2006),
Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikereszt
(2009)
GTE Zorkóczy Béla Emlékérem (2012)
Pro Universitate (2012)
A Miskolci Egyetem Díszpolgára (2014)



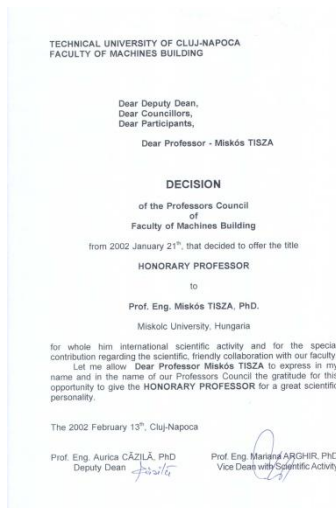
Munka Érdemrend Bronz fokozata (1982)



Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikereszt (2009)



Gábor Dénes-díj (1998)



**Honorary Professor,
Cluj-Napoca (2002)**



**A Miskolci Egyetem
Díszpolgára (2014)**

Életrépek



Prof. Dr. Zorkóczy Béla mellszobrának avatása a Miskolci Egyetem Díszaulójában (1996)



Emlékezés Prof. Dr. Romvári Pál 70. születésnapja alkalmából (Miskolci Akadémiai Bizottság székháza, 1999)



50 éves a Mechanikai Technológiai Tanszék – Emlékezés (Miskolci Egyetem, 2000)



60 éves a Mechanikai Technológiai Tanszék – Emlékezés (Miskolci Egyetem, 2010)



Az International Deep Drawing Research Group 2007. évi konferenciájának (IDDRG 2007) megnyitása (Győr, 2007)



A Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 (MTEKMR 2021) konferencia megnyitása (Miskolci Egyetem, 2011)



MISKOLCI
E G Y E T E M



PORTRÉSZOBOR

Dr. Tisza Miklós professzor úr emlékére

Tisztelt volt és jelenlegi Hallgatóink, Partnereink, Egyetemi Polgárok!

A Miskolci Egyetem régi hagyománya, hogy neves professzorainak emlékét különféle formákban (díjak, emlékplakettek, szobrok, kiadványok stb.) az utókor számára is megőrökíti.

Dr. Tisza Miklós professzor 2021. szeptember 27-én hunyt el, családja és az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet kollektívája elhatározta, hogy mellszobrot állítanak fel emlékére az A/4 főépület földszintjén az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet irodái által határolt épületrészben.

Kérjük, amennyiben lehetőségei megengedik, szíveskedjék a "MISKOLCI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KARÁN FOLYÓ MÉRNÖKKÉPZÉSÉRT" közhasznú alapítványnak nyújtott adományával támogatni Tisza Miklós professzor úrról portrészobor és kiadvány elkészítését. Az Alapítvány céljainak megvalósításához bármely hazai és külföldi, természetes-, vagy jogi személy, illetve jogi személyiséggel nem rendelkező szervezet pénzbeli vagy természetbeni adománnyal csatlakozhat.

Amennyiben magánszemélyként szeretne hozzájárulni kezdeményezésünkhöz, az alábbi számlaszámra juttathatja el támogatását. Jogi személyként, illetve jogi személyiséggel nem rendelkező szervezetként szíveskedjék jelzéssel élni a metsztne@uni-miskolc.hu email címre, ahonnan adományozási szerződés tervezetét juttatunk el Önhez.

Bankszámlaszám: 11600006-00000000-06877963

Átutalás közleménye: Tisza M. szobor támogatása

Miskolc, 2022. március 22.

Dr. Siménfalvi Zoltán
dékán, az Alapítvány Kuratóriumának
elnöke

Dr. Lukács Zsolt
intézetigazgató

