



Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Oxidációs mechanizmus vizsgálata termikus plazmaszórás során

Kókai Ákos Levente
II. éves MSc gépészmérnök hallgató

Konzulens:

Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Mária
egyetemi tanár

Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Miskolc
2021

TARTALOM

1. Bevezetés, célkitűzés.....	3
2. A termikus plazmaszórás.....	4
2.1. Szubsztrát alapanyagok.....	6
2.2. A létrejövő bevonatok struktúrája.....	6
2.3. A bevonatoláshoz felhasznált porok	7
2.4. A bevonatolási folyamat közben fellépő oxidáció.....	8
2.4.1. Az oxidációs mechanizmus és a bevonat felépítése.....	9
2.4.2. Az oxidációs mechanizmus befolyásolása ötvözőkkel	11
3. Kísérleti munka	13
3.1. A vizsgált anyagok.....	13
3.1.1. A szubsztrátum anyaga	13
3.1.2. A bevonatoláshoz használt alappor	13
3.2. A bevonatolási technológia.....	15
3.2.1. Állandó technológiai paraméterek	15
3.2.2. Változó technológiai paraméterek.....	15
3.3. A kísérleti munka során létrehozott bevonatok vizsgálata.....	16
3.3.1. CT vizsgálat	16
3.3.2. Csiszolatok optikai mikroszkópos vizsgálata.....	17
3.3.3. Röntgendiffrakciós vizsgálat.....	21
3.3.4. A kapott bevonatok kémiai összetételének vizsgálata vegyelemzéssel	25
3.3.5. A bevonatok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata	26
5. Összefoglalás.....	33
6. Az eredmények gyakorlati hasznosítása.....	35
7. A kutatómunka további iránya	35
Köszönetnyilvánítás	35
Felhasznált irodalom.....	36

1. Bevezetés, célkitűzés

Világunk gyorsuló ütemben fejlődik. Napi szinten jelennek meg újabb és újabb technológiák, melyek életünket könnyebbé, munkánkat hatékonyabbá teszik, termékeinket, szolgáltatásainkat pedig magasabb minőségi szintre emelik. Ezen fejlődés alól a gyártás technológia sem kivétel.

Az ipar szinte minden területe folyamatosan növekvő elvárásokat támaszt a termékekkel, a gyártással szemben. Az igények növekedése, valamint az agresszív használati körülmények az alkatrészek, a berendezések idő előtti tönkremeneteléhez vezetnek, amelyek komoly gátat jelentenek az adott alkalmazás, felhasználás szempontjából.

Mindennapi életünkben, továbbá az ipari alkalmazásokban számtalan esetben fordul elő, hogy alkatrészek, gépelemek, eszközök egymáshoz viszonyítva – relatíve – elmozdulnak, egymással érintkezésbe kerülnek. Az érintkezés során kopás alakul ki a fellépő súrlódás és hő hatására.

A kopás a legtöbb alkalmazás esetében egy nemkívánatos, sokszor az élettartamot korlátozó az alkatrészek felületi rétegében lejátszódó károsodási jelenség, amely komoly korlátokat jelenthet az adott funkció betöltése szempontjából. Az alkatrészek felületének minősége, tulajdonsága ezért meghatározó jelentőségű a kopásnak kitett termékek esetén. A kopás mértékének csökkentése, befolyásolása céljából, azaz a kopást elősegítő káros folyamatok, jelenségek megelőzése érdekében rendszerint az érintkező felületeket módosítják valamilyen felületkezelő eljárással. Egyes esetekben pedig a felületek felújítására, javítására használják ezeket az eljárásokat.

Ilyen felületkezelő eljárások közé tartozik az atmoszférikus plazmaszórás (atmospheric plasma spray, APS). Az eljárást kopás és korrózió védelemre, hőszigetelésre, a felületi sérülések javítására és a felület működőképességének helyreállítására használják. Az eljárással különböző minőségű és tulajdonságú bevonatok készíthetők. Az APS technológia az összes bevonatolási eljárás közül abban a tekintetben a legrugalmasabb, hogy a legkülönbözőbb bevonat anyagok hordhatók fel az erre alkalmas felületekre.

A bevonatolás folyamata során – mivel atmoszférikus körülmények közt végzik –, az olvadt fém oxidálódik a rendkívül nagy hőmérsékletű térben. Ezen oxidációs folyamat befolyásolja a létrejövő bevonat szövetszerkezetét, amely meghatározza a mechanikai tulajdonságát, a korrózióállóságát.

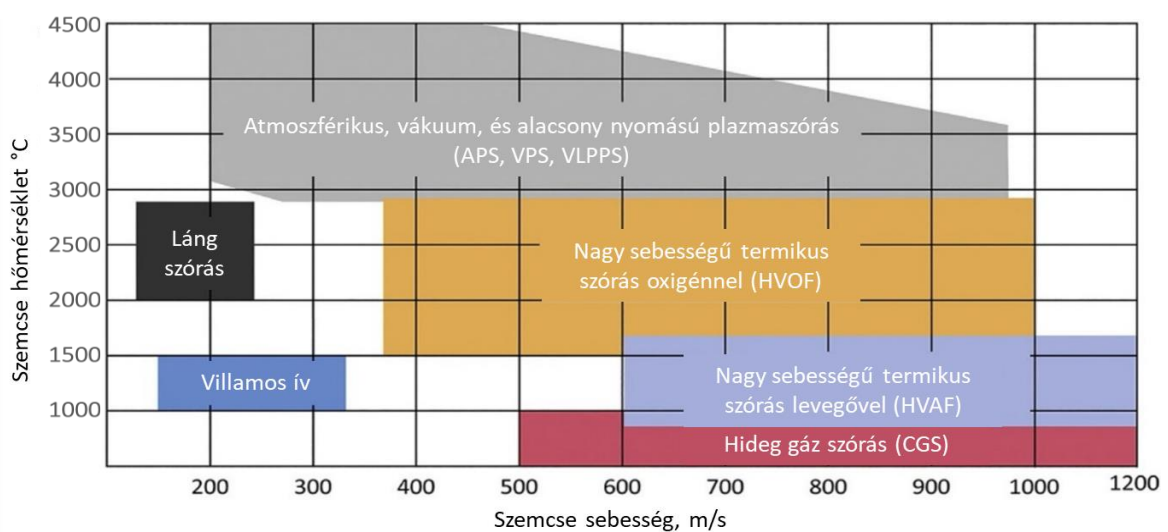
Tudományos diákköri munkám célja ezen oxidációs mechanizmus tanulmányozása, valamint annak vizsgálata, hogy az oxidáció milyen hatást gyakorol a létrejövő szövetszerkezetre, továbbá milyen hatással van a létrejövő bevonatok felületi topográfiájára, és azok megmunkálhatóságára. Ez egy rendkívül komplex folyamat, amely a legmodernebb vizsgálati technikák használatát követeli meg. Az elvégzett, és a dolgozatban bemutatott kísérleti munka egy összetett kísérletsorozat első lépcsője. A teljes kísérletsorozat célja és tervezett elemei a kísérleti munka című fejezetben kerülnek röviden bemutatásra.

2. A termikus plazmaszórás

A plazmaszórás egyike a termikus szórási folyamatoknak. A termikus szórás fogalma olyan eljárásokat foglal magába, amelyek során a felületre felhordani kívánt anyagokat képlékeny vagy olvadt állapotba hevítik, majd egy előkészített felületre irányítják.

A különböző termikus szórásos technológiák során a részecskék jellemző hőmérsékletét és sebességét a 1. ábra foglalja össze. A szubsztrátum (hordozó) felülete lokálisan megolvadhat a részecskék becsapódásának helyén. A szórási folyamat során egy kézi vezérlésű rendszer vagy egy ipari robot végigmozgatja a fegyverzetet a szubsztrátum felülete mentén, állandó álló távolságot tartva attól, miközben az alkatrészek ugyancsak mozgathatók [1].

A felhordandó részecskék sebességét és hőmérsékletét különféle termikus szórási folyamatok során az 1. ábra foglalja össze.

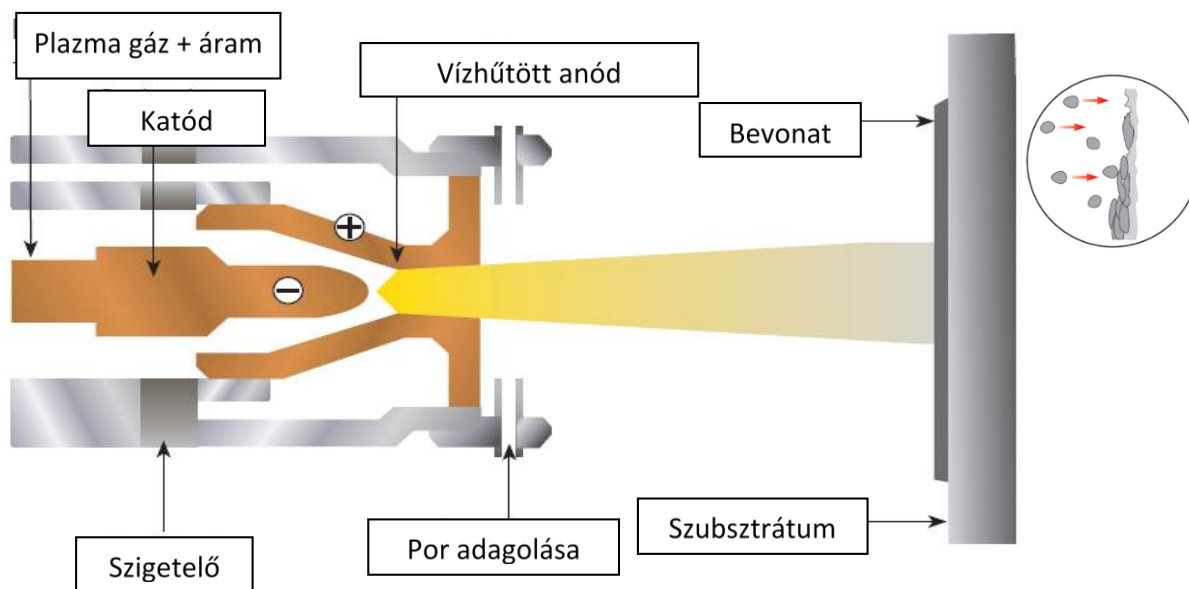


1. ábra. A részecskék jellemző hőmérséklete és sebessége a különféle termikus szórási folyamatokban. [1]

Az atmoszférikus plazmaszórás nagy energiájú hőforrást használ a kívánt minőségű bevonat alapanyagának megolvasztására, majd az olvadék állapotú cseppeknek a gondosan előkészített felület irányába történő nagy sebességű felgyorsítására. Az 1. ábrából látszik, hogy a részecskék hőmérséklete az összes folyamat közül jellemzően a legnagyobb, meghaladja a $T = 3000\text{ °C}$ -ot, míg sebességük széles tartományban, $v = 200\div 1000\text{ m/s}$ között változik. A cseppek a becsapódás után szinte azonnal megszilárdulnak a szubsztrátum irányában történő intenzív hőelvonás következtében. Így egy lamellás/réteges szerkezet jön létre az egész bevonat keresztmetszetére kiterjedően [2]. A bevonatolási folyamat során a hőforrást, azaz magát a plazmát egy anód és katód között keltett nagy teljesítményű és nagyfrekvenciájú villamos ívvel hozzák létre, amelyen gázkeveréket vezetnek keresztül, rendszerint valamely egyatomos inert gáz – legjellemzőbben argon –, valamint, valamely kétatomos gáz – jellemzően hidrogén – keverékét. A villamos ív, akkora energiasűrűséggel rendelkezik, hogy képes a kétkomponensű, esetenként háromkomponensű gázkeverék atomjairól elektronokat leszakítani, így gerjesztve

és plazma állapotba hozva azokat. A gáz a megnövekedett energia tartalom miatt felmelegszik, akár 15000 °C-ra, valamint expanziója következtében szuperszonikus sebességre gyorsul. Az így létrehozott, úgynevezett plazmasugárba vezetik be a felhordandó anyagot por vagy huzal formájában.

A plazmaszórás elvét és gyakorlatát az 2. és a 3. ábra mutatja be [2, 3, 4].



2. ábra. Az atmoszférikus plazmaszórás elve [3]



3. ábra. Egy turbinalapát bevonatolási folyamata atmoszférikus plazmaszórással [2]

Az atmoszférikus plazmaszórást rendkívül széles körben használják, így például a gépjármű-, és repülőgépiparban [5, 6, 7] a papír-, valamint a gépgyártás különböző ágazataiban, sőt, az

energetikai szektor is használja az ily módon bevonatolt alkatrészeket, szerkezeti elemeket. Számos esetben orvosi implantátumok, gyógyászati eszközök készítéséhez használják [8].

A különféle alkalmazási területekre mutat példát a 4. ábra.



a)

b)

c)

d)

4. ábra. Termikus plazmaszórással bevonatolt szerkezeti elemek [3]

a) Bevonattal ellátott csípőimplantátum; b) turbinalapát c) bevonatolt égéstér gázturbinához; d) APS bevonattal ellátott forgattyúház

2.1. Szubsztrát alapanyagok

A bevonandó alapanyag felületét a szórás megkezdése előtt mechanikusan, lézeres úton, vagy valamely más technológia alkalmazásával kellően érdessé kell tenni, ugyanis a bevonat adhéziója, azaz tapadása az alapanyaghoz legfőképpen mechanikus kötés révén jön létre. E technológia alkalmazására azok az anyagok felelnek meg legfőképpen, amelyek ezt az érdesítési folyamatot képesek elviselni. Általánosságban elmondható, hogy az 55 HRC, vagy annál kisebb keménységű anyagok ajánlottak [3].

A felületek megfelelő előkészítése, bevonatolás előtti tisztítása kulcsfontosságú. Az előkészített felületeknek teljesen zsír- és egyéb szennyezőtől mentesnek kell lennie [3].

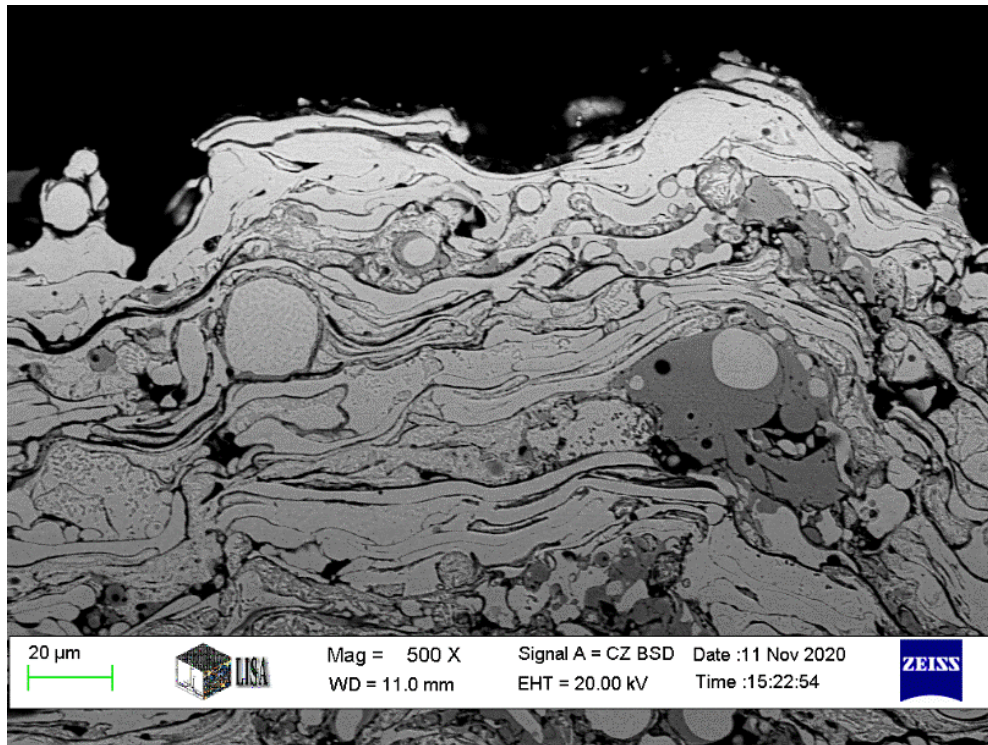
2.2. A létrejövő bevonatok struktúrája

Érdesítés, valamint tisztítás és előkészítés után következhet a bevonatolás folyamata. A szórás során számtalan technológiai paramétert kell figyelembe venni, rögzíteni, felügyelni. Ezen paramétereket a későbbiekben részletesebben is tárgyalom, ugyanis a kialakuló szövetszerkezetre, valamint a bevonat sajátosságaira meghatározó szerepet gyakorolnak.

Általánosságban elmondható, hogy a bevonatok nem egyetlen lépcsőben kerülnek kialakításra, hanem több, egymást követő lépésben, amelynek során a bevonatolófej mintegy végigpásztázza a bevonni kívánt felületrészt, ily módon egy több rétegből felépülő, lamelláris szerkezetet képezve azon. A tipikus rétegvastagság az egyes lépésekben 10÷20 µm között változik, így akár 800 µm vastag bevonatok is képezhetőek. Az így létrejött szerkezetre mutat példát az 5. ábra [9]

A bevonatolási folyamat során, mind a bevonat, mind a szubsztrátum hőmérsékletét pontosan kell szabályozni. A folyamat során nagy mennyiségű hőenergia van jelen, amely az anyagokban

nagymértékű maradó feszültségek kialakulásához vezet. Ezen feszültségek az olvadt állapotú, forró cseppek megszilárdulása és hűlése közben keletkeznek. A többlépcsős felhordás miatt, a már megszilárdult rétegre újabb olvadék cseppek kerülnek, amelyek hűlés közben zsugorodni kívánnak, tovább növelve a már kialakult feszültségeket a bevonat korábban kialakult, mélyebb rétegeiben [3, 4].



5. ábra. Atmoszférikus plazmaszórással létrehozott réteges szerkezetű bevonat [9].

Amennyiben a bevonat és a szubsztrátum hőtágulási együtthatójának értékét a bevonatolás során figyelembe vették, valamint a folyamat technológiai paramétereit megfelelően állították be, abban az esetben a létrejött káros húzó maradófeszültségek kompenzálhatók belső nyomófeszültségek létrejöttével.

Látható, hogy a hőmérséklet befolyásolása kulcsfontosságú a bevonatolás során, továbbá meg tudjuk állapítani, hogy a bevonatolandó darabot hűteni, vagy fűteni kell-e [3].

2.3. A bevonatoláshoz felhasznált porok

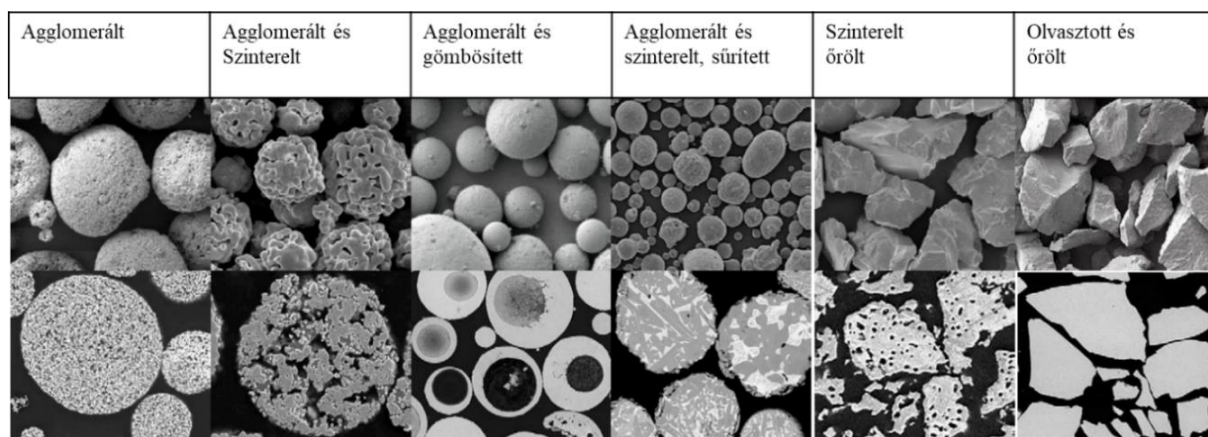
Az APS technológia alkalmazásánál nagy hangsúlyt kell fektetni a bevonat alapanyagának kiválasztására. A gyártási műveletet nemcsak az előállítandó bevonat kémiai összetétele befolyásolja, hanem a létrehozandó bevonat felhasználásának célja, a kialakult bevonat, tulajdonságai, továbbá az alkalmazás költségvonzata is (például a bevonatolási sebesség, a termék ára).

A bevonat-porok kémiai összetétele rendkívül széles skálán mozog. Autóipari felhasználásra javasolt porminőségekre mutat példát az 1. táblázat.

1. táblázat. Plazmaszórással felhordott bevonatanyagok [10]

A bevonat típusa	Keménység, HV _{0,3}	Mikroszerkezet
Szénacél wüsztit és magnetit szilárd fázisú kenőanyaggal	400	Ferrit mátrixban finom eloszlású karbid és oxid (FeO: wüsztit és Fe ₃ O ₄ : magnetit) szemcsék
Mo és ötvöztelen szerszámacél kompozitja	400	Ferrit mátrixban finom eloszlású karbidok és Mo II. fázis szemcsék, Kis mennyiségű vasoxid.
Cr, Mo ötvöztetésű korrózióálló acél	350	Ferrit mátrixban finom eloszlású karbidokkal és kevés oxiddal.
Fém mátrixú kompozit	400-450	Fé mátrix + kb. 20% kerámia szemcse, mint erősítőfázis

A morfológia tekintetében is nagy változatosság jellemző. Különféle alappor változatokra hoz példát a 6. ábra [11]. Elméletileg bármely anyag, amely nem bomlik el a fellépő hő hatására, alkalmas termikus plazmaszórásra. A bevonatolási mód határozza meg, hogy por, vagy huzal formájában adagolják a plazmába.



6. ábra. Különféle alappor változatok [11]

A különféle termikus plazmaszórási technológiákhoz többféle alappor típust fejlesztettek ki, amelyek a szemcsék alakja, mérete és a por összetétele tekintetében térnek el egymástól. Az alapporok méreteloszlása jellemzően a 10 ÷ 100 µm közötti tartományba esik.

2.4. A bevonatolási folyamat közben fellépő oxidáció

Egy fontos aspektusa a termikus plazmaszórással készült bevonatoknak, amelyeket atmoszférikus körülmények közt hoznak létre, a folyamat közben fellépő oxidáció. Maga az

oxidáció szignifikáns hatást gyakorol a kialakuló bevonat szövetszerkezetére, fázisösszetételére, tulajdonságaira, ezért annak minőségére.

A létrejött oxidok ridegek, kemények és törékenyek, hőtágulási tényezőjük eltér a bevonat többi fázisától, valamint csökkentik a bevonatok kémiai stabilitását, korrózióállóságát. Az oxidok törékenyséjük következtében rontják a bevonat mechanikai tulajdonságait, illetve annak alakíthatóságát is. E hátrányok ellenére, bizonyos esetekben előnyös lehet az alkalmazásuk. Kopásálló bevonatok esetén például növelik az abrazív kopással szembeni ellenállóképességet, valamint csökkentik az adhéziós kopás mértékét. Az oxidok egyes típusai szilárd kenőanyagként szolgálnak, így csökkentve a súrlódást, illetve a kopást [12].

Mindebből egyértelműen látszik, hogy a bevonatolási folyamat során fellépő oxidáció mértékét mindenféleképpen ellenőrzés alatt kell tartani, fontos szabályozni, figyelemmel kísérni, illetve annak mértékéről meg kell győződni. A folyamat szabályozásához elengedhetetlen annak megértése, hogy ezek az oxidok hogyan és hol keletkeznek. Atmoszférikus körülmények között végzett bevonatolás esetén a levegő reaktív gázai, különösen az oxigén, gyors reakcióba lép a plazmaívben található olvadt fém cseppekkel és a már megszilárdult bevonat rétegeivel.

Ez az oxidációs folyamat négy egymástól elkülöníthető szinten megy végbe:

- gáz-szilárd fázis oxidáció a por olvadék állapotba történő felhevítése során;
- gáz-folyékony fázis oxidációja az olvadt állapotú porcseppeknek a hordozófém felülete felé történő repülése során;
- gáz-szilárd fázis oxidáció az olvadt cseppek becsapódása után;
- egymást követő bevonatolási löketek között.

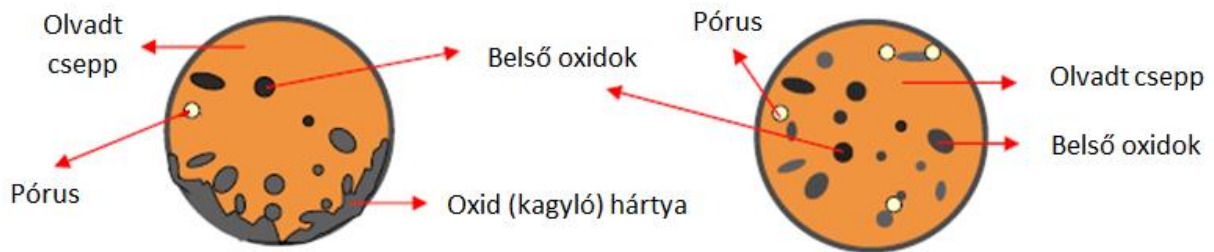
Számos kutatás irányult ezen oxidációs mechanizmusok tanulmányozására, amelyek megmutatták, hogy a legnagyobb mértékű oxidáció az olvadt cseppek repülésének ideje alatt következik be [3, 12, 13, 17]. Így az oxidációs folyamatot ebben a régióban lehet a leghatékonyabban szabályozni.

Magát az oxidációs mechanizmust két tényező befolyásolja a leginkább. Az olvadt állapotú cseppek hőmérséklete, valamint az őket körülvevő oxigén mennyisége. Harmadlagosan még az időt kell megemlíteni, ugyanis attól függően, hogy mennyi ideig van nagy hőmérsékletű állapotban a fém, annyi idő van az oxidáció végbemenetelére. Ebből látható, hogy amilyen mértékben képesek vagyunk a hőmérséklet értékét, továbbá a környezetben található oxigén mennyiségét befolyásolni, olyan mértékben szabályozhatóvá válik az oxidáció mértéke is.

A hőmérséklet nagyságát a plazma entalpiájával lehet szabályozni, amelyet az alkalmazott gázkeverék komponenseinek célszerű megválasztásával és arányuk beállításával érnek el. Az alkalmazott inert gáz mennyiségének növelésével a környezetben lévő oxigén egyre nagyobb hányada kiszorítható a plazma környezetéből [12, 13].

2.4.1. Az oxidációs mechanizmus és a bevonat felépítése

Mint már korábban bemutatam, az olvadékcseppek repülés közben oxidálódnak, az ilyenfajta oxidáció sematikus rajzát mutatja be a 7. ábra [12, 13].

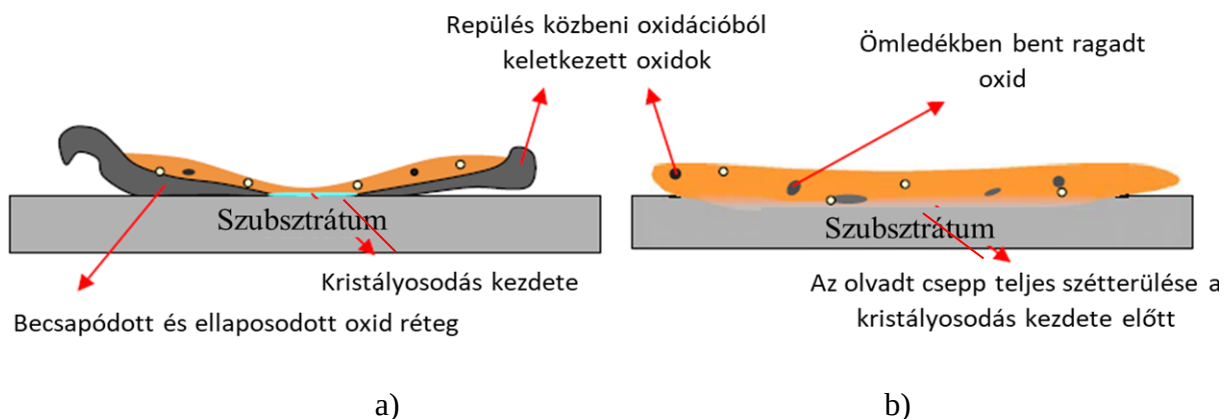


7. ábra. Az olvadt cseppek repülés közbeni oxidációs folyamata [13]

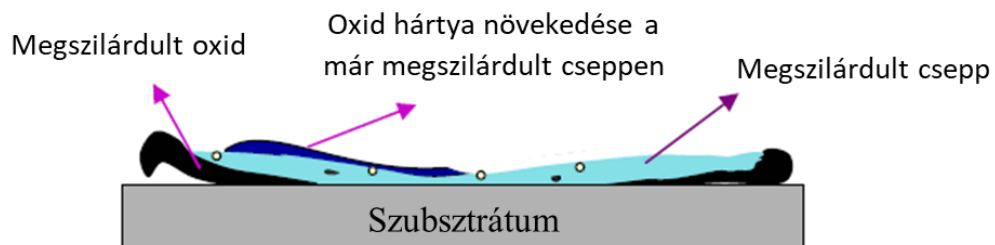
Azt követően, hogy a cseppek becsapódnak az alapanyagba a felülettel érintkező kagylós oxidhártya kinyílik és szétterül a felületen, az olvadt állapotú csepp pedig szinte azonnal megszilárdul, azaz kikristályosodik az intenzív hőelvonás következtében.

Elsőként a szubsztrátumhoz közeli tartományok kristályosodnak, majd ez a jelenség végigfut a csepp egész térfogatán. Mivel a frissen bevonatolt terület még kellően meleg, a környezettel érintkezve képes a további oxidációra, így egy hajszálvékony oxid-lamella kezd el növekedni a már megszilárdult cseppek felületén.

Ezek a folyamatok láthatók a 8. és a 9. ábrán.



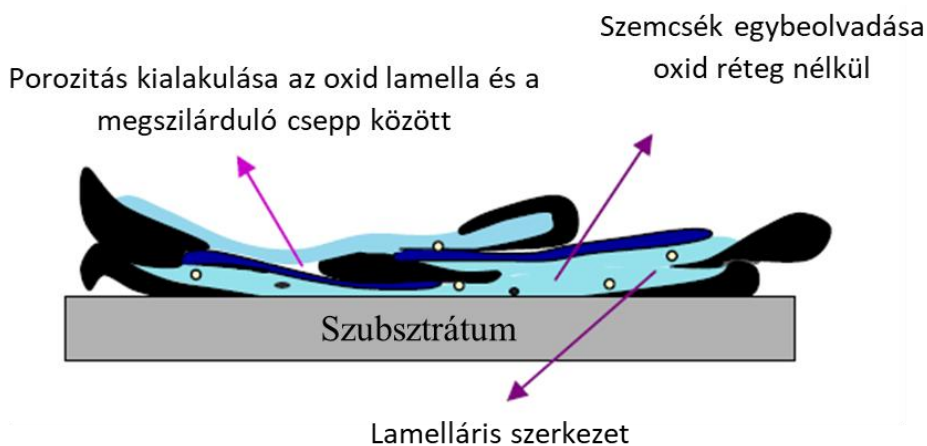
8. ábra. A repülés közbeni oxidáció hatása az oxidok morfológiájára – a) Az oxidhártya szétterülése az ömledék alatt b) Ömledék belső oxidokkal [12]



9. ábra. Becsapódás utáni oxidáció a csepp felületén [12]

Ezt követően ezeket a lépéseket ismételjük mindaddig, amíg a bevonat vastagsága el nem éri a kívánt mértéket.

Mivel a bevonatolófej több lépcsőben pásztázza végig a bevonni kívánt felületrészt, így ez a mechanizmus ismétlődik a folyamat során. Így épül fel tehát fokozatosan a bevonat réteges (lamelláris) szerkezete, amelyet a 10. ábra mutat be [12].



10. ábra. A bevonat lamelláris szerkezetének kialakulása a bevonatolás egymást követő lépcsőiben egymásra rétegződő cseppek révén [12]

2.4.2. Az oxidációs mechanizmus befolyásolása ötvözőkkel

Mint már korábban ismertettem, a bevonatolási folyamat során az oxidáció elkerülhetetlen. Azonban, mivel az oxidációnak szignifikáns befolyása van a kialakuló bevonatok minőségére, ezért ezen mechanizmus kontroll alatt tartása létfontosságú a minőség, illetve a folyamat stabilitásának szempontjából.

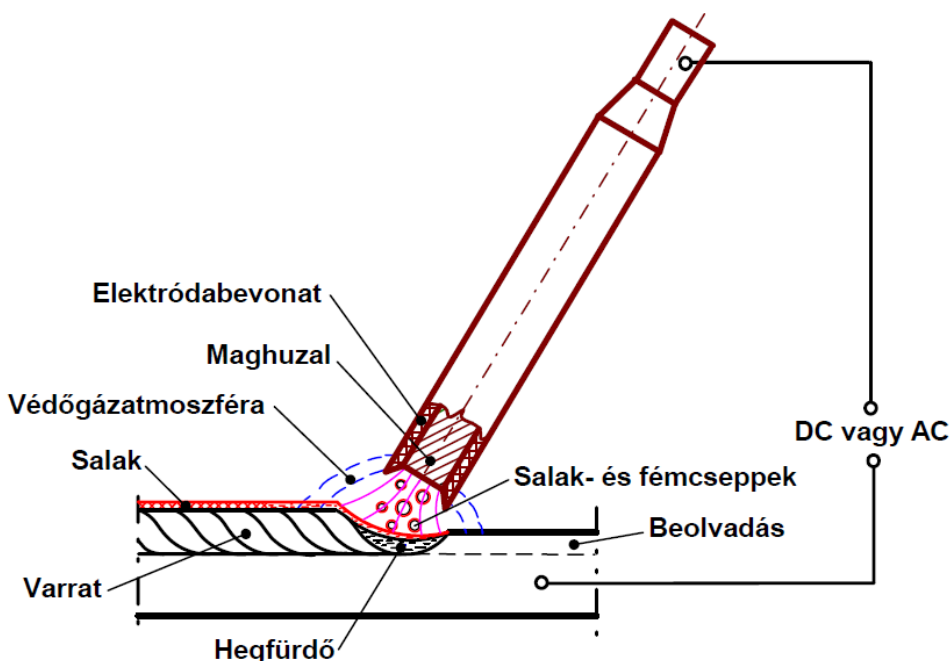
Az acélban az oxigén, hidrogén és nitrogén jelenléte számos nemkívánatos hatást gyakorol a mechanikai tulajdonságokra vagy a megmunkálhatóságra. Ezek az elemek növelik az acél ridegséget, ezáltal csökkentik a dinamikai terhelhetőségét, ezért káros hatásaik elkerülése céljából a lehetőségekhez mérten szabályozni, minimalizálni kell jelenlétüket az anyagban. Ezt legcélszerűbben dezoxidáns anyagoknak az alapporhoz való adagolásával érik el. Ilyen dezoxidánsok a Mn, a Si, vagy a P.

A bevonatolási folyamat elve nem tér el nagymértékben a bevont elektródás kézi ívhegesztés során lejátszódó dezoxidáló folyamatétól.

Hegesztés során az ömledékben található forró, folyadék halmazállapotú fém, legáltalánosabb esetben a vas, nagymértékű oxigén, továbbá nitrogén felvételére képes a környezetből. Ez a folyamat elkerülhetetlen a hegesztés során. Az elektróda bevonatába adagolt dezoxidáló szerek nagyobb affinitással rendelkeznek az oxigénhez, valamint a nitrogénhez, mint a hegesztés során összekötendő alapfém. Így az ömledékben oldott gázok nagyobb valószínűséggel fognak vegyületet képezni, ezekkel a dezoxidálószerekkel, mivel így termodinamikailag stabilabb, kisebb energiaszintű vegyületek, – például a MnO , SiO_2 – jöhetnek létre. Ezek a nemfémes vegyületek kisebb fajsúlyúak, mint az őket körülvevő fémes ömledék, ezért annak tetejére

felúszva, a varrat tetején egy salakréteget képeznek. Az ilyen salakréteg a hegesztés befejeztével könnyen eltávolítható, így védve a készülő varratot a környezet reaktív gázaitól. Ez egy célszerű módja annak, hogy az ömledékben található oldott gázok mennyiségét csökkentsük.

Erre a folyamatra mutat példát a 11. ábra.



11. ábra. A bevontelektrodás kézi ívhegesztés elvi vázlata [14]

Az atmoszférikus plazmaszórás során is hasonlóan játszódnak le ezek a folyamatok.

A plazmában kialakuló turbulencia miatt oldott oxigén és nitrogén a bevonat alapporához adagolt szilíciummal, és mangánnal a bevonat kialakulása során a szubsztrátumon létrejött ömledék zónában oxid vegyületeket, azaz salakot képez. Ezek a salakzárványok az ömledék tetejére úszva, majd onnan a későbbi megmunkálási folyamatban eltávolítva védik a kialakult bevonatot az oxidációtól.

Az oxidáció kezelése, kontroll alatt tartása – olyan bevonatok esetén, amelyek agresszív korróziós közegben kerülnek felhasználásra – elengedhetetlen.

3. Kísérleti munka

A TDK dolgozatomban bemutatott kísérleti munka, ahogyan arra a bevezetőben utaltam, egy nagyszabású összetett technológiai kísérleti program része.

A kísérletsorozat célja, a bevonatolás technológiai paraméterei és a kialakuló bevonat anyagszerkezeti és mechanikai tulajdonságai közötti összefüggések vizsgálata, egyrészt a bevonat gyártása során végzett megmunkálási folyamatok hatékonyságának növelése, másrészt a termék üzemelés során mutatott felhasználói tulajdonságainak javítása céljából.

A kísérletek során az atmoszféra összetételének és a gázáram mennyiségének a szabályozásával különböző minőségű bevonatok készülnek, amelyek mechanikai és anyagszerkezeti vizsgálatával számos értékes információt nyerhetünk a vizsgált paraméterek, valamint a bevonat technológiai és felhasználói tulajdonságai közötti kapcsolatra vonatkozóan.

3.1. A vizsgált anyagok

3.1.1. A szubsztrátum anyaga

A kísérletekhez egy olvadék állapotban nemesített EN AC-46000 AlSi9Cu3 jelű ötvözetből készült, mechanikusan érdesített felületű, nyomásos öntéssel gyártott alumínium hengert használtunk, amelynek átmérője Ø74 mm és hossza ~100 mm. A választott alumínium ötvözet, kémiai összetételét a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat. Az EN AC46000 AlSi9Cu3 kémiai összetétele tömegszázalékban kifejezve [15]

Elem	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
m/m%	8-11	1,3	2-4	0,55	0,55	0,15	0,55	1,2	marad.

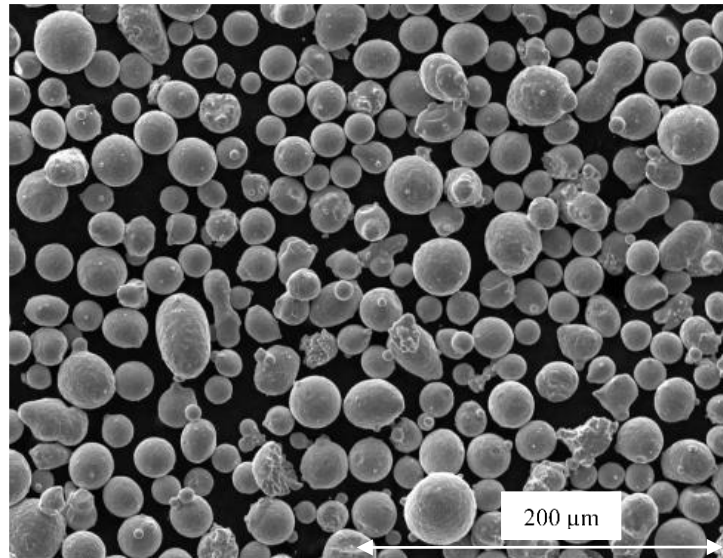
A választás azért esett erre az alapanyagra, mivel ez az alumínium öntvény a legelterjedtebb az autóiparban. További előnye, hogy ezt az öntvényt rendkívül kismértékű porozitás jellemzi az alkalmazott öntési technológiának köszönhetően.

Kis mennyiségű pórus kialakulása a technológia szempontjából elkerülhetetlen és az alkalmazás szempontjából megengedhető, de nagy mennyiségben rontja a bevonat szubsztrátumhoz való kötődését. Ez a romlás a bevonat leválásához vezethet, amely megengedhetetlen például az autóipari alkalmazásokban [16].

3.1.2. A bevonatoláshoz használt alappor

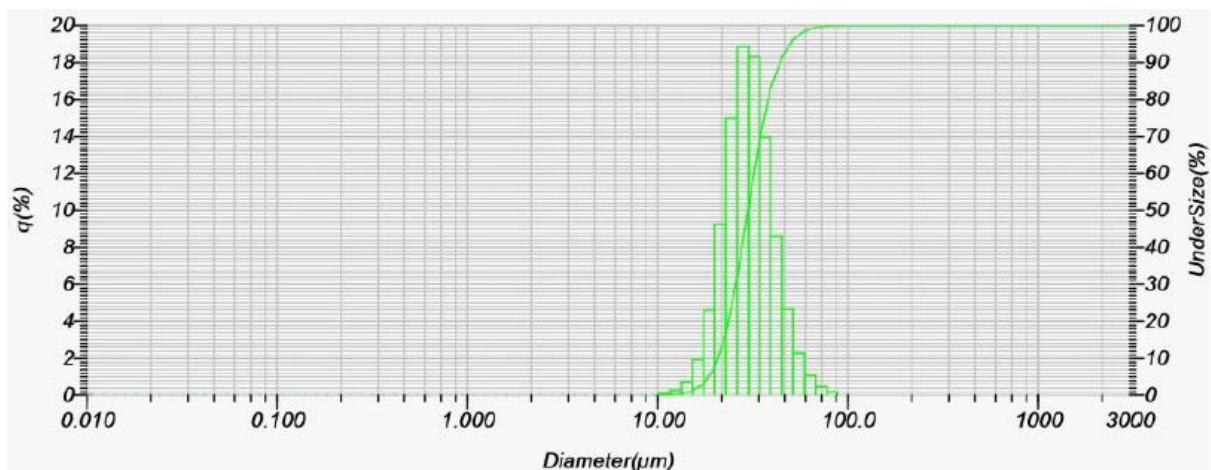
A kísérletekhez használt por típusa Oerlikon XPT-512, amelyet széles körben használnak a járműiparban, valamint a repülőgép iparban kopásálló bevonatok kialakítására. Ennek a pornak az alkalmazása azért előnyös a kísérlet szempontjából, mivel oxidációs viselkedése miatt könnyen detektálható oxidokat képez.

A por morfológiájának vizsgálata elektron-mikroszkóppal történt, amelyet a 12. ábra szemléltet.



12. ábra. Az Oerlikon XPT-512 por morfológiája

A por szemcséi gömb alakúak, valamint sűrűek. A méreteloszlást a 13. mutatja be, amelyen a por átlagos szemcsemérete 29,8 μm.



13. ábra. Az Oerlikon XPT-512 por szemcseméretének eloszlása

A por kémiai összetételét az 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Az Oerlikon XPT-512 alappor kémiai összetétele tömegszázalékban kifejezve

Elem	Fe	Mn	Cr	C	O	N
m/m%	95,6	1,5	1,4	1,3	0,0015	0,0133

Mivel az oldott oxigén mennyisége kevesebb mint 0,001 m/m%, ezért kijelenthető, hogy az oxigéntartalom tekintetében szinte teljesen tiszta acélpor került vizsgálatra ebben a kísérletben

3.2. A bevonatolási technológia

3.2.1. Állandó technológiai paraméterek

A kísérleteket egy Oerlikon RotaPlasma (APS) bevonatoló fej használatával végeztem, a fúvóka belső átmérője 6 mm volt. A bevonatolófej állandó fordulatszámmal egy belső furat bevonatolását végezte el 6 db kettőslökettel. A furat átmérője Ø74 mm volt. A bevonatolófej tisztasága érdekében, a bevonatolás során meg nem tapadt olvadt cseppeket levegővel folyamatosan el kell távolítani a furatból. Ehhez egy állandó sebességű levegőáramot hoznak létre, amelyet elszívásnak hívnak.

A bevonatolásnál használt, állandó értéken tartott további paramétereket a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. Az APS bevonatolási kísérleteknél alkalmazott állandó paraméterek

Feszültség	Áram-erősség	Bev. fej teljesítménye	Poradagolás sebessége	Argon áram	Elszívás sebessége	Bev. fej fordulatszáma
40 V	360 A	14,5 kW	120 g/min	40 l/min	17 m/s	600 1/min

A reakciótérbe az argon, mint primer gáz mellé hidrogént kevernek. A hidrogén adagolásának nincs számottevő hatása a kialakuló plazma hőmérsékletére, illetve annak sebességére, viszont a plazma hővezetőképességét, továbbá a hőáramlást a plazma, illetve az alappor szemcséi között jelentősen képes megnövelni. Amennyiben a plazmához kizárólag argont használnánk, az nem lenne képes a port olvadáspontra hevíteni.

Az argonnak a plazma esetében az a szerepe, hogy szabályozza a plazma viszkozitását, valamint tömegáramát, amely magát a port szállítja. Hidrogén hozzáadásával azonban jelentősen lehet a por szemcséinek hőmérsékletét növelni egészen addig, amíg aszimptotikusan el nem ér egy határt, ~6 l/min hidrogén áram esetén. A gázáram további növelésével már nem következik be szignifikáns hőmérséklet növekedés [17].

3.2.2. Változó technológiai paraméterek

Mivel a szemcsék hőmérsékletére a legjelentősebb hatással a hidrogénáram van, ezért kísérleteim során ennek a gáznak a térfogatáramát módosítottam 3 lépcsőben, majd az így kialakított bevonatokban létrejött oxidok mennyiségét, illetve a bevonatok oxigéntartalmát vizsgáltam.

A hidrogén térfogatáram kísérletek során alkalmazott értékeit a 5. táblázat mutatja be.

A szakirodalom kutatás eredményei alapján azt várom az elvégzendő kísérletektől, hogy a hidrogéntartalom csökkentésével az oxigén tartalom csökkenni fog. Amennyiben a bevonat oxigén szintje csökkenthető, és a bevonatok minőségének romlása nem tapasztalható, úgy nemcsak a bevonatolási folyamat, és a későbbi megmunkálások folyamatstabilitását lehet növelni, hanem a gyártás gazdaságossága is fokozható.

5. táblázat. A kísérlethez használt hidrogén tömegáramai

Megnevezés	Hidrogénáram (l/min)	Minta megnevezés
Kísérlet 1	6	Minta 1
Kísérlet 2	5,5	Minta 2
Kísérlet 3	5	Minta 3

3.3. A kísérleti munka során létrehozott bevonatok vizsgálata

3.3.1. CT vizsgálat

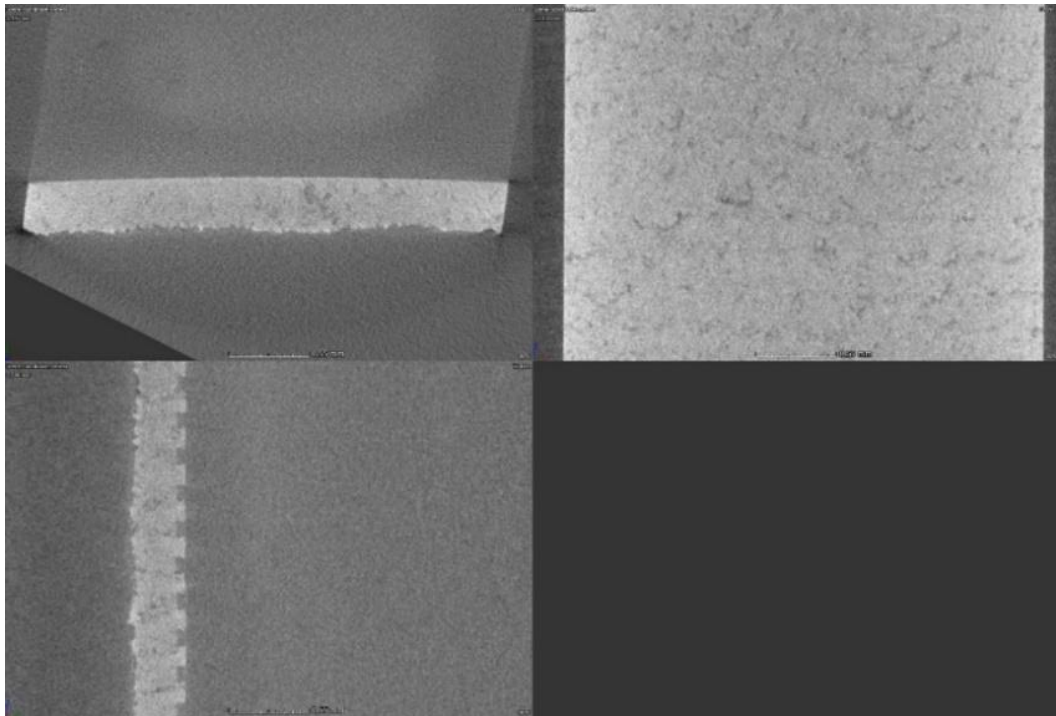
Elsőként a bevonatok pórusszerkezetének tanulmányozása volt a célom. A bevonatban található porozitás mindig a bevonatolás során képződött oxidzárványokhoz kötődve jelenik meg a szövetszerkezetben. Ezeknek a pórusoknak tanulmányozásával megállapítható, hogy a hidrogén mennyiségének változása hogyan befolyásolja az oxidok keletkezését, valamint a hozzájuk kötődő pórusok mennyiségét.

A 3D pórusszerkezet vizsgálatát a Miskolci Egyetem 3D Lab Finomszerkezet Vizsgáló Laboratóriumának kollégái végezték elszámomra. A vizsgálat egy YXLON FF35 MikroCT berendezéssel történt. A vizsgálat beállítási paramétereit az 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. Szkenelési paraméterek a CT vizsgálat során [9]

Vetületek száma	1601	Szkenelési idő	01:26:23
Szkenelési magasság, mm	14,998	Szkenelés típusa	Cone beam stop and go, Helical
FOD (fókusz-tárgy távolság), mm	9,6	Röntgenső típusa	FXE Transmission Beam
FDD (fókusz-detektor távolság), mm	480	Röntgenső fókusz módja	Microfocus
Nagyítás	50,00	Antikatód anyaga	W
Voxelméret, μm	2,8	Szűrő típusa	Cu; 0,1 mm
Gyorsítófeszültség, kV	190	Detektor „binning”	1 x 1
Áramerősség, μA	40	Detektor mód	1x1 0.5pF VG2
Teljesítmény, W	7,6	Detektor „framerate” (Hz)	7,3

Az eredmények kiértékeléséhez VGStudio MAX 3.2 szoftvert használtak. Az előzetes vizsgálatok eredményét a 14. ábra szemlélteti. A bevonat különböző irányú metszetein a világos bevonati rétegben látható sötétebb részek a pórusok. Ezek kontúrja azonban a mintákon elérhető legjobb felbontás (2,8 μm voxelméret) mellett sem élesen kivehető. Pontos morfológiát, kiterjedést így nehéz megállapítani.



14. ábra. Az előzetes porozitásvizsgálat céljából készült CT vizsgálat felvétele [9]

Így arra következtetésre jutottam, hogy a vizsgálati minta sajátosságai (anyag/geometria/pórusszerkezet jellege stb.) miatt a vizsgálat információtartalma nem kielégítő, ezért a pórusszerkezet vizsgálatát egyéb módszerekkel kell elvégezni.

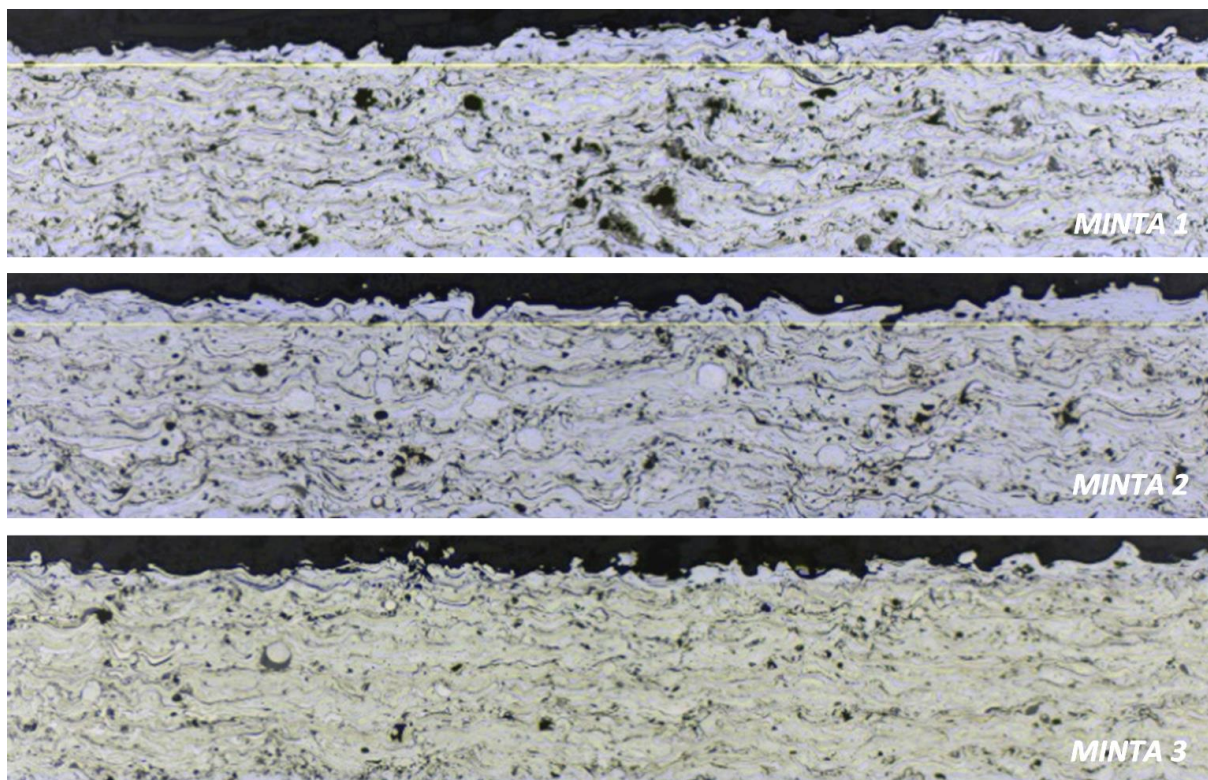
3.3.2. Csiszolatok optikai mikroszkópos vizsgálata

A bevonatok alumínium alapfémre lettek felhordva. A bevonat vastagságát a kettőslöketek számának változtatásával szabályoztam annak érdekében, hogy a minél megbízhatóbb vizsgálatok érdekében azonos bevonatvastagságokat tudjak elérni. Emellett, a bevonatolási folyamat során alkalmazott összes technológiai paramétert, beleértve a szórófej és az alapanyag közötti távolságot, állandó értéken tartottam, a bevonatolási folyamat egész időtartama alatt.

A 6 db kettőslöket alkalmazásával körülbelül 200 μm vastag bevonati réteget kaptam. Az így elkészült bevonatokon fénymikroszkópos vizsgálatokat végeztem a porozitás, illetve az oxidtartalom elemzése céljából, mivel közismert, hogy az oxidtartalom erősen függ a bevonatolás módjától, illetve az alkalmazott paraméterektől. Az optikai mikroszkópos vizsgálatok céljára a bevonatokról metszetek készültek, amelyeket gyantába ágyazás után políroztak. A kísérletek során létrehozott bevonatok optikai mikroszkópi metszeti képei a 15. ábrán láthatók.

A mikroszerkezeti képek alapján megállapítottam, hogy a hidrogénáram csökkentésével a bevonatok szerkezete, struktúrája tömörebbé vált, a bevonat szerkezetét egyre finomabb és diszperzebb eloszlású porozitás jellemzi. A vizuális megfigyelés alapján megállapítottam, hogy a porozitás mértéke a Minta 1, Minta 2 és Minta 3 sorrendnek megfelelően csökken. Egyértelmű strukturális változások a bevonat szerkezetében, a porozitási jellemzőktől eltekintve, nem figyelhetők meg. A bevonatok felépülése mindhárom esetben hasonló. Ilyen hasonló sajátosság,

a korábban is említett lamelláris struktúra, amely az APS technológiának megfelelően továbbra is mindhárom bevonatot jellemzi.



15. ábra. A háromféle hidrogén-áram (H) alkalmazásával készült bevonat keresztmetszetének optikai mikroszkópos felvételei;
Minta 1: $H=6$ l/min; Minta 2: $H=5,5$ l/min; Minta 3: $H=5$ l/min

A porozitással kapcsolatos vizuális megfigyelések csak kvalitatív jellemzésre adnak lehetőséget. A porozitás számszerű jellemzőinek meghatározására gyakori eljárás a mikroszkópi vizsgálatok során készült felvételek kvantitatív metallográfiai módszerrel történő kiértékelése. Ennek céljából a háromféle módon készült bevonattal ellátott hengerek különböző tartományait reprezentáló mikroszkópi felvételeket az ún. PixelFerber vizsgálati technikával értékeltem ki. A módszer sajátossága, hogy az eredmények kiértékelése során a mikroszkóp által készített képet bináris képpé alakítják, majd számszerűsítik a sötét és világos területek arányát a metszeteken.

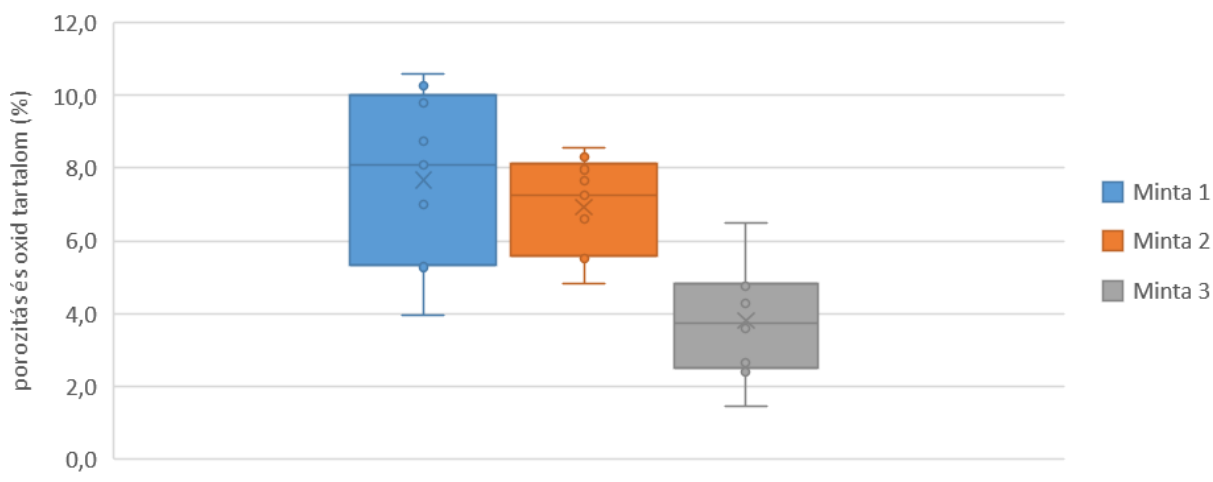
A sötét területek porozitást, illetve oxidokat jelentenek – mivel a képfeldolgozás során mindkét sajátosság azonos módon mutatható ki a bináris felvételeken –, a világos területek pedig a bevonat fémes alpmátrixát képviselik.

Minden egyes mintáról 9 darab kép készült a bevonat ~ 100 mm-es hossza mentén, 3 darab a henger felső, 3 darab a középső, és 3 darab az alsó tartományban. Mindhárom tartományban 3-3 helyen meghatároztam a bevonat vastagságát, és a porozitás+oxid tartalom számszerű értékét, majd az eredményeket átlagolva kiszámítottam az adott tartományt reprezentáló metszethez tartozó átlagértéket.

Az egyes mintáknál ily módon meghatározott porozitás-oxid, valamint bevonati rétegvastagság értékeket a 7. táblázat mutatja be, külön feltüntetve a felső, a középső és az alsó tartományban mért értékeket, valamint az adott technológiával bevonatolt vizsgálati hengerre vonatkozó, tartománytól független átlagos értékeket. Az eredményeket grafikusán a 16. ábra illusztrálja.

7. táblázat. A mikroszkópos vizsgálatok eredményei a három vizsgálati mintára

Vizsgált terület		Porozitás, illetve oxid tartalom (%)			Minimális bevonat vastagság (µm)		
		Minta 1	Minta 2	Minta 3	Minta 1	Minta 2	Minta 3
Henger felső tartomány	Mérés 1	4,0	5,5	1,5	252,6	266,6	243,9
	Mérés 2	5,4	4,8	2,6	240,1	235,2	235,7
	Mérés 3	5,3	5,6	2,4	246,8	232,3	255,0
	Átlag	4,9	5,3	2,2	246,5	244,7	244,9
	Szórás	0,8	0,4	0,6	6,3	19,0	9,7
	Var. eh., %	15,9	8,2	27,0	2,5	7,8	4,0
Henger középső tartomány	Mérés 1	8,1	7,2	4,3	235,7	245,4	239,1
	Mérés 2	7,0	6,6	3,6	228,0	269,5	204,3
	Mérés 3	8,7	8,5	3,7	223,6	250,7	235,7
	Átlag	7,9	7,4	3,9	229,1	255,2	226,4
	Szórás	0,9	1,0	0,4	6,1	12,7	19,2
	Var. eh., %	10,9	13,1	9,8	2,7	5,0	8,5
Henger alsó tartomány	Mérés 1	10,3	8,3	4,9	240,5	241,5	238,1
	Mérés 2	10,6	7,7	6,5	226,5	217,8	218,3
	Mérés 3	9,8	8,0	4,7	229,4	217,8	235,2
	Átlag	10,2	8,0	5,4	232,1	225,7	230,5
	Szórás	0,4	0,3	1,0	7,4	13,7	10,7
	Var. eh., %	3,9	3,8	18,4	3,2	6,1	4,6
Henger egésze	Átlag	7,7	6,9	3,8	235,9	241,9	233,9
	Szórás	2,7	1,4	1,6	9,3	15,0	9,7
	Var. eh., %	34,8	20,6	42,1	3,9	6,2	4,1



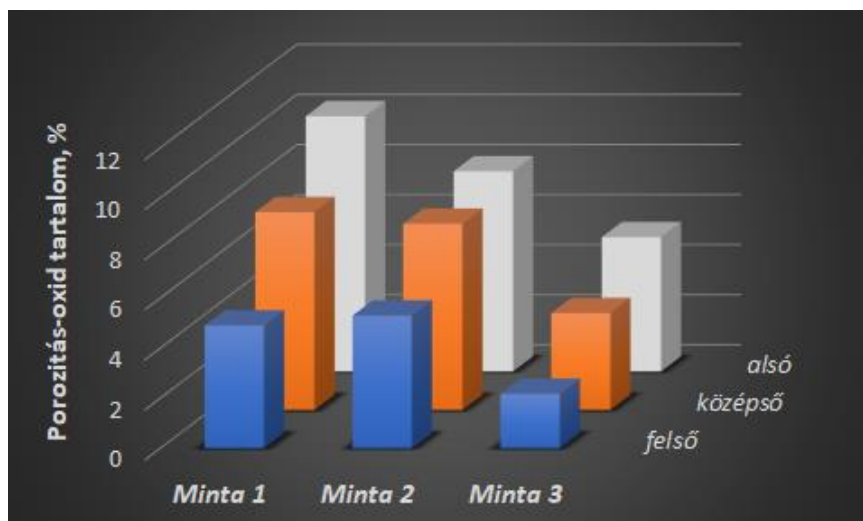
16. ábra. A háromféle hidrogénárammal készült bevonat együttes porozitás-oxid tartalmának összehasonlítása

A vizsgálatok alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- A Minta 1 esetén tapasztalható a legnagyobb mértékű porozitás, illetve oxid tartalom.
- A Minta 2 esetén a hidrogénáram 0,5 l/min mennyiségű csökkentésével (5,5 l/min értékre) már kimutatható, mintegy 20%-os csökkenés következett be a bevonatban jelenlévő pórusok mennyisége tekintetében. Azaz, már viszonylag kismértékű hidrogénáram csökkentéssel is észrevehetően megváltozik az oxidációs mechanizmus, azaz javítható a bevonat porozitása.
- Végül a Minta 3 esetén, a hidrogénáram további 0,5 l/min mennyiségű csökkentésének eredményeképpen rendkívül drasztikussá válik a pórusok számának, illetve az oxidok mennyiségének csökkenése. Megállapítottam, hogy 5 l/min térfogatáramú hidrogén esetén, az oxidáció mértékében igen jelentős, és kvantitatív metallográfiai úton számszerűen is kimutatható változások következtek be, és a porozitás 50 %-kal csökkent a 6 l/min hidrogénárammal végzett bevonatoláshoz képest.

A 7. táblázat adatai alapján egy további nagyon lényeges megállapítás tehető. Ha megnézzük a zárványtartalom (porozitás + oxid) változását a henger különböző magasságú tartományaiban akkor mindhárom bevonat esetében hasonló tendenciát látunk. A 17. ábrán jól látható, hogy a henger felső tartománya irányából lefelé haladva a bevonat zárványtartalma szisztematikusan nő. Ez a jellegzetesség nem függ az alkalmazott hidrogénáram mennyiségétől, a jelenség mindhárom minta esetében azonos módon fennáll.

A megfigyelt jelenség magyarázata lehet, hogy a bevonatolandó hengerben egyirányú volt az atmoszférát biztosító gázok áramlása, illetve a fel nem tapadt részecskék elszívása. Ez az irány a henger felső része felől az alsó rész irányába mutat. Így a henger alsó részén, ahol a rendelkezésre álló tér lecsökken az áramló közegek előtt, az áramlás hirtelen turbulenssé változik. Ez a turbulencia az oka a nagyobb pórus-, továbbá oxid tartalomnak.



17. ábra. A zárványtartalom (porozitás + oxid) változása a bevonat kivételi helyének változásával a hengermagasság szerinti különböző – felső, középső, alsó – tartományokban

A megfigyelt jelenség magyarázata lehet, hogy a bevonatolandó hengerben egyirányú az atmoszférát biztosító gázok áramlása, illetve a fel nem tapadt részecskék elszívása. Ez az irány a henger alsó része felől az felső rész irányába mutat. Így a henger alsó részén, ahol a rendelkezésre álló tér lecsökken az áramló közegek előtt, az áramlás hirtelen turbulenssé válhat, és oka lehet a nagyobb pórus-, és oxid tartalomnak.

3.3.3. Röntgendiffrakciós vizsgálat

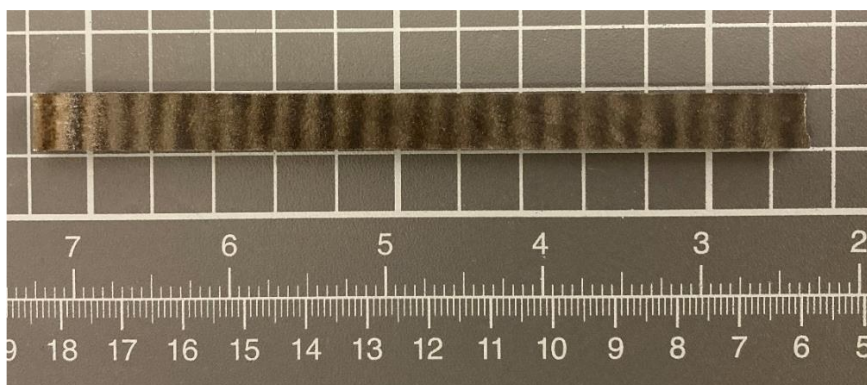
A röntgendiffrakciós vizsgálat célja, hogy az alumínium alaptestre felhordott plazmaszórt bevonat szövetszerkezetében található fázisokat feltárja. A fázisok, szövetelemek mennyiségi meghatározása révén megállapítható a bevonat kialakulásának pontos menete, illetve következtetni lehet a bevonatolási folyamat során végbemenő oxidációs mechanizmus mértékére, lefolyására.

A speciális berendezést és szaktudást igénylő vizsgálatokhoz a Miskolci Egyetem 3D laborjának munkatársai nyújtottak segítséget.

A röntgendiffrakciós vizsgálatokat egy Bruker D8 Discover XRD SAXS XRR berendezésen végezték, a vizsgált minták felületének görbülete miatt Göbel tükörrel előállított párhuzamos sugárnyaláb geometriában végezték, Cu $K_{\alpha 1+2}$ sugárzást alkalmazva 40 kV gyorsítófeszültséggel és 40 mA árammal. A mérhető intenzitás mennyiségét jelentősen csökkentette a homorú mintafelület.

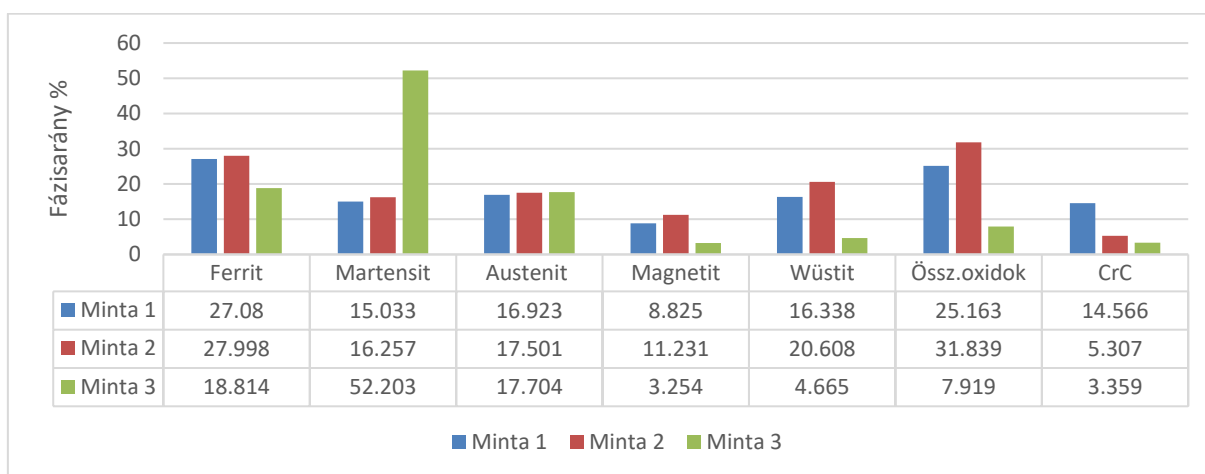
A teljes spektrum felvételét követően a kristályos fázisokat az ICDD PDF adatbázisból azonosították, az ausztenit, martenzit és ferrit fázisok szerkezeti jellemzőit Rietveld illesztéssel számolták ki minden minta esetében.

A vizsgálatához előkészített egyik mintát a 18. ábra illusztrálja, a mérési eredményeket pedig a 8. táblázat mutatja be [9, 18].



18. ábra. A röntgendiffrakciós vizsgálatához készített próbatest [18]

8. táblázat. A röntgendiffrakciós fázisazonosítás eredményei [9, 18]

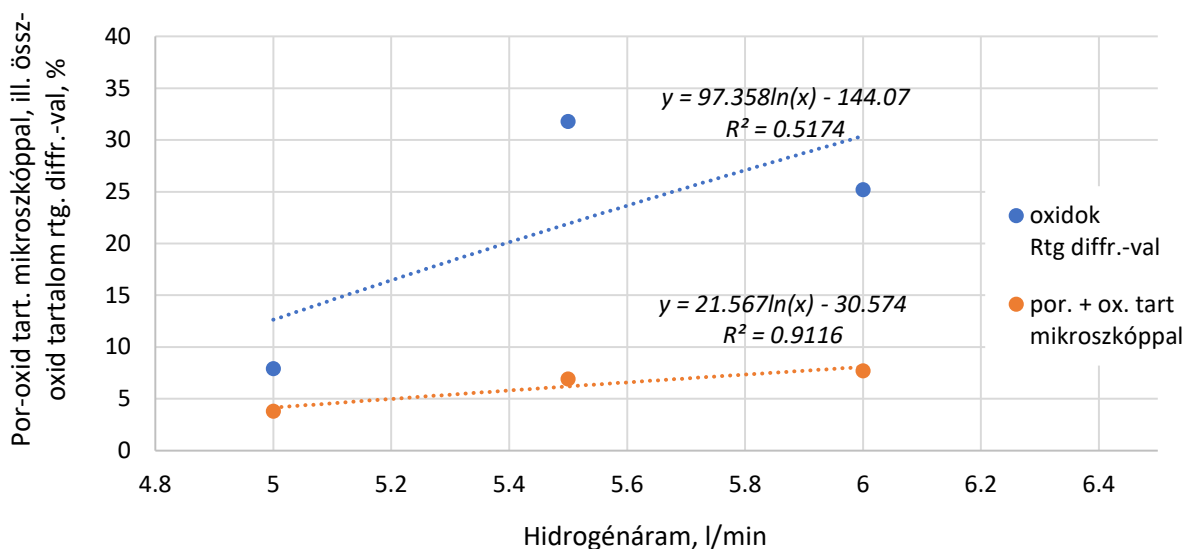


A minőségi fázisazonosítás eredménye szerint a mintadarabok ferritet, ausztenitet, wüsztitet, magnetitet és króm-karbidot tartalmaznak. A Rietveld illesztés feltárja a bevonat szerkezetének részleteit is. Jól látható a vizsgálat eredményeiből a bevonat szerkezetének nagyfokú heterogenitása is. A bevonatolási folyamat során rendkívül komplex metallográfiai folyamatok játszódnak le, amelyek bonyolultságát a dolgozat tárgyát adó oxidációs mechanizmus tovább fokozza.

Oxidáció tekintetében kijelenthető, hogy a Minta 1 és Minta 2 esetében nincs szignifikáns eltérés. Az oxidációs mechanizmus hasonló mértékben játszódtott le mindkét bevonatminta elkészültekor. A ferrit, martenzit és ausztenit mennyiségében sem figyelhető meg nagymértékű eltérés, amelyből az állapítható meg, hogy a metallográfiai folyamatok alapvetően hasonló módon és mértékben mentek végbe. A Minta 3 esetében azonban már jól láthatóan, szignifikánsan eltérő folyamatok játszódtak le. A ferrit mennyiségében némi csökkenés, a martenzit mennyiségében pedig nagymértékű növekedés tapasztalható, míg az ausztenit mennyiségében nincs kimutatható változás.

Az oxidációs folyamatokhoz kapcsolódó fázisok mennyiségének tekintetében igen jelentős csökkenés látható. Mind a magnetit, mind a wüsztit tartalom egy nagyságrenddel csökkent. E csökkenés mellett a Minta 1 és Minta 2 esetekhez képest a Minta 3 bevonat esetében harmadára

csökkent a bevonat össz-oxid tartalma. Ebből az a rendkívül fontos gyakorlati következtetés vonható le, hogy az oxidációs mechanizmus mértéke erősen függ a plazmába vezetett hidrogén mennyiségétől. Ennek számszerű vizsgálatára egy logaritmikus függvénnyel közelítettem az mikroszkópi úton meghatározott porozitás-oxid, illetve a röntgendiffrakciós fáziselemzés útján kapott össz-oxid mennyiséget. A közelítés a mikroszkópi úton meghatározott porozitás-oxid tartalom esetében igen jó korrelációs kapcsolatot mutat a hidrogénárammal, amint az a 19. ábrán látható, a röntgendiffrakcióval meghatározott össz-oxid tartalom esetében a kapcsolat jellege nem egyértelmű, bár a hidrogén árammal alapvetően itt is növekvő tendenciát mutat.



19. ábra. Az APS technológia során alkalmazott hidrogénáram, valamint a különféle módon meghatározott oxid tartalom közötti korrelációs kapcsolat vizsgálata

A vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a hidrogénáram nagysága arányban áll az oxidok fejlődésével, a két mennyiség között korrelációs kapcsolat van és a hidrogénáram csökkenésével az oxid tartalom monoton csökken. A kutatásaim későbbi fázisában részletesebben is szeretnék foglalkozni a kapcsolat matematikai jellegével. Ehhez a vizsgált mennyiségek fizikai kapcsolatát kell megvizsgálni, azaz, hogy a hidrogénáram milyen folyamatokon keresztül befolyásolja az oxid tartalmat és ezek a folyamatok milyen matematika összefüggésekkel, modellekkel írhatók le. Például, ebben a kísérletben csak a hidrogénáram és az oxidtartalom összefüggését vizsgáltam, ugyanakkor az oxidációs folyamatot más, itt figyelembe nem vett tényezők is befolyásolják, amelyek hatása a hidrogén áram módosításával közvetett módon megváltozhat.

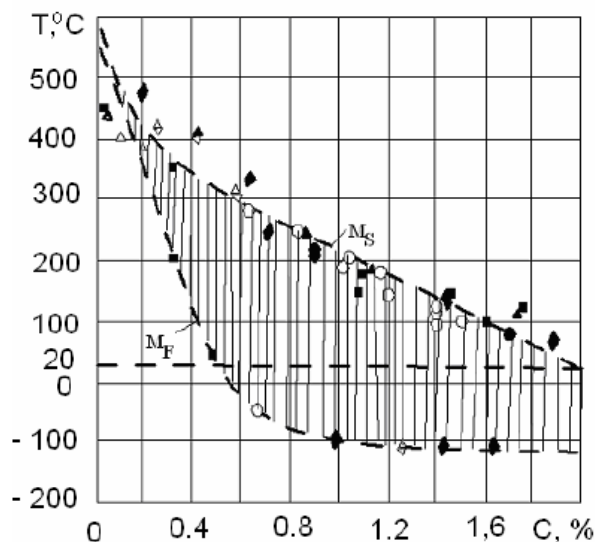
Mindezzel együtt a kísérletek abban a tekintetben rendkívül hasznos gyakorlati tapasztalattal szolgálnak, hogy az adott technológia paraméterek mellett mindössze a hidrogénáram változtatásával igen jelentősen módosítható a nemkívánatos oxidzárványok, azaz a bevonatban lévő salak mennyisége. Vagyis a kiinduló hipotézis – miszerint a bevonatban kialakuló salaktartalmat befolyásoló tényezők közül az egyik legjelentősebb hatású a hidrogénáram – helyes volt.

A jelenség fémtani háttere, hogy a hidrogén csökkentett mennyisége az alappor olvadék állapotának hőmérsékletét nagymértékben csökkentette. Mivel az oxidációs mechanizmushoz magas hőmérsékletre, illetve oxigénre van szükség, ezért a csökkentett hőmérséklet korlátozta a mechanizmus, azaz az oxidáció mértékét.

A bevonatok felépülésének menete a Minta 1 és Minta 2 esetében a következő. Az első kettőslöket felhordásakor a kialakult bevonat legnagyobb hányada martenzitté alakul. Azonban, a M_S (martenzit start = a martenzites átalakulás kezdő) és M_F (martenzit finish = a martenzites átalakulás befejező) hőmérsékletek a széntartalom függvényében változnak, amint az a 47. ábrán látható. Így a vizsgált esetben 1,3% C tartalomnál az M_F hőmérséklet már jóval szobahőmérséklet, sőt, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van.

Ebből az következik, hogy a bevonatok kialakítása során mindig lesz maradék ausztenit a fázisok közt, tehát ez a magyarázata, a röntgendiffrakciós vizsgálat által kimutatott ausztenit jelenlétének. Mivel a különféle hidrogénárammal bevonatolt próbatestek között, a maradék ausztenit tartalom tekintetében nincs számottevő eltérés, így kijelenthető, hogy a bevonatolás során alkalmazott hidrogén mennyisége a vizsgált körülmények között szignifikáns módon nem befolyásolja a maradék ausztenit mennyiségét, mivel az kizárólag a megszilárdulás végén kialakuló bevonat hőmérséklet, valamint a bevonat karbontartalmától függő M_F hőmérséklet függvénye. Ha összevetjük a háromféle mintában kialakuló maradék ausztenitnek a

8. táblázatban látható mennyiségét, akkor azt látjuk, hogy a hidrogénáram csökkentésével az ausztenit tartalom kismértékben nőtt, amelynek oka, hogy a hőmérséklet csökkenésével a C kiegészítés mértéke is csökken. Ennek megfelelően nagyobb C tartalmú bevonat képződik, amelynek M_F hőmérséklete valamivel kisebb, így a maradék ausztenit mennyisége enyhén nő.



20. ábra. Az M_S és M_F hőmérsékletek a széntartalom függvényében [19]

Az APS technológia során az első kettőslökettel felhordott bevonatban a soron következő löketek hője a martenzit rácsban rekedt szénatomok számára, – amelyek tetragonálissá torzítják azt –, lehetővé teszi, hogy kidiffundáljanak a rácsból, ferritet hagyva maguk után. Ezzel a

„megeresztési” folyamattal magyarázható a ferrit nagyobb mennyiségű jelenléte a Minta 1 és Minta 2 esetén. A Minta 3 esetében azonban, az olvadék állapotú cseppek hőmérsékletében nagymértékű csökkenés állt be. Ezt más szerzők is tapasztalták [13]. Mivel a hűlési sebesség még mindig a kritikus érték fölött van, ezért nagy mennyiségű martenzit keletkezik. A csökkent olvadék hőmérséklet miatt azonban, a már korábban felhordott réteg kevesebb hőt kap, ezért kisebb a megereztés mértéke is, így nagyobb mennyiségű martenzit marad vissza a létrejött bevonat szövetszerkezetében. Ez ad magyarázatot a Minta 3 esetén a martenzit jelentősen megnövekedett és a ferrit csökkent mennyiségére.

3.3.4. A kapott bevonatok kémiai összetételének vizsgálata vegyelemzéssel

Annak érdekében, hogy a kialakult oxidáció mértékéről egy pontosabb és komplexebb képet kapjunk, szükség van a kialakult bevonatok részletes kémiai elemzésére is. A vegyelemzés során egy nedves analitikai módszer segítségével határozták meg a bevonatok kémiai összetételét. A vizsgálatokat a karbon, a kén és az össz-oxigén tartalom kivételével a Miskolci Egyetem, Kémiai Intézetében ún. oldásos kémiai összetétel elemzéssel végezték, az említett elemek vonatkozásában pedig az ÓAM Ózdi AcélMűvek Kft.-nél történtek a vizsgálatok [9].

A dolgozat beadásának határideje előtt, sajnos a fent említett vizsgálatok nem fejeződtek be teljes mértékben, csak a Minta 1 esetében vannak teljeskörű mérési eredményeim. A továbbiak, azaz a Minta 2 és Minta 3 esetén a mérések még zajlanak, és remélhetőleg a dolgozat prezentációjának időpontjáig elkészülnek, így azokat a TDK konferencián (2021. április 26-án) bemutatandó előadásomban ismertetni fogom. A Minta 1 vegyelemzésének eredményeit az alappor kémiai összetételéhez viszonyítva a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat. Az alappor és a bevonatok kémiai összetétele [9]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al	V	Co	O, ppm	N, ppm
Alappor Oerlikon XPT-512	1,07	1,34	0,41	0,013	0,01	1,34	0,051	0,007	0,01	0,014	0,01	0,004	0,016	15	133
Minta 1	0,85	1,08	0,43	0,01	0,0098	1,46	0,08	0,08	0	<0,001	0,004	0,005	0,012	13443	516
Minta 2															
Minta 3															

A vizsgálat alapján látható, hogy a Minta 1 esetében rendkívül intenzív oxidációs folyamat zajlott le a bevonatolás során. Az eredeti oxigén tartalom közel ezerszeresére növekedett. Ennek oka lehet a bevonatolás során alkalmazott nagymértékű hidrogénáram, amely igen jelentősen megnövelte az olvadékcseppek hőmérsékletét. A rendkívül magas hőmérséklet miatt nagy mennyiségű oxigén volt képes oldódni az olvadék cseppekben. Ezek a vizsgálati eredmények teljes összhangot mutatnak a korábbi röntgendiffrakciós vizsgálat eredményeivel (ld. 3.3.3. fejezet), ugyanis a Minta 1 esetében relatíve magas oxid tartalom került kimutatásra.

A Minta 2 és a Minta 3 esetén ennek az oxigén tartalomnak a csökkenését várom a folyamatban lévő kémiai elemzések eredményeképpen. A hidrogén mennyiségének csökkentésével ugyanis csökkent az olvadék cseppek hőmérséklete, és a hőmérséklet csökkenés következtében kevesebb oldott oxigén képes jelen lenni az olvadékban, következésképpen az acél-alapmátrixban.

A Minta 1 esetén látható, hogy a mangán, illetve a szilícium értékei szinte alig változtak a bevonatolási kísérlet során. Ez arra enged következtetni, hogy a folyamat során a dezoxidáló szerek részvételével képződő salak nem volt képes az olvadék tetejére felúszni, illetve távozni a rendszerből. Így a salak további vizsgálata indokolt, ugyanis bizonyítékot kell találnunk erre a feltételezett „befagyási” mechanizmusra.

A Minta 2, illetve a Minta 3 esetén a Mn és a Si tekintetében is hasonló értékeket várok a kémiai összetétel vizsgálatok eredményeként, mindamellett, hogy az össz-oxigén szintjének jelentős csökkenése sejthető a megelőző eredményekből. A röntgendiffrakciós vizsgálatból látható, hogy a hűlési sebesség még csökkentett hidrogénáram mellett is a kritikus érték fölött maradt, így azt a következtetést vonom le, hogy a salak diffúziójára, távozására a rendszerből nincs kellő idő, a megadott konstans paraméterek mellett, azaz ezen próbatestek esetén a mangán, továbbá a szilícium mennyiségének csökkenése nem várható.

Figyelemre méltó még, hogy a Minta 1 esetén a vizsgált próbatest nitrogén tartalma a háromszorosára növekedett.

3.3.5. A bevonatok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

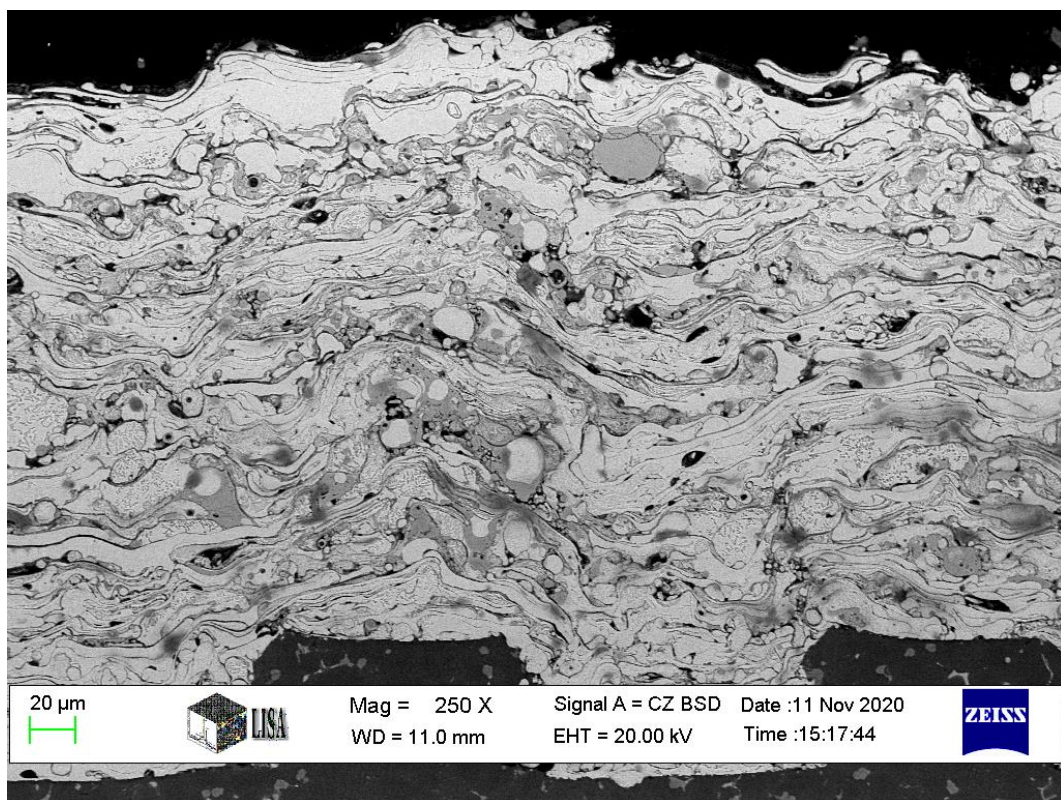
A bevonatok keresztmetszetének vizsgálata

A bevonatok felületének, illetve metszetének pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata elengedhetetlen része a lejátszódó fémtani folyamatok elemzésének. Ennek a vizsgálatnak a célja a bevonatok szöveti jellemzőinek a feltárása, a porozitás jellemzése, a szövetelemek morfológiai sajátosságainak vizsgálata, mint például a szemcseméret, vagy annak eloszlása, az ismeretlen szövetelemek szelektív területi kémiai analízis (EDX) segítségével történő azonosítása.

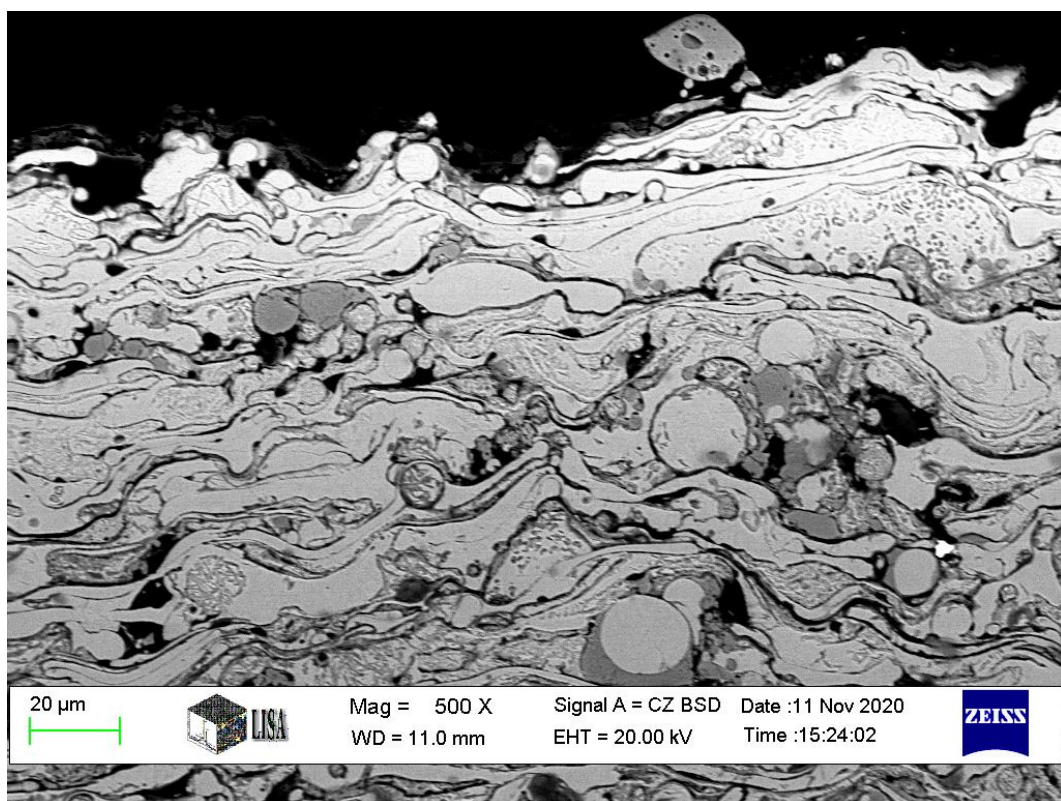
A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének Komplex Képelemző és Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában készültek, amelyek a vizsgálat jellegéből adódóan nem saját mérések voltak, azokat az egyetem szakemberi hajtották végre. A vizsgálatok Zeiss EVOMa10 típusú berendezésen történtek, a szelektív területi elemanalízis során energia diszperzív mikroszondás vizsgálatokkal (EDX) kiegészítve [9].

A bevonatok keresztmetszetének vizsgálatai idő hiányában csak a Minta 1 esetén lettek elvégezve. A további minták vizsgálata sajnos csak egy későbbi időpontban fog megtörténni. Ennek következtében jelen TDK dolgozatomban csak a Minta 1 SEM vizsgálatának eredményei kerülnek a továbbiakban bemutatásra.

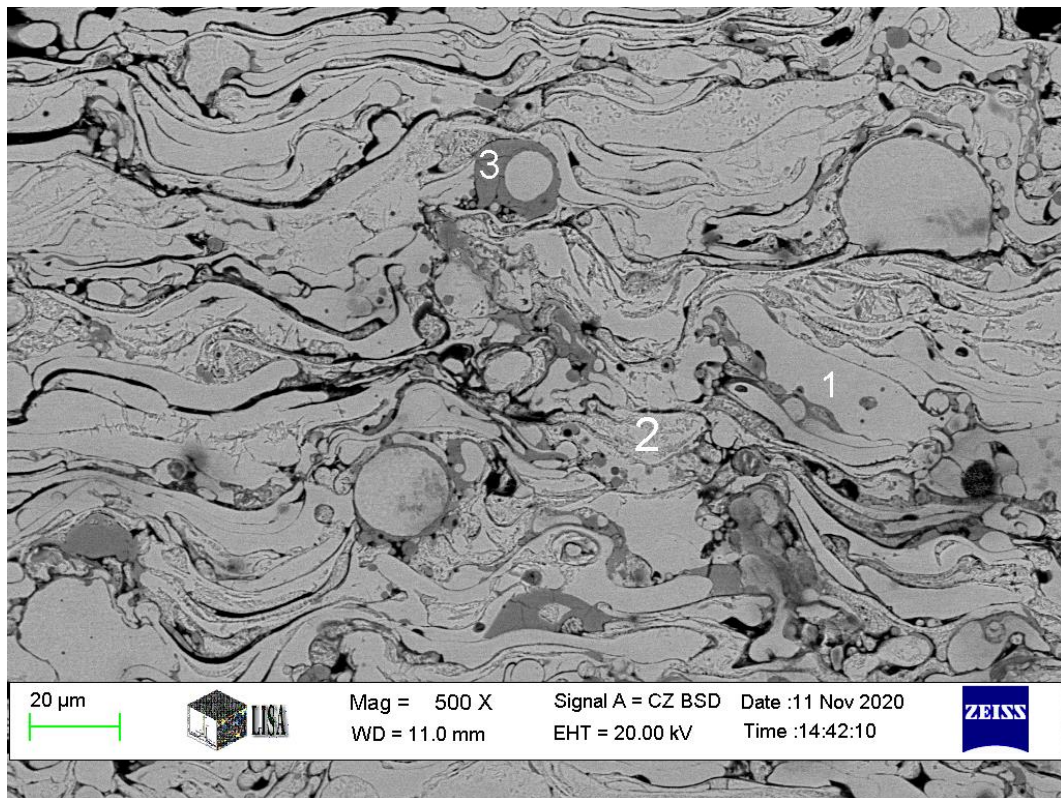
A Minta 1 csiszolatán a bevonat keresztmetszetének elektronmikroszkópos felvételeit a 21. és a 22. ábra mutatja be, a szelektív területi elemanalízis (EDX) vizsgálat eredményét pedig a 23. ábra és a 24. ábra részletezi.



21. ábra. A Minta 1 bevonatának teljes keresztmetszetéről készült SEM felvétel [9]



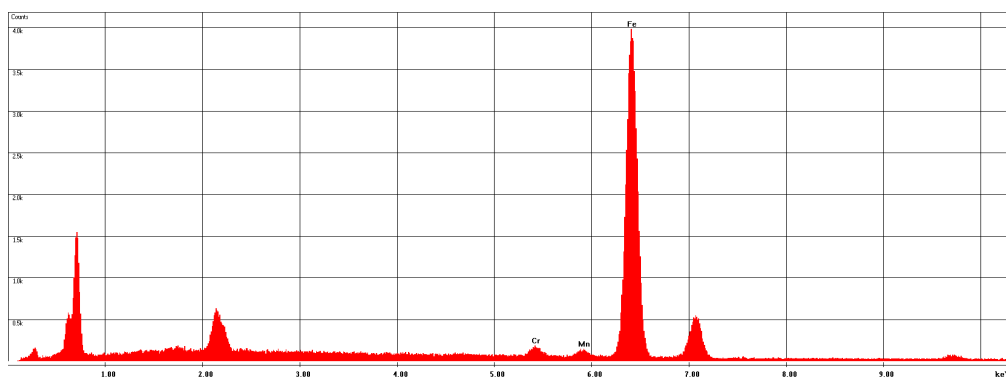
22. ábra. A Minta 1 bevonatának felső rétege (szubsztrátumtól távoli) [9]



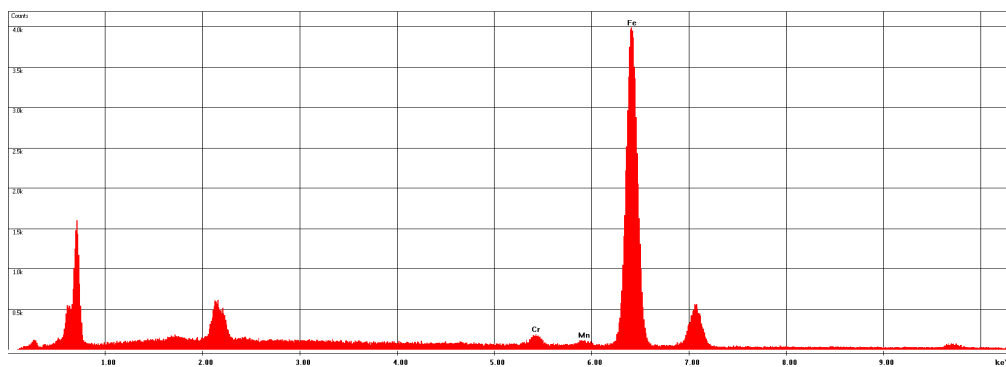
23. ábra. A szelektív területi elemanalízis (EDX) vizsgálat helyei a Minta 1-ben [9]

A 21. és a 22. ábrákon látható a Minta 1 erősen inhomogén rétegrendje, illetve a vegyes szövetszerkezet. Nagy a porozitás és a rétegek különválása, a rétegek között is vannak oxidok. A felvételeken látható sötét fekete területek az oxidációs mechanizmusból visszamaradó salak nyomai, amely bent rekedt a fémes alapanyagban a bevonatolási folyamat során. Anyaghiánynak látszik a felvételeken, azonban az ott lévő salak a próbatest előkészítésekor végzett vágási és csiszolási művelet során távozott onnan. Így látható, hogy a bevonatolás során nagy mennyiségű salak maradt vissza a bevonatban, növelve annak inhomogenitását.

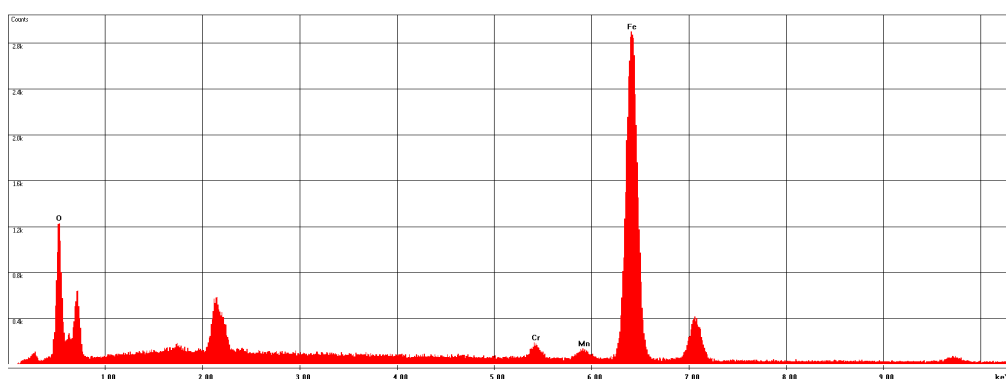
Megállapítható továbbá, hogy nagy mennyiségű oxid van jelen a csiszolatban, ez teljes összhangot mutat a korábbi vegyelemzés, illetve a röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményeivel. Láthatóak még a bevonatolási folyamat során az ömledékbe be nem olvadt alappor szemcsék. Ezek a szemcsék olvadék állapotban voltak, azonban az oxidáció mértéke olyan nagymértékű volt, hogy az egész csepp felületét beborító oxidhártya képződött rajtuk. Ez az oxidhártya kellően nagy szilárdsággal rendelkezett ahhoz, hogy a becsapódás során fellépő kinetikus energiát képes legyen elviselni, így a bevonatcsepp megtartotta gömbölyű alakját, amely nem engedte, hogy a csepp az ömledékben szétterüljön [5].



<i>1-es pont elemzése</i>	Elemek	Cr	Mn	Fe	Total
	Wt %	1.74	1.73	96.54	100.000
	At %	1.86	1.75	96.39	100.000



<i>2-es pont elemzése</i>	Elemek	Cr	Mn	Fe	Total
	Wt %	1.82	1.16	97.02	100.000
	At %	1.95	1.18	96.87	100.000

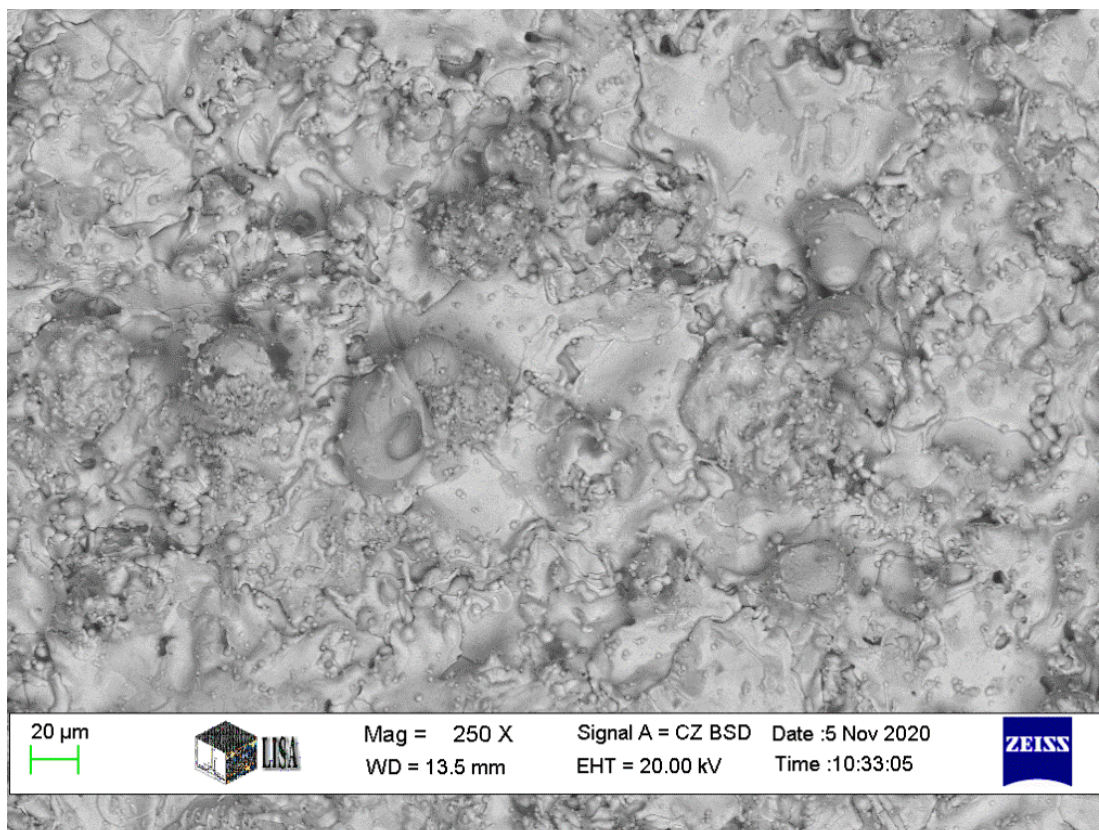


<i>3-as pont elemzése</i>	Elemek	O	Cr	Mn	Fe	Total
	Wt %	9.80	2.08	2.04	86.08	100.000
	At %	27.45	1.79	1.67	69.09	100.000

24. ábra. A 21. ábra szerinti szelektív területi elemanalízis (EDX) vizsgálat eredményei [9]

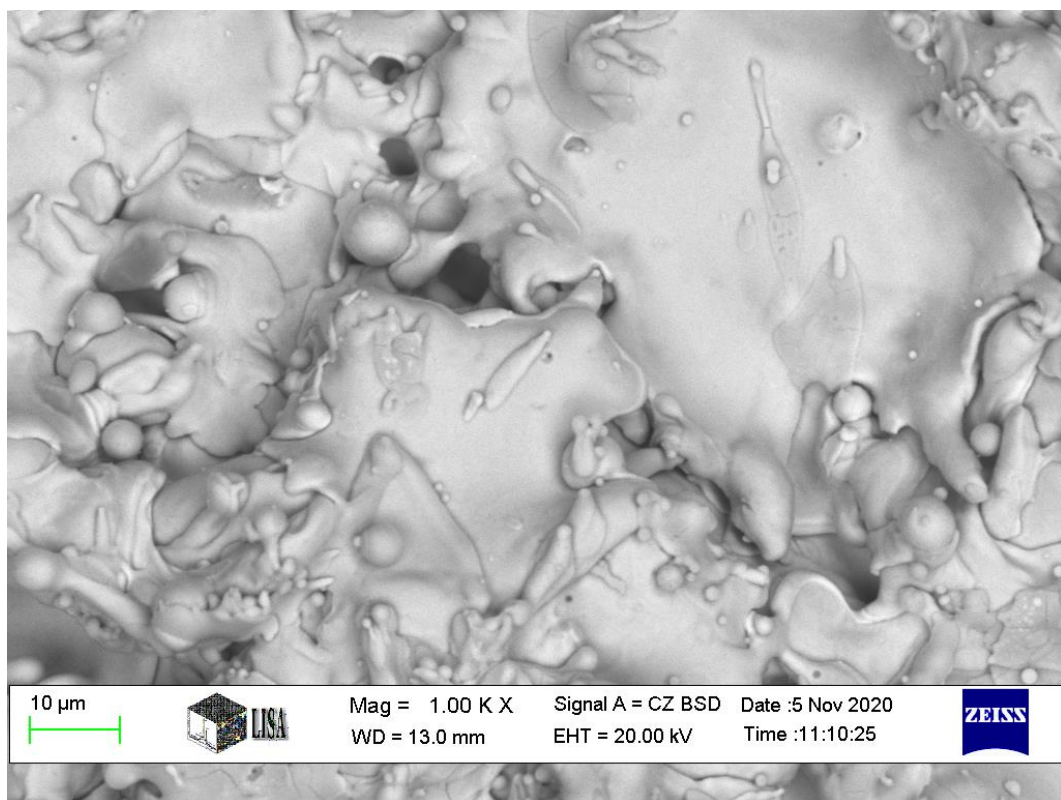
A bevonatok felületének vizsgálata

A bevonatok felszínén nagy mennyiségű oxid, illetve be nem olvadt alappor szemcse található. A dolgozatban bemutatott kísérletsorozat egyik alapvető célja volt ezen összetevők változásának vizsgálata, így ezek elemzése kiemelt fontosságú a vizsgálataim során. A bevonatok felszínéről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket a 25-28. ábrák szemléltetik [9, 18].

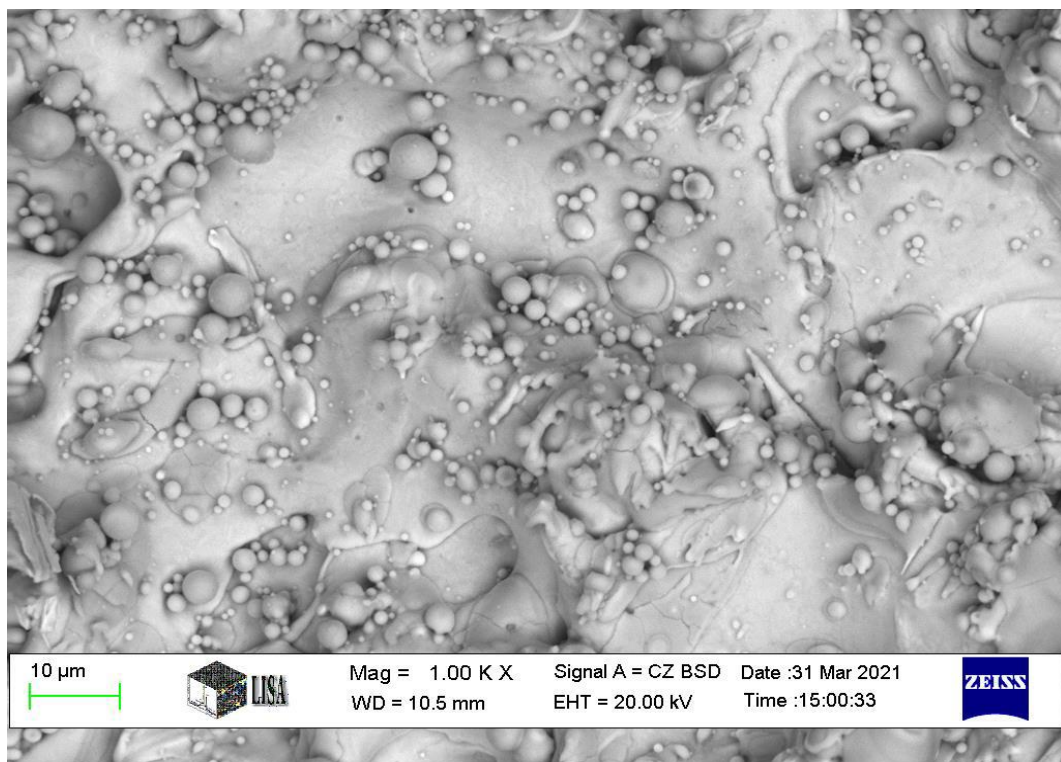


25. ábra. A Minta 1 felszínéről készült elektronmikroszkópos felvétel (N=250×) [9]

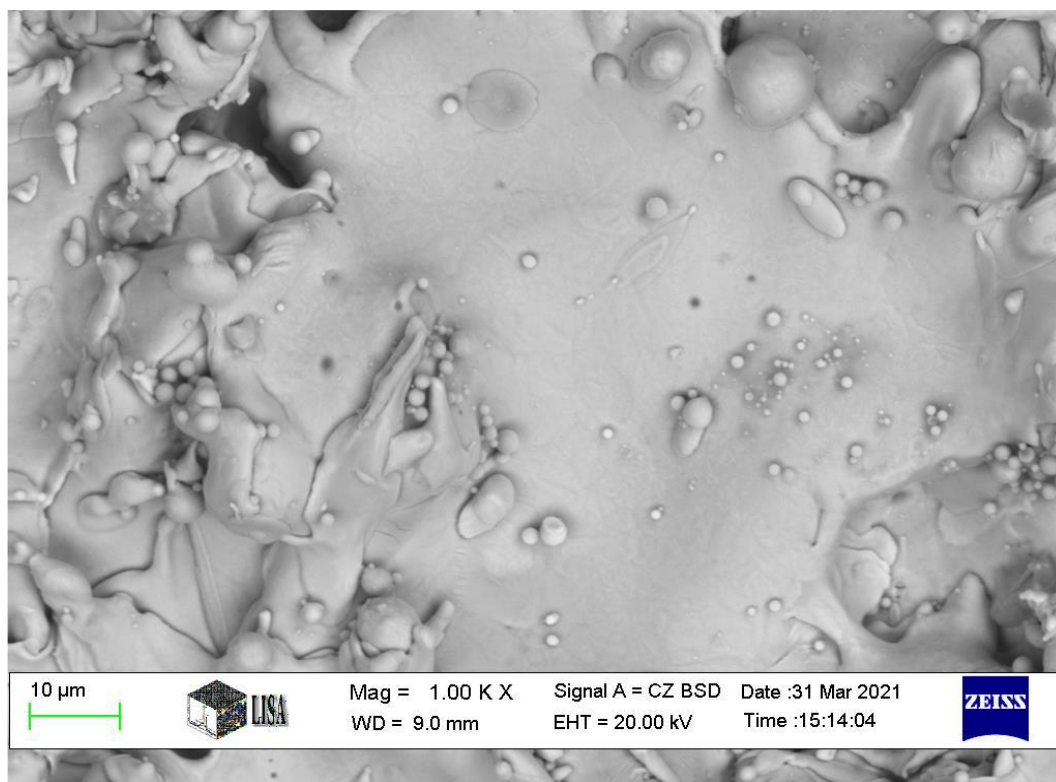
A Minta 1 vizsgálatakor megállapítottam, hogy inkább nagyméretű be nem olvadt cseppek találhatók a felületen, míg a Minta 2 esetén a vizsgálat helyén inkább aprószemű, rendezetlen eloszlású, be nem olvadt szemcsék láthatók. A Minta 3 esetén pedig a be nem olvadt szemcsék száma csökkenni látszik.



26. ábra. A Minta 1 felszínéről készült elektronmikroszkópos felvétel ($N=1000\times$) [9]



27. ábra. A Minta 2 felületének elektronmikroszkópos felvétele [18]



28. ábra. A Minta 3 felületének elektronmikroszkópos felvétele [18]

Mindebből az a következtetés vonható le, hogy az oxidációs mechanizmusnak az intenzitása a hidrogénáram változtatásával kimutatható módon megváltozott. Az oxidáció mértékének csökkenésével már nem volt arra lehetőség, hogy egész olvadékcseppeket borítson be az oxidhártya, így csak a 7. ábrán bemutatott, kisebb tartományokra kiterjedő oxidáció lépett fel, amely az olvadék cseppek homlokán formált egy-egy oxidhártyát.

A bevonatok felszínének pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata az elvégzett egyéb – azaz az optikai mikroszkópos, röntgen diffrakciós, és kémiai összetétel – vizsgálatokkal összhangban azt mutatja, hogy az oxidációs mechanizmus intenzitása egyértelműen csökkent a hidrogén áramának csökkenésével.

5. Összefoglalás

Dolgozatom célkitűzése autóiipari Al ötvözet felületén atmoszférikus plazmaszórással létrehozott acélbevonat kialakulásakor végbemenő oxidációs mechanizmus folyamatának megértése, az oxidáció mértékének és a plazmaszórás során alkalmazott hidrogénáram kapcsolatának a vizsgálata, valamint az oxidáció szövetszerkezetre gyakorolt hatásának tanulmányozása volt.

Ennek érdekében kísérleti tervet állítottam össze, amelynek során megvizsgáltam, hogy a bevonatolási folyamat során hőforrásként használt plazmába vezetett hidrogén tömegáramának változása milyen hastással van a kialakuló bevonat szövetszerkezetére, a benne képződő oxidok mennyiségére és morfológiájára, illetve a bevonatolási folyamat során az ömledékben képződő salak mennyiségére. A kísérletek során 3 különböző – 6 l/min, 5,5 l/min és 5 l/min – hidrogénárammal végeztem el a bevonatolást, minden egyéb technológia paramétert állandó értéken tartva.

A kísérletek egyértelműen kimutatták a hidrogén szövetszerkezetre gyakorolt hatását. Mind a kvalitatív, mind a kvantitatív vizsgálatok eredményei egyértelműen azt mutatták, hogy a bevonatban képződő oxidok mennyisége, következésképpen a salak mennyisége közvetlenül befolyásolható a hidrogén tömegáramán keresztül a vizsgált tartományban, és a megfigyelt korrelációs kapcsolatok azt mutatják, hogy a hidrogénáram csökkentésével az oxidtartalom is csökkenthető. A számszerű adatok alapján bebizonyítottam, hogy a hidrogénáram 17%-os csökkentésével a bevonatban kimutatható oxid típusú zárványok összes mennyisége több, mint 50%-kal csökkenthető.

Röntgendiffrakciós vizsgálatok segítségével kimutattam, hogy a kísérletek során a hidrogén csökkentett mennyisége a szövetszerkezetben jelenlévő ferrit fázisarányának csökkenéséhez vezet, és ezzel egyidejűleg a martenzit fázisaránya drasztikusan nő, míg a maradék ausztenit mennyisége gyakorlatilag változatlan marad. A hidrogén mennyiségének csökkentése rendkívüli mértékben csökkentette a bevonatolási folyamat során képződő magnetit (Fe_3O_4), illetve wüsztit (FeO) típusú oxidok mennyiségét. Ezek az oxidok acélgyártáskor is szokásosan képződő ismert vasoxid vegyületek. A magnetit jellemző keménysége ~ 400 HV, míg a wüsztité ~ 350 HV.

A bevonatok nedves analitikai módszerrel történő kémiai összetétel vizsgálata alapján kimutattam, hogy az alapporokban jelenlévő mangán, illetve szilícium dezoxidáló hatása révén salakot képez az ömledékben, így védve a kialakuló bevonatot az oxigén oldódásának káros hatásaitól. Kimutattam továbbá, hogy a legnagyobb (6 l/min) hidrogénárammal bevonatolt Minta 1 esetén az oxidáció rendkívül intenzív, és az alapporban található oxigén mennyiségéhez képest 3 nagyságrenddel nőtt az oldott oxigén tartalom a bevonatban.

A csökkentett hidrogénárammal bevonatolt Minta 2 és Minta 3 kémiai összetétel vizsgálata a dolgozat leadásának időpontjában még tart, így a pontos összetételi eredményeket csak az intézményi konferencián tudom bemutatni.

Az elvégzett egyéb vizsgálatok –röntgendiffrakciós fáziselemzés, optikai mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálat – eredményei alapján, amelyek mindhárom típusú mintán rendelkezésre állnak, már most is valószínűsíthető, hogy a folyamatban lévő összetétel vizsgálatok a Minta 2 esetében kisebb, míg a Minta 3 esetében jóval kisebb össz-oxigén tartalmat fognak kimutatni.

A csiszolatok optikai mikroszkópos vizsgálatával ugyancsak igazoltam, hogy a bevonat keresztmetszetében a porozitás, valamint az oxid tartalom a hidrogén mennyiségének csökkenésekor csökkenő tendenciát mutat. Fontos megjegyezni, hogy az optikai mikroszkópos elemzések során kapott számszerű eredmények, valamint a röntgendiffrakciós vizsgálatok, továbbá a vegyelemzés eredményei – bár tendenciájukban hasonlóak – nem mutatnak teljes egyezést, amelynek elsődleges oka, hogy az utóbbi két vizsgálat kizárólag az oxidtartalmat veszi figyelembe, míg az optikai mikroszkópos vizsgálat során a módszer technikájából következően a porozitás és az oxidtartalom mértéke együttesen kerül kimutatásra.

A porozitás meghatározás céljából elvégzett CT vizsgálatok használható információval sajnos nem szolgáltak, így ezen mérési metódus a bevonatok minősítésére nem alkalmas.

A bevonatok keresztmetszetének elektronmikroszkópos analízise során a Minta 1 esetén nagy mennyiségű salakot találtam. A szövetszerkezet ebben a mintában rendkívül heterogén és nagy porozitású volt, a rétegek között nagy volt a különválás, és köztük oxidzárványok helyezkedtek el.

A másik két minta keresztmetszetének vizsgálata még folyamatban van, amely várhatóan a porozitás csökkenését, az oxidlamellák vékonyodását, illetve a salak mennyiségének csökkenését fogják igazolni. Erre utalnak a bevonatok felületéről készült elektronmikroszkópos felvételek, amelyek mindhárom minta esetén rendelkezésre állnak. Ez alapján megállapítottam, hogy míg a legnagyobb hidrogénáramban bevonatolt Minta 1 felszínén durva és nagy mennyiségű be nem olvadt alapporból származó szemcse található, addig a Minta 2 és a Minta 3 esetén a hidrogénáram fokozatos csökkentésével a be nem olvadt szemcsék finomodása és a legkisebb hidrogénáramban létrejött Minta 3 esetében szemmel látható mennyiségi csökkenése figyelhető meg. Mindezek alapján a folyamatban lévő elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei a kémiai összetétel elemzéshez hasonlóan előzetesen becsülhetők, vagyis a hidrogénáram csökkenésével párhuzamosan a bevonatban oxidhártya és salak formájában jelenlévő oxidok mennyisége várhatóan csökken.

Minden kísérleti munka végén meg kell vizsgálnunk, hogy a kapott eredményeknek mi az alkalmazhatósági tartománya és a megbízhatósága. Az első kérdésre egyértelmű a válasz. A munkám során kimutatott egyértelmű kapcsolat az APS bevonatolási technológia során a plazmába vezetett hidrogén áram és a bevonat oxidzárványainak mennyisége között a fentiekben kimutatott módon egyértelmű, a megállapítások a kísérletek során alkalmazott 5 - 6 l/min hidrogénáram tartományban érvényesek.

Az eredmények helytállósága és megbízhatósága tekintetében pedig azt kell figyelembe venni, hogy a csiszolatok teljes felülete által képviselt összes vizsgált terület a bevonatolt henger teljes felületének mindössze ~0,009 % adja. Ennek megfelelően a bemutatott adatok validálása,

megbízhatóságának ellenőrzése céljából a vizsgálatokat nagyobb területre kiterjedően is célszerű megismételni, egy nagyobb elemszámú, reprezentatív mintavétellel, tehát a meglévő eredményeket körültekintéssel lehet csak felhasználni.

A kapott adatok azonban már most is alkalmasak – kísérleti úton és elméleti elemzések segítségével alátámasztott – tudományos eredmények megfogalmazására, és a bevonatolási technológia fejlesztését megalapozó következtetések levonására.

6. Az eredmények gyakorlati hasznosítása

A termikus plazmaszórással készült bevonatok tulajdonságot és felhasználhatóságot meghatározó tényezője a bevonatolási folyamat során lejátszódó oxidációs mechanizmus, amely alapvetően meghatározza a bevonat porozitását, valamint oxidzárványainak mennyiségi és minőségi jellemzőit. Így e mechanizmus tanulmányozása, illetve feltérképezése elengedhetetlen része a technológia hatékony és célszerű alkalmazásának. Az elvégzett kísérleti munka eredményei támpontot adnak a gyakorlati alkalmazás optimális körülményeinek kialakításához, sőt nélkülözhetetlen részét képezik e technológia gyártási folyamatokba történő megfelelő integrálásának.

7. A kutatómunka további iránya

A kutatás folytatásaként további elméleti és kísérleti célkitűzéseket fogalmaztam meg a technológia mélyebb megismerés céljából. Ehhez az alábbi feladatok megvalósítását tervezem:

- A bevonatokban fellelhető fázisok keménységének, továbbá a bevonatok keménység eloszlásának meghatározása;
- A létrejött felületi topográfiák, felületi struktúrák kialakulásának elemzése elméleti úton és anyagszerkezeti vizsgálatok révén;
- Az atmoszférikus plazmaszórással készült bevonatok megmunkálhatóságának javítására irányuló optimalizálási lehetőségek részletes áttekintése és vizsgálata;
- A bevonatok további megmunkálásának, gyártástechnológiai fejlesztési lehetőségeinek elemzése.

Köszönetnyilvánítás

- *A kutatómunka irányításáért, a szakmai tanácsokért, támogatásért és a vizsgálatok elvégzésében és kiértékelésében nyújtott segítségért:
Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Máriának (Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem)*

- *A röntgendiffrakciós és elektronmikroszkópos vizsgálatokért, valamint a kiemelkedő szakmai segítségért*
Prof. Dr. Mertinger Valériának és munkatársainak (Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Műszaki Anyagtudományi Kar, Miskolci Egyetem)
- *A kémiai összetétel vizsgálatokért és hasznos javaslatokért, szakmai tanácsokért*
Dr. Kulcsár Tibornak (Öntészeti Intézet, Műszaki Anyagtudományi Kar, Miskolci Egyetem)

Felhasznált irodalom

- [1] Bakan, E., Mack, D. E., Mauer, G., Vaßen, R., Lamon, J., Padture, N. P. (2020). High-temperature materials for power generation in gas turbines. *Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage*, 3–62. doi:10.1016/b978-0-08-102726-4.00001-6
- [2] OERLIKON Metco gyártói honlap: Termékek és szolgáltatások;
<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/atmospheric-plasma> (letöltés: 2021.03.28.)
- [3] BRO-0005.6_ An Introduction to Thermal Spray, Oerlikon Metco, Issue 6, July 2016, pp1-24.
(<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/atmospheric-plasma/#>) (letöltés: 2021.03.28.)
- [4] Heimann, R. B. (2008): *Plasma Spray Coating: Principles and Applications*, (2008), 2nd edition John Wiley & Sons, ISBN 978-3-527-35050-9, p600, p432.
- [5] 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
- [6] Curry, N., Markocsan, N., Li, XH. et al. Next Generation Thermal Barrier Coatings for the Gas Turbine Industry. *J Therm Spray Tech* 20, 108–115 (2011).
<https://doi.org/10.1007/s11666-010-9593-x>
- [7] Grilli, M.L.; Valerini, D.; Slobozeanu, A.E.; Postolnyi, B.O.; Balos, S.; Rizzo, A.; Piticescu, R.R. Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Last Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. *Materials* 2021, 14, 1656. <https://doi.org/10.3390/ma14071656>
- [8] *Biomedical Composites*, Ambrosio, L. (Ed.) 2nd edition, Woodhead Publishing, (2017), ISBN 978-0-08-100752-5, p600, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02024-X>
- [9] Marosné Berkes, M., Lukács, J.: APS bevonat komplex vizsgálata, Kutatási zárójelentés, Miskolc, 2020, pp1-132.
- [10] Barbezat, G. (2006). Thermal spray coatings for tribological applications in the automotive industry. *Advanced Engineering Materials*, 8(7), 678-681.
- [11] Sultzer Metco Thermal Spray Material Guide, April, 2014
- [12] 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

-
- [13] 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
- [14] Balogh A., Schäffer J., Tisza M. (2003). *Mechanikai technológiák, Jegyzet*, Miskolci Egyetem, ISBN 963 661 571 3, pp1-358
- [15] DIN EN 1706:2013-12
- [16] Tomažinčič, D., Borovinšek, M., Ren, Z., & Klemenc, J. (2020). Improved prediction of low-cycle fatigue life for high-pressure die-cast aluminium alloy AlSi9Cu3 with significant porosity. *International Journal of Fatigue*, 106061. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.106061
- [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
- [18] Miskolci Egyetem Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Komplex Képelemző és Szerkezetvizsgáló Laboratórium (LISA), APS bevonat röntgendiffrakciós fázisazonosítása, 2021
- [19] Nikolai I. Kobasko, Michael A. Aronov, Joseph A. Powell, J.H.Vanas, Intensive Quenching of Steel Parts: Equipment and Method August 2009, DOI: 10.13140/RG.2.2.17040.56328