

Szent István Egyetem

**HIDEG FÉMPORSZÓRÁSSAL LÉTREHOZOTT FELÜLETI RÉTEG
TULAJDONSÁGAI ÉS TECHNOLÓGIÁJUK KAPCSOLATA**

Doktori (Ph.D) értekezés

Fazekas Lajos

Gödöllő
2011

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudomány

vezetője: Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

Témavezető: Dr. habil. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet

Társ-témavezető: Dr. Pálincás István
főiskolai tanár, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	5
1.1. A téma aktualitása	5
1.2. A kutatás célja	6
1.3. Kitzűzött kutatási feladatok	6
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
2.1. A termikus szórás módszereinek fejlődése	9
2.1.1. A termikus szórás eljárások osztályozása	9
2.1.2. Olvadékszórás	12
2.1.3. Termikus szórás lánggal.....	14
2.1.4. Hideg fémporaszórás technológiájának összefoglalása	21
2.2. Technológiai jellemzők szakirodalmi áttekintése	25
2.2.1. Alkalmazott lángtípusok jellemzése.....	25
2.2.2. A láng és a szórt részecskék közötti hőátadás.....	31
2.2.3. A részecske hőmérséklet mérésének módszerei.....	33
2.2.4. A bevonat felépítése	34
2.2.5. A részecske deformáció és hőmérséklet.....	34
2.2.6. Gócképződés (nukleáció), szilárdulás és kristálynövekedés	35
2.2.7. Az adhézió mechanizmusa	36
2.2.8. A bevonat növekedése.....	37
2.2.9. Hőfeszültségek kialakulása	38
2.2.10. A bevonatok mikroszövetszerkezete	39
2.3. Szakirodalmi következtetések	40
2.4. Kutatási célkitűzéseim a szakirodalom tükrében	41
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	43
3.1. A szórás módszer és indokltsága.....	43
3.2. A szórandó porok	47
3.3. A felszórt rétegek értékelése	50
3.4. Kísérletterv	51
3.5. A fémporötvözetek sűrűsége és szemcseszerkezete.....	53
3.6. A fémporötvözetek kémiai összetétele.....	53
3.7. A felszórt réteg tömörség (porozitás) és repedés vizsgálata	55
3.8. Szövetszerkezeti vizsgálat.....	56
3.9. A keménység változása a felszórt réteg metszetében és az átmeneti zónában	56
3.10. Kötésszilárdsági vizsgálatok	57
3.10.1. Normál irányú kötésszilárdság meghatározása	58
3.10.2. Nyíró kötésszilárdság meghatározása	62
3.11. A kenőanyag felvevő- és leadó képesség.....	65
3.12. Felületi szabadenergia és kémiai összetétel (XPS mérések).....	66
4. EREDMÉNYEK	69
4.1. A fémporötvözetek sűrűsége és szemcseszerkezete.....	69
4.2. A fémporötvözetek kémiai összetétele.....	69

4.3. A felszört réteg tömörség (porozitás) és repedés vizsgálata	71
4.4. Szövetszerkezeti vizsgálat.....	74
4.5. A keménység változása a felszört réteg metszetében és az átmeneti zónában	76
4.6. Kötésszilárdsági vizsgálatok	79
4.6.1. Normál irányú kötésszilárdság	79
4.6.2. Nyíró kötésszilárdság	82
4.7. A kenőanyag felvevő- és leadó képesség.....	84
4.7.1. A kenőolaj felvétel- és leadás valamint a porozitás kapcsolata	87
4.7.2. A felszört rétegek adhéziós képessége, felületi szabadenergia	88
4.7.3. Felületi energia komponensek és réteg-összetétel kapcsolata.....	89
4.8. Új tudományos eredmények.....	91
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK.....	95
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	97
SUMMARY.....	99
MELLÉKLETEK.....	101
M1. Irodalomjegyzék	102
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk	113
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	115

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma aktualitása

A gépiparban felhasznált alkatrészek több szempont alapján csoportosíthatók. A szereléstechológiákhoz, gyártó- és javítóiparhoz kapcsolódó szakirodalmak (JANIK 2001, HARTMANN 1986) egyik osztályozása az alkatrészek jellegzetes alakjához kötődik. Ennek megfelelően definiálják a tengely-jellegű vagy körszimmetrikus alkatrészeket.

Ezek az alkatrészek meghatározó jelentőséggel bírnak, mivel a gépi berendezések mozgó – erő és nyomatékátvivő, valamint támasztó és súrlódó - elemeinek meghatározó többségét alkotják. A tengely-jellegű, vagy akár körszimmetrikus alkatrészek technológiai szempontból is kiemelt figyelmet érdemelnek, mivel gyártásuk, szerelésük, mozgatásuk sokkal rugalmasabban megoldható és szervezhető, mint bármely más 3D-s felületekkel leírható összetett alkatrész.

Részben ennek köszönhető, hogy a tengely-jellegű alkatrészek felületi felújítása is önálló technológiává érett az elmúlt száz év során (EMBER 1983, JANIK 2001). A súrlódó és egyéb összetett mechanikai illetve korróziós igénybevételnek kitett tengelyek általában kopást és deformációt és felületi korróziót szenvednek normál használat esetén is, ami a természetes elhasználódást jelenti megfelelően jónak ítélt konstrukciók esetében. Az elhasználódott tengelyek pótlásának több módja ismeretes a karbantartási stratégiákból (JANIK 2001, HARTMANN 1986), melyek egyértelműen meghatározzák a felújíthatóság létjogosultságát a cserealkatrész beszerzés mellett (HARTMANN 1986, ESAB é.n.).

Az alkatrészfelújításra is szakosodott nagy gyártócégek – szerszámok, készülékek, segédanyagok, technológiai kiegészítők, hegesztőanyagok gyártói és forgalmazói – folyamatosan fejlesztik a tengelyek felújításának technológiáit, módszereit, anyagait. A mechanikus eljárások mellett – pl. perselyezés, rugalmas gyűrűk,..stb. – látványos fejlődésen mennek keresztül a termikus szórások területei. Közel száz éves múltra tekint vissza a kopott tengelyfelületek anyagvisszapótlása különböző termikus szórási eljárásokkal, de az utóbbi két évtized a szakterületi specializálódás jellegét öltötte magára. A kopási problémák orvoslása mellett (HABIB 2006) a korrózióvédelmi szempontokból is (RODRIGUEZ 2007) előnyös a termikus szórási eljárás, így a felhasználási terület folyamatosan szélesedik.

A mezőgazdasági gépekben, föld- és egyéb munkagépekben meghatározó károsodási folyamat az abrúziós kopás. Az abrúziós kopásnak kitett acélfelületek, tengelyek felújítására már korábban kifejlesztették a karbidos keményfém felrakási módszert akár hegesztéssel, akár szórással, de a kopási élettartammal kapcsolatos igények tovább nőnek (JANIK 2001, HARTMANN 1986). Ennek eredményeként ma a termikus szórási eljárások megvalósításához ajánlott kereskedelmi anyagválaszték minden korábbi lehetőséget meghalad.

A megfelelő technológia kiválasztásához azonban elengedhetetlenül szükséges az egyes hozaganyagokkal megvalósítható termikusan szórt bevonatok komplex elemzése is, nem elegendő a forgalmazók által a felvitt rétegre megadott

alapinformáció (keménység, összetétel...). Tisztázni kell az egyes rétegek kötésszilárdságát, szívósságát, porozitását is, mely a későbbi felhasználás sikerességét szorosan befolyásolja. Szintén kutatást igényel a technológiai paramétereknek – pl. hőmérséklet, gázsebesség, szórási távolság – a befolyásoló szerepe a réteg végleges jellemzőire.

1.2. A kutatás célja

A szakirodalom feldolgozásából a továbbiakban kitűnik, hogy a technológiai fejlődés, a fontosabb bevonati jellemzők ismerete mellett még néhány fontos tulajdonság nem tisztázott, mely a későbbi felhasználhatóságot nagyban befolyásolja. Ilyen például a bevonati rétegszerkezettől (tömörség, porozitás), a felületi energiaviszonyoktól függő mechanikai tulajdonságok, valamint a kenőanyag-felvevő és leadó képesség, mely a hideg fémforszórású siklócsapágy helyek meghatározó jellemzője. A szakirodalomból feltárt hiányosságok, illetve a több évtizedes szakterületi tapasztalatom alapján, az alábbiakat tűztem ki célul.

A kereskedelmi forgalomban hideg fémforszórásra ajánlott porok közül behatározni három, alapvetően eltérő porcsoportot képviselő porötvözetet, mely a hidegen szórt alkatrészek legszélsőségesebb alkalmazási körülményeire ajánlottak és siklófelületként is funkcionálnak. Ennek értelmében, ahol:

- a fémes súrlódó kapcsolatokban a száraz kényszersiklás nem okoz azonnali berágódást, mindemellett a réteg elvárt átlagos szilárdsága és szívóssága is meghaladja a kereskedelmi átlag értékeket,
- keményebb a fémfelület, mely abrázios kopásállóság szempontjából előnyös, továbbá a vizes, vegyi- és szennyezett közegben is alkalmazható, mint ahogy a mezőgazdasági gépek jelentős hányadánál ez igényként merül fel,
- általános gépipari célokat kielégítő és jól kenhető felületeket biztosító bevonatot eredményez.

A három kiválasztott porötvözet további részletes elemzése képezi a kutatás tárgyát.

1.3. Kitűzött kutatási feladatok

Feladatként határoztam meg:

I. Poronként szórási- felhordási kísérletek elvégzését, melynek során kutatom a rétegek tömörségét (porozitását), keménységét, kötésszilárdságát, a felületi energia viszonyait, a kenőanyag felvevő- és leadó képességet úgy, hogy több szórási távolságot is alkalmazok, mely kézi technológia esetén az egyik legszubjektívebb technológiai paraméter. Ennek jelentőségét mások is felismerték már (PATTISON

2008), de a publikált szakirodalmi eredmény rendkívül kevés. A kísérleteim fő változója ezért:

- általánosan javasolt, gyártói szórási távolság (180 mm),
- szélső értékben 40%-kal növelt szórási távolság,
- szélső értékben 40%-kal csökkentett szórási távolság és
- további szórási távolságok alkalmazása a szélsőértékek között

II. A kapott mérési eredmények feldolgozása, a felszórási távolság és a rétegek tulajdonságai közötti trendek és összefüggések megállapítása.

III. Az egyes porösszetételek közötti hasonlóságok és technológiai jellemzők közötti kapcsolatok feltárása.

IV. Az egyes porokhoz kapcsolódó technológiai ismeretek pontosítása, a karbantartási adatbázisokban való megjelenítése.

A kutatás eredményei leegyszerűsítve a technológiai tervezés adatbázisát szélesítik, ami a sikeresebb porösszetétel választást, hosszabb élettartamú és megbízhatóbb tengelyfelújítást eredményez. Mindezen túl, a kísérleti sorozatok értékelése olyan trendeke is rávilágít, amely a porösszetételek fejlesztését is szolgálja, a termikusan felszórt tengelyek komplex technológiai kivitelezését támogatja a karbantartás tervezésétől a selejtezésig, és jelenleg nem, vagy korlátozott mértékben elérhető információt képviselnek a szakterületen.



2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A termikus szórás módszereinek fejlődése

A termikus szórással kialakított felületek technológiája az elmúlt évtizedekben látványos fejlődésen ment keresztül, és a fejlesztés napjainkban sem állt meg. A módszer olyan kiemelt műszaki alkalmazásokban is használatos, mint a sugárhajtómű alkatrészek felújítása, javítása. A módszerek részletes bemutatására a dolgozatban nem törekszem, korszerű, átfogó nemzetközi szakirodalommal rendelkezik STERN (1996), GRAINGER (1998), BACH (2004), DAVIS (2004), MAEV (2008). MOLNÁR (2002) részletes munkája már korábban foglalkozott az egyes fejlesztési elvekkel. E fejezetben a fontosabb technológiai állomásokat és azok sajátosságait foglalom össze.

A bevonatkészítés az ipari gyakorlatban fontos feladat. Az első ismert, bevonatkészítésre vonatkozó szabadalmi engedélyt kapott módszer THURSTON (1900) nevéhez kötődik. Ez a bevonatolási módszer még nem termikus szórás, de a felületi rétegekialakítás egyik kezdeti lehetőségének tekinthető. SCHOOP (1935) felfedezése óta – az elmúlt közel 100 év folyamán – a termikus szórás technikai módszerei sokat fejlődtek.

Az eljárások ismertetésénél, elsősorban az ipari gyakorlatban való alkalmazhatóság került előtérbe, nem elhanyagolva a fejlesztési irányzatokat és a tudományos lehetőségeket sem.

Az egyes módszerek leírásánál a történelmi fejlődés, az alapelv rövid magyarázata, a főbb jellemzők és a réteg meghatározó tulajdonságainak közlése az elsődleges szempont, nem elhanyagolva a kifejlesztők személyét.

Mindezek azt szolgálják, hogy egy adott feladat megoldásához legmegfelelőbb módszer minél egyszerűbben legyen kiválasztható. A bevonatok várható tulajdonságainak ismerete az alkalmazandó szórási eljárás gyakorlati kiválasztásához rendkívül fontos.

A termikus szórás minden egyes módszerénél valamilyen energiasugár (pl. láng, villamos ív + sűrített levegő, plazma, robbanási hullám, lézersugár) a hő- és a kinetikai energiaforrás, mely a részecskéket felhevíti és az alapfémre (az alkatrész felületére) röptíti. A részecskék alapfémrel való ütközésekor folyamatos réteg alakul ki, melynek tulajdonságai jelentős mértékben függenek az alkalmazott energiasugártól.

Az ismertetésre kerülő módszerek és a gyakorlati alkalmazáshoz szükséges berendezések a gyártó és fejlesztő vállalatoktól általában beszerezhetők.

2.1.1. A termikus szórási eljárások osztályozása

A termikus szórás módszereinek osztályozására és besorolására számos megközelítés ismert, melyek a fejlesztések folyamán bővülnek, de alapjaiban kevésbé változnak. A csoportosítás, osztályzás az egyes eljárások fejlődésével általában változik, így a következő ábrán olyan eljárásokat is feltüntettem, amelyek a

legutolsó fejlesztésekhez kötődnek (pl. a folyadékszórás vagy a mikrohullámú szórás). A kifejlesztett vagy valamilyen szinten ismert módszerek összefoglalása ismert (FRANK 2001), szabványosított (pl. DIN EN 657 szerint). Egy részletesebb, de nem teljes csoportosítás a 2.3. ábrán látható.

- a hozaganyagok (összetétele) szerint (pl. fém-, fémötvözet-, kerámia-, oldat-, cermet-, műanyagyszórás stb.),
- a hozaganyag formai kialakítása szerint (pl. huzal-, pálca-, zsinór-, por-, folyadék-, stb.),
- a hevítő forrás szerint (pl. láng, villamos ellenállás, villamos ív, plazma, lézersugár, stb.),
- a szórási közeg szerint (pl. atmoszférikus, víz alatti, védőatmoszféra, vákuum),
- a gyorsító közeg szerint (pl. levegő, egyéb gáz, nincs külön gyorsító közeg),
- a felszóró anyag adagolási helye szerint (pl. lángmag, ez inkább a plazmánál lényeges) így lehet belső, vagy külső adagolású (externál, vagy internál),
- egyedi besorolások alapján (pl. hideg eljárás, meleg eljárás)

Az egyes eljárások osztályozásánál és ismertetésük előtt lényeges, hogy bemutatásra kerüljön a termikus szórás, mint bevonatkialakítási technológia helye az ipari technológiák között. Ennek egyik legjobbnak tartott ábrája ORGOVÁN (1979) Lászlótól származik. BHUSHAN (1991), továbbá BACH (2006) és társai szintén csoportosították a meglévő módszereket, mely a jelen gyakorlatban meglévő és alkalmazott eljárásoknak megfelelően továbbfejlesztésre került (2.1. ábra).

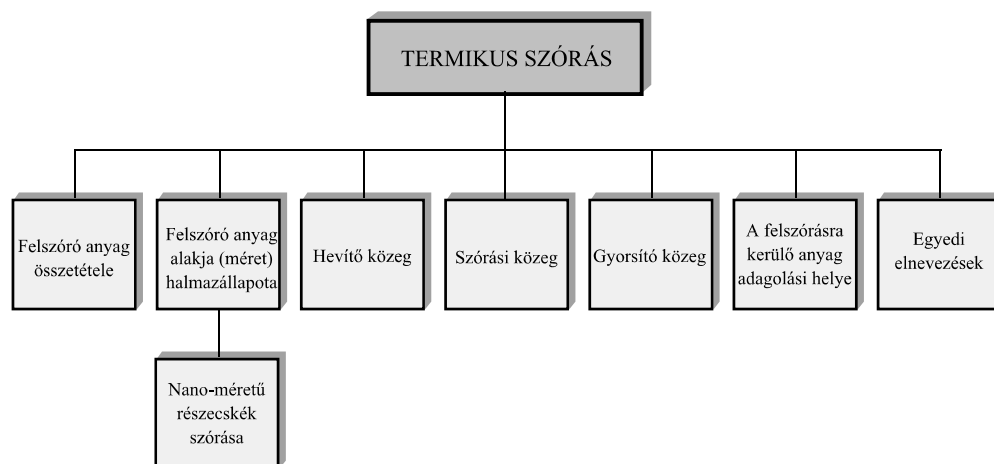
A 2.1. ábra tartalmazza mindazokat az eljárásokat, amelyekkel bevonatok és rétegek készíthetők egy adott munkadarab felületén. TAKÁCS (2004) szerint ezek közül az egyik sokat alkalmazott módszer a termikus szórás.

A termikus szórás termomechanikus eljárás, amely azt jelenti, hogy a felszóró anyag teljes vagy a legtöbb esetben részleges megolvastása hőmenyiség közlésével történik, továbbá a gyorsító-szállító energiasugár előállítása valamilyen hőforráshoz (pl. láng, plazma, lézer vagy ezek kombinációja) kötődik (2.2. ábra).

A termikus szórás besorolásánál – miként az eljárások összességének osztályozásánál – figyelembe kell venni a következő szempontot: mi a felszóró anyag összetétele, pl. fém, fémötvözet, kerámia, cermet, oldat.

Így elterjedt a „fémszórás”, „kerámiaszórás” kifejezés, de nincs fémötvözet, vagy oldatszórás. A felszóró anyag alakja (morfológiája) szerint lehet pálca-, huzal-, zsinór-, por-, folyadékszórás. Külön területet foglal el a nanoméretű anyagok szórása. A hevítő közeg szerint lehet láng-, villamos ív-, plazma-, lézer-, robbantásos szórás. A szórási közeg szerint lehet atmoszférikus, víz alatti, védőgázban, vagy vákuumban végzett szórás. A gyorsító közeg szerint – ezt kevésbé használják – lehet sűrített levegős, semleges- vagy nemesgázzal végzett gyorsítás.

A részletek pontos meghatározása végett egyes kutatók, intézetek, pl. a szórási távolság vagy a rétegvastagság meghatározásával is jelzik az egyes eljárások



2.2. ábra. A termikus szórás osztályozási, besorolási vagy elnevezési szempontjai (MOLNÁR 2003)

Az eljárások osztályozása több szempont szerint lehetséges, pl. az energiasugár jellege szerint (ROINTAN 2000). A felszórás az egyik legkényelmesebb bevonatkialakítási eljárás különböző formájú munkadarabok felületeire, függetlenül az alkalmazott kiinduló anyag fajtájától (rúd, por, huzal), és a hevítés forrásától (égő gáz lángja, villamos ív, nagyfrekvenciás áram, gázzal stabilizált villamosív-plazma). A felszórásnál megfigyelhető, hogy a felszóró réteg fő tulajdonságai a részben megolvasztott (szinterezett) por alakú test tulajdonságaihoz hasonlóak. Azonban a részecskénél az összesajtoló por alakú testek szinterezéséhez hasonló, teljes mértékű folyamat nem megy végbe. A felszóró réteg mint por alakú test - nincs teljesen összesajtolódva, valamint oxidokkal feldúsult és így a réteg szinterezési folyamatának befejezéséhez hosszabb időre van szükség. Másrészt a porlasztókúpban levő összes felhevített részecskét a teljes szinterezéshez szükséges hőmérséklet jellemzi. Ennek következtében a felszórási művelet során előzetes szinterezés megy végbe.

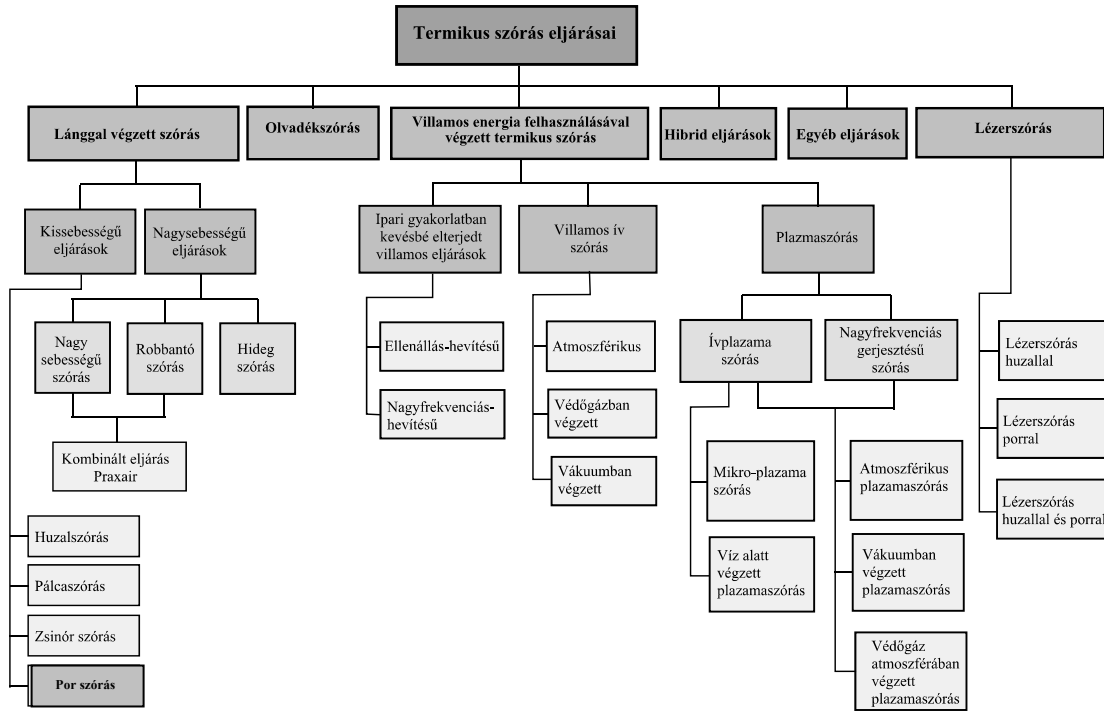
A 2.3. ábra segít beazonosítani a kutatásom fő területét képező hideg fém-porszórás eljárási helyét a termikus szórások között.

A továbbiakban az olvadási- és lánggal szórásról tekintem át, a többi eljárás nem kapcsolódik közvetlenül a kutatási tevékenységemhez, illetve a kutatási célkitűzésekben megfogalmazottakhoz.

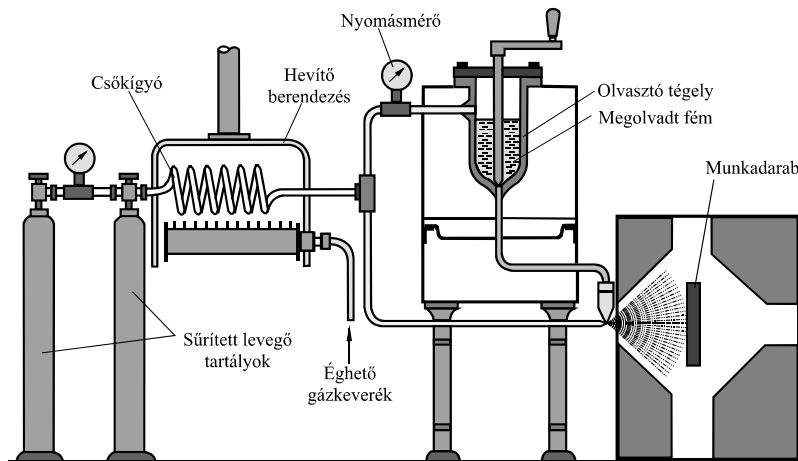
2.1.2. Olvadékszórás

A tartályban megolvasztott fémot előmelegített és megnövelt nyomású gázáram (általában sűrített levegő) porlasztja el. A felgyorsított olvadási részecskék a sugár útjába helyezett és előkészített alkatrész felületének ütközve deformálódnak és fém réteget képeznek. Ez a módszer alacsony olvadáspontú fémek (Sn, Bi és Pb) felszórásához alkalmazható. Az eljárás viszonylag egyszerű, de meglehetősen összetett szerkezeti egységeket (előmelegítő, olvasztó tartály, kompresszor, stb.) igényel. A gyakorlati alkalmazása során keletkezett fémgőz és por elvezetése

további megoldandó feladat. A felszóró fej vagy a munkadarab mozgásának gépesítése elengedhetetlen. Előnye az olcsó felszóró anyag. Az olvadékszórás elve és egységei a 2.4. ábrán láthatók. Ezt az eljárást SCHOOP (1909) szabadalmaztatta.



2.3. ábra. Termikus szórási eljárások

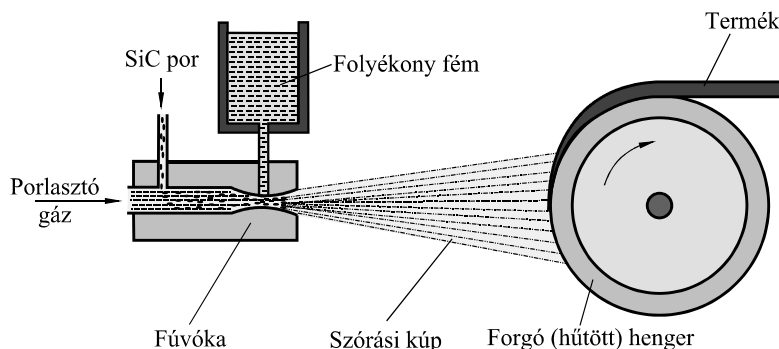


2.4. ábra. Olvadékszórás

Az eljárás önálló fémszóró eljárás, nem sorolható be a lánggal végzett módszerek közé. A berendezéshez tartozó két palack sűrített levegőt vagy

széndioxidot tartalmaz. A gáz nyomását két helyen mérik. A két palackból a gáz átáramlik egy fűtőspirálon, amelyet egy égősor melegít folyamatosan. A felhevített gázt egy olvasztótégelybe, illetve a porlasztó fűvókához vezetik. A fűvókából kiáramló forró gáz a tégelyből nyomás alatt kifolyó olvadékot elporlasztja és a fülkében lévő tárgyra röpti, ahol réteget képez.

A folyékony fémolvasztó tartályos szórórendszer meglehetősen bonyolult, nagy terjedelmű és helyhez kötött. Ezeket a hátrányokat szüntették meg a szórópisztolyok kifejlesztésével. Napjainkban ez a technológia újraéledt, mivel különféle kompozit szalagok kialakítására lehet alkalmazni MCHUGH (é.n.) szerint.



2.5. ábra. Kompozit szalag előállítása olvadékszórással (Spray forming)

Az eljárás lényege, hogy előmelegített gázsugárral – melybe szilíciumkarbidot adagoltak – az indukciós kemencében felhevített és a lecsurgó olvadt fém (alumínium) porlasztják és egy forgó henger felületére röptik.

Az olvadék megszilárdul, összefüggő réteget képez, azt folyamatosan leválasztják és tovább alakítják (pl. hengerlik), a szükséges felhasználási célnak megfelelően. Az eljárást teljesen automatizálták, elve az 2.5. ábrán látható.

2.1.3. Termikus szórás lánggal

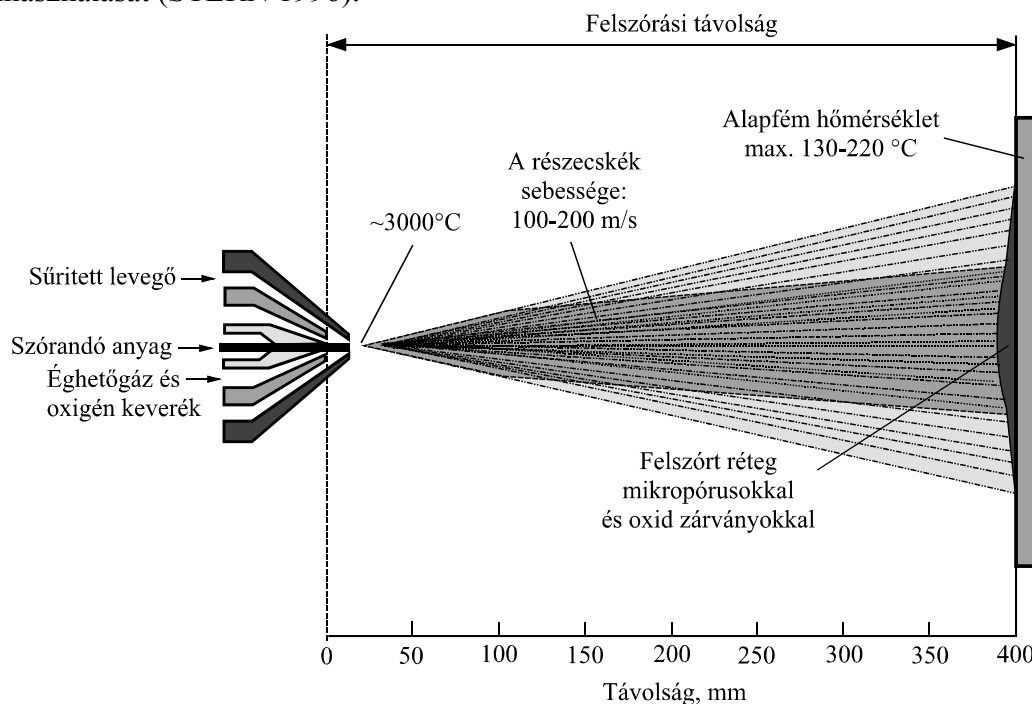
A lánggal végzett szórás olyan bevonatfelviteli módszer, amelyben a kiinduló anyag folyékony vagy képlékeny állapotig való hevítése, porlasztása, bizonyos sebességre való felgyorsítása és a munkadarabra – alapfémre - lánggal történő szállításán (felszórásán) alapul. A lángszóró eljárások közé sorolják általában a huzal, pálca és porfelszórást, a nagysebességű és robbantásos szórást, de a legújabb fejlesztésű folyadékszórás is ide sorolható.

A lánggal végzett felszórási eljárás alkalmazása során a felszóró készülékbe (pisztoly, égő, stb.) bevezetett anyag (huzal, pálca, por) megolvad vagy képlékennyé válik és a lángon áthaladva a munkadarab felületének ütközve összefüggő réteg alakul ki.

A szóróanyag (pálca, huzal, por, stb.) leválasztását vagy a részecskékre bontását és azok kinetikai energiájának megnövelését valamilyen gyorsító gázzal – általában sűrített levegővel – segítik elő (2.6. ábra). KRETCHMAR (1962) szerint

a hőenergia forrása a gázláng, amely oxigén–éghető gáz (acetilén, földgáz, propán-bután, hidrogén, stb.) elegyének égésekor keletkezik.

A szóródó anyagot a láng emelt hőmérsékletű zónájába (magjába) por, rúd vagy huzal alakban adagolják. A lángfelszórás területén sikeresen alkalmazzák a polimer bevonatú, porral feltöltött hajlékony zsinórok, por töltőanyagos fémhuzalok valamint max. 10 µm frakciójú, finom diszperziós porok intenzív felhasználását (STERN 1996).



2.6. ábra. Termikus szórás lánggal

A gázlánggal működő készülékekre jellemző a 700 m/sec-nál kisebb gázáramlási sebesség, a max. 40–100 m/sec porrészecske sebesség, az 1–10 kg/óra szórási teljesítmény. A max. 50 MPa tapadó-szilárdság, továbbá a felszóró anyag részecskék hőmérséklete az olvadásponthoz közeli érték. A lánggal végzett termikus szórási eljárások előnyei és hátrányai (MOLNÁR 2003) a következők:

Előnyök:

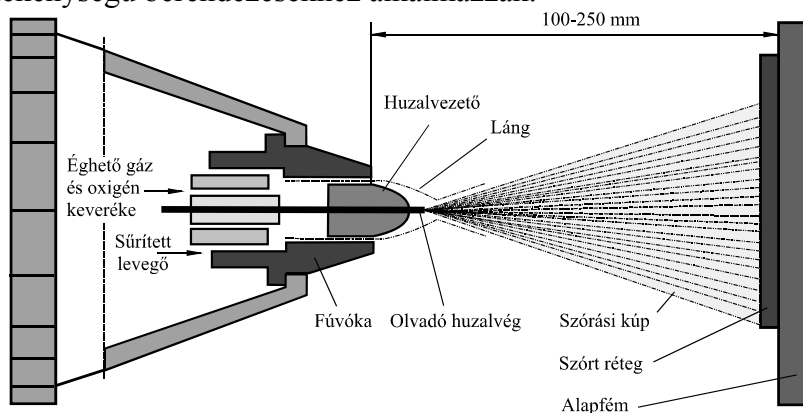
- A technológia nagyobb helyigény nélkül alkalmazható (szórókészülék, acetilén, oxigén, sűrített levegő általában minden műhelyben viszonylag könnyen biztosítható).
- A technológia alkalmazása nem igényel különleges kézügyességet, de természetesen az előírások (az előkészített felülettel szembeni követelmények, a megfelelő gázáramlás, a nyomás értékek beállítása) betartása elengedhetetlen.
- Viszonylag sokféle feladat megoldható a módszer egyszerűsége ellenére, a rendelkezésre álló szóróanyagok széles választékával.

Hátrányok:

- A technológia alkalmazása jelentős hőbevitellel jár, ugyanakkor az a felszórásra kerülő munkadarab nagy felületén oszlik el.
- A túlzott hőbevitel következtében feszültségek ébrednek a felszört munkadarabban.
- A technológia különösen érzékeny a felület tisztaságára és a felületi érdességre.
- Bizonyos mértékű szóróanyag veszteséggel kell számolni.
- Különösen oda kell figyelni bizonyos anyagok (pl. bronz, alumínium, stb.) szórására, tekintettel a fémgőzök képződésére, melyek elszívásáról gondoskodni kell.

Huzalszórás lánggal

A felszórandó huzal vége a láng emelt hőmérsékletű zónájában (magjában) megolvad, és arról részecskék válnak le az odavezetett porlasztógáz hatására (MOLNÁR 1979). A részecskék felgyorsulnak a lángban és a munkadarab előkészített felületének ütközve réteg alakul ki (2.7. ábra). A képződött réteg anyagösszetétele hasonló lesz, mint a kiinduló huzalé, de szerkezete porózus. Bizonyos mértékű oxidációról azonban nem szabad megfeledkezni. A képződött fémoxidok egy része beépül a bevonatba, amely rontja annak fizikai jellemzőit. A huzal előtolása előre megadott sebességgel, görgők segítségével történik, melyeket a készülékbe beépített levegőturbina, vagy villamos motor forgat meg. A villamos motorral való hajtás előnye az előtolási sebesség pontosabb beállítása. A villamosmotoros hajtás hátránya a nagyobb tömeg, ezért általában nagytermelékenységű berendezésekhez alkalmazzák.

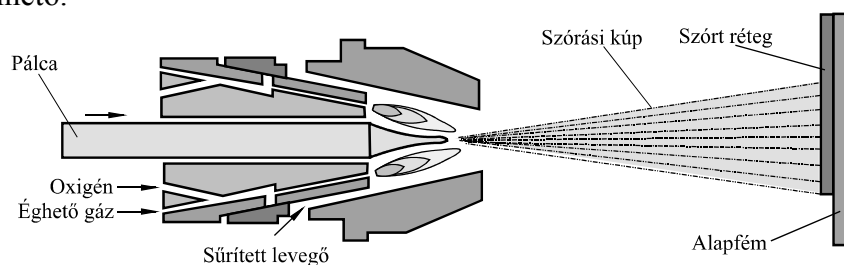


2.7. ábra. Huzal szórása lánggal

A levegőturbinás hajtásnál pontatlanabb az előtolási sebesség beállítás, de a szórófej kisebb tömegű, ezért a kézi működtetésű pisztolyoknál ez a megoldás terjedt el. A huzalszóráshoz általában max. 3 mm átmérőjű huzalokat alkalmaznak, de alacsonyabb olvadáspontú fémeknél (Al, Zn,) a szórási teljesítmény növelése érdekében 5–7 mm átmérőjű huzalokat is használnak.

Pálca szórása

Az 1/8”–3/16”–1/4” vastagágú, 12–24” hosszúságú kerámia pálcát a láng magjába vezetve a pálca vége megolvad és a sűrített levegő sugár hatására részecskék válnak le, és a lángban haladva felgyorsulnak, így a hőmérsékletük tovább nő, az előkészített munkarab felületének ütközve egybefüggő kerámia réteg alakul ki (GRAINGER 1992) (2.8. ábra). A pálcák előtolását és szórását hagyományos huzalszóró készülékkel végzik. Az eljárás kifejlesztése WHEILDON (1955) nevéhez kötődik, aki a Norton Company cég mérnöke volt és az eljárásra szabadalmat kapott. A technológia alkalmazásának előnye a könnyű kivitelezhetőség, az egyenletes szemcseszerkezetű réteg, jelentős hátránya viszont a felhasznált pálcák törékenysége. Az előtolt pálca üzem közbeni eltörése miatt a szórási folyamat megszakad, ezáltal a képződött réteg tulajdonságai változhatnak vagy réteghibák keletkezhetnek. Friss, nedvességtől mentes pálcák használatával ez elkerülhető.



2.8. ábra. Pálca szórása lánggal

A ROKID pálcákat ötféle minőségben a NORTON Co. készítette. Főleg az 1960-as években volt újdonság ez a módszer. A MOGUL Co. külön tartozékokat (pl. automatikus adagoló, belső felületek felszórásához alkalmazható fej) alkalmazott, melyek a huzalszóró pisztolyokra voltak felszerelhetők. Jelenleg a SAINT-GOBAIN cég olyan gyakorlati szintre fejlesztette ezt az eljárást, hogy azt elterjedten és sokoldalúan alkalmazzák. Ugyanakkor nem elhanyagolható, hogy a pálca választékot is megnövelték.

Zsinórok szórása

A zsinór felszóró anyagot CLEMENT (1970) fejlesztette ki az 1960-as évek második felében a SFEC intézetben. Amerikai szabadalmat 1970-ben kapott ez az anyag. A zsinórt sajtoló módszerrel (extrudálással) gyártják úgy, hogy a zsinór külső köpenye egy hajlékony műanyag, míg a belseje egy olyan paszta, amelyben már benne van a szükséges bevonatanyag. A zsinórok szórása terén a SAINT-GOBAIN cég ért el eredményeket, különös tekintettel a felszóró készülék kifejlesztésére.

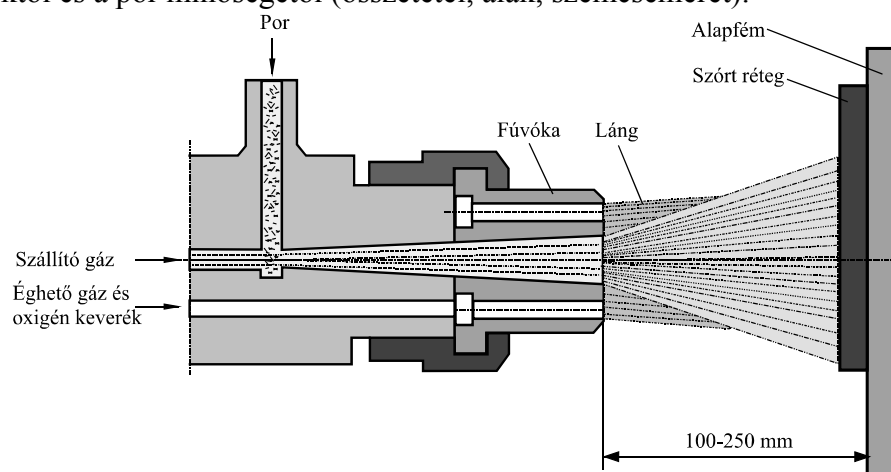
A pálcaszóráshoz alkalmazott készülék alkalmazható zsinór felszórásához is, ha az hasonló vastagsági méretben készül, mint a pálca, hosszúsága kb. 30 m és dobra

tekerceslik fel. Gyakorlati szempontból jelentős előny, hogy a huzalokhoz hasonlóan folyamatos szórást tesz lehetővé.

Porok szórása

A leggyakrabban alkalmazott és egyben a legkényelmesebb eljárás. A lángmagba jutó por részben vagy teljesen megolvad, felgyorsul, a munkadarab előkészített felületének ütközve deformálódik és összefüggő réteg alakul ki. A réteg és az alapfém közötti kapcsolat adhéziós kötés (ENGLAND é.n.). A felületi előkészítés és az éghető gázkeverék megfelelő beállításának (éghető gáz és oxigén) további szerepe van a réteg kialakulásában.

A por általában gravitációs úton vagy szállítógázzal jut a lángmagba. A megolvadt vagy képlékennyé vált részecskék felgyorsítása valamilyen segédgázzal (pl. sűrített levegővel) vagy anélkül végezhető – ez nagymértékben függ az alkalmazott készüléktől és a por minőségétől (összetétel, alak, szemcseméret).



2.9. ábra. Por szórása lánggal

A porszórás általános, elvi módszere a 2.9. ábrán látható. A készülékre felszerelhető portartályból a por gravitációs úton, egy szabályozó nyíláson keresztül a szállítógázba jut, majd a lángmagba, ahol elkezdődik a képlékennyé válása vagy megolvadása, a lángban felgyorsul, majd a felületnek ütközve deformálódik és megtapad. A segédgáz (pl. sűrített levegő) áramoltatása az alapanyag és a réteg, továbbá az ütköztetett részecskék közötti kötés minőségének javítását szolgálja. A porok lánggal végzett felszórásához éghető gázként a legtöbb esetben acetilént alkalmaznak.

Hagyományos fém-, fémötvözetporok szórása

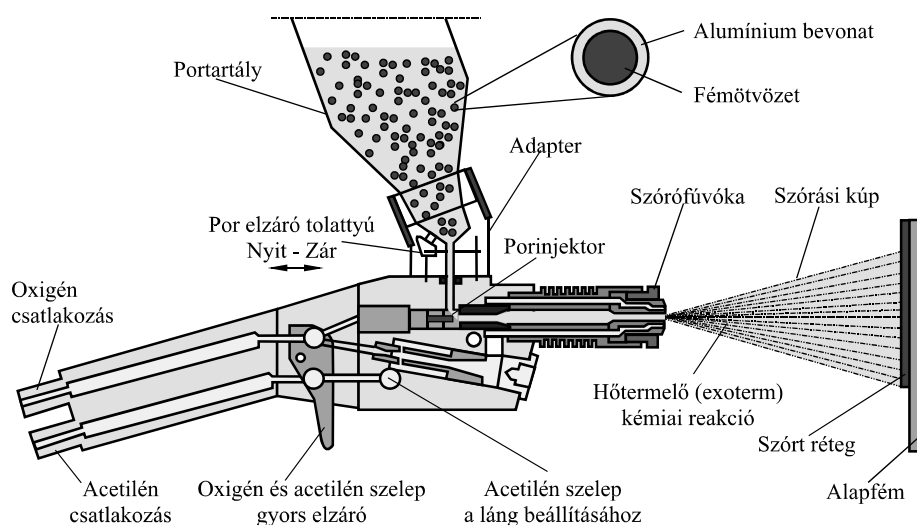
A fémorszórás első működő eszközét és az eljárást THURSTON (1902) fejlesztette ki és 1902-ben kapott szabadalmi engedélyt. Az eljárás iparilag is alkalmazható készülékét és az eljárás alapjait szintén SCHOOP (1921) teremtette meg, amikor megalkotta a PG szórópisztolyt. A fémorszórás előnye a

huzalszórással szemben a könnyebben kezelhető poranyag. A fémporokat egyenletes szem nagyságúra szítják, az adagolás viszonylag könnyebb, mint a huzalszóró pisztolyoknál. Az ezzel a módszerrel szórt réteg egyenletesebb szerkezetű és finomabb felületű, ugyanakkor nagyobb az oxidtartalom (NÁDASI 1971). A fém és fémötvözetporok előállításának technológiája jól kiforrott. A folyadék, vagy gázporlasztással előállított fém (Sn, Pb, Al, Cu, Mo) és fémötvözetporok (Fe-alapú, Cr, Ni ötvözetek) gömb alakúak, és jól beszabályozható a szemcsefrakciójuk (SCHATT 1979).

Aluminotermikus porok szórása

Ezek a porok az ún. kompozitporok közé tartoznak, de tekintettel arra, hogy ezeket a szórási technikában sikeresen alkalmazzák és elterjedtek, ezért külön említést érdemelnek. Az aluminotermikus porok szórásánál az alumínium bevonatú porrészecskéket a lángba juttatva egy termikus reakció következik be, ezzel növelve annak entalpiáját. A termikus reakció során Al_2O_3 és $AlNi$ vegyület képződik, mely hőfejlődéssel jár. A részecske képlékennyé (vagy folyékonná) válik és a lángon áthaladva a munkadarab előkészített felületébe ütközve, deformálódik és részleges hegesztett kötés alakul ki.

Ezt a módszert DITTRICH (1967) az 1960-as években fejlesztette ki, melyre 1967-ben kaptak szabadalmat. A lángba bevihető anyag formáját (alakját) tekintve huzal vagy por lehet. A kb. 20 t% alumíniumot galvanikus leválasztással viszik fel a huzal vagy por felületére.



2.10. ábra. Aluminotermikus porok szórása lánggal

Az alapozó réteget létrehozó por nagyobb mennyiségű Al-ot tartalmaz, míg a fedőréteg készítéséhez használt kevesebbet (CASTOLIN - EUTECTIC - ROTOTEC 1984), (UTP Exobond módszer). A lángban bekövetkező reakció termodinamikai leírását KULIK (1977) és társai ismertették.

A 2.10. ábrán a Castolin + Eutectic Rototec eljárása látható. Az aluminotermikus reakcióra képes por műanyag tartálya könnyen felhelyezhető és cserélhető. A por egy megválasztható nyíláson keresztül az oxigén szállítógáz csatornába kerül, mely a fűvókán keresztül a lángba viszi. A fűvóka kialakítása lehetővé teszi az acetilén és oxigén keveréknek közvetlenül a kiáramlás előtti intenzív keveredését – így csökken a hagyományos égőkben vagy keverőszáraknál fellépő robbanásveszély. Az eljárás alkalmazása gyors és sikeres megoldást jelent az elkopott alkatrészek (tengelyek, tengelycsapok, csapágyhelyek, stb.) felújításánál.

„Hideg” és „meleg” fémporozási technológiák elkülönítése

A 2.3. ábrán látható egyes csoportokon belül még további megkülönböztetés tehető aszerint, hogy a szórás folyamat atmoszférikus környezetben vagy szabályozott gázterű kamrában történik, illetve a felszórt réteg porózus, halmaz szerkezetű vagy egybeolvasztott tömör lesz.

A porózus réteg létrehozása után további technológiai lépésekkel lehetőség van a porozitás megszüntetésére, és az adhéziós tapadás diffúziós kötést alakítására. Ez esetben a rendszerint láng porszórással felvitt porózus réteget egy következő műveletben a szórópisztoly lángjával vagy külön melegítő gázégővel megolvasztják. A szóráshoz olyan ötvözetporokat használnak, melyek olvadási (likvidusz) hőmérsékletét az alapféméhez képest alacsonyabbra, általában 980 - 1300° C-ra állítják be. A megolvadt réteg lehűlés után tömör, öntött szerkezetű lesz. A szórás és ömlesztés során az alapfém méretétől, a réteg vastagságától és felületétől függően 600 - 900° C-ra melegszik. A magas hőmérséklet és a viszonylag hosszú hőtartási idő lehetővé teszi, hogy az adhéziós-mechanikus kötés az alapfémhez diffúzióssá váljon. Ebben fontos szerepet játszanak a kis atomméretű, diffúzióképes ötvözők, mint a szén, szilícium, bór, stb. (Az eredményt tekintve keményforrasztásnak tekinthető. A szakirodalomban használatos a szóróforrasztás elnevezés is.) A tömör, az alapfelülethez diffúziósan kötő réteg képes a pont és vonalmenti, statikus és dinamikus terhelések elviselésére.

A két szórás technológia megkülönböztetésére bevezették a „hideg” és a „meleg” szórás megnevezést, ami a munkadarab hőterhelésének jelentős különbségére utal.

Magyarországon a termikus szórások alkalmazása a 70-es években terjedt el. A szórópisztolyok többségét a Castolin+Eutectic cég forgalmazta Roto-Tec és Eutalloy néven. Ezek annyira közismertté váltak, hogy a „hideg” szórás helyett a Roto-Tec, a „meleg” helyett az Eutalloy megnevezés is általánossá vált. De megtalálható még a láng-fémporozás és a lángporozás, illetve szóróforrasztás megnevezés is.

Kutatási programomban a hideg fémporozási eljárásra, azaz a porózus szerkezetű felületi bevonatok vizsgálatára helyeztem a hangsúlyt. Normál üzemben megkopott tengelyek, általában siklócsapágy felületek, vagy jól beazonosítható egyéb súrlódó felületek felújítására elterjedt módszer a hideg fémporozás.

A technológia fő előnye, hogy ötvözött tengelyek esetén is alkalmazható, mivel 200 – 300 °C-nál nagyobb hőhatás elkerülésével az edződés, szövetszerkezeti változás elkerülhető.

2.1.4. Hideg fémporszórás technológiájának összefoglalása

Több szakirodalom foglalkozik a technológiák és bevonati rétegtulajdonságok (STAROSTA 2009, HABIB (2006)) leírásával. EMBER (1983) és JANIK (2001) szerkesztésében megjelent szakkönyvek alapján pontos, tömör összefoglalásra van lehetőség, mely a legfontosabb műveleteket és azok sajátosságait tartalmazza, de nem egyenértékű gyártói technológiai utasításokkal.

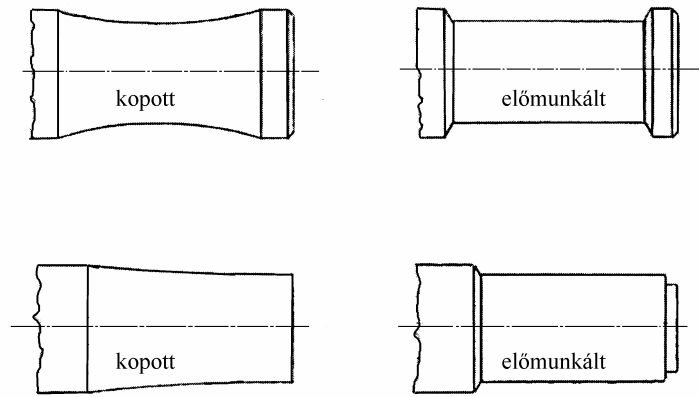
a) Munkadarab zsírtalanítása

A szemcsék jó tapadása megköveteli a fémes, tiszta felületet. A hibafelvételezés, repedésvizsgálat előtt végzett, rendszerint durva zsírtalanítás itt nem elegendő. Alkatrészek javításánál figyelemmel kell lenni a furatokban, éles sarkokban és az illesztett felületek között megtapadó zsír és olaj maradványokra, melyek többnyire nem távolíthatók el teljesen. Szórás közben gőzük lecsapódva a szórt felületre tönkretelheti a réteg tapadását. Ilyen esetekben a munkadarabot fel kell melegíteni a szórás közben várható hőmérséklet fölé ~280 - 350° C-ra és ezen kell tartani mindaddig, amíg az olajos kigőzölés meg nem szűnik. Nem maradhat a szórandó felületek környezetében semmilyen szennyeződés vagy bevonat, amely elégségesen vagy elgázosodva szennyezheti a megtisztított felületet.

b) A szórandó felület előkészítése

A felületek előkészítésénél az alábbi szabályokat kell figyelembe venni:

- A szóráshoz fémtiszta, nyers felületre van szükség. Ez úgy biztosítható, hogy szórás előtt max. 8 - 10 órával a felső réteget forgácsolással el kell távolítani.
- Az előkészített felületet tiszta ruhával, papírral, stb. le kell fedni, nehogy a légtérből olajpára csapódjon le a felületen.
- A lemunkált méretet úgy kell meghatározni, hogy készre munkálás után, számításba véve a megengedett kopást, a szórt anyagra előírt minimális rétegvastagság biztosítva legyen.
- A felszórt réteg szélei ne álljanak szabadon. Az alámunkálásnál a csapfelület szabadon álló pereménél 1 - 1,5 mm széles vállat kell hagyni, vagy a szórt felületet a homlokfelületen kell lezárni (2.11. ábra).
- Az alámunkálás szélein 90°-os vagy az előbbi ábrán látható 45° - 60°-os letörést javasolt alkalmazni.

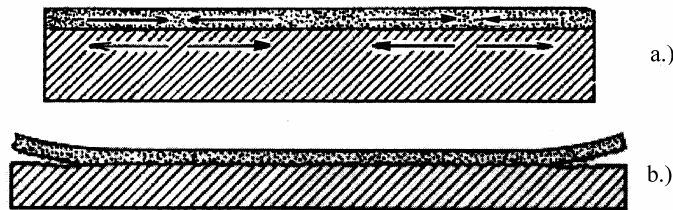


2.11.ábra. Tengely előkészítés (JANIK 2001)

c) A szórt felület érdesítése

Mivel a szórt réteg kötése az alapanyaghoz alapvetően adhéziós és mechanikus, a felület érdesítésével a kötőszilárdságot jelentősen növelni lehet. Erre olyan helyeken van elsősorban szükség, ahol a szórt réteg belső feszültsége és az üzemi terhelés, vagy a megmunkálás során fellépő erők a réteg leválását okozhatják. Ilyen helyek a szórt felület szélei, reteshornok, furatok környezete.

Mivel a szórt felület és a felszórt szemcsék, illetve réteg hőmérséklete jelentősen eltér egymástól, a lehülő réteg zsugorodása jelentős maradó húzófeszültséget hoz létre, amely a széleken leváláshoz vezethet (2.12. ábra).



2.12.ábra.. Zsugorodási feszültségek, szélek leválási veszélye (JANIK 2001)

A maradó feszültségek közel egyenletes eloszlásúak, de ha a réteg a felületen „megcsúszik” a terhelés egy keresztmetszetre fog koncentrálni. Ilyen esetben a réteg megrepedhet, sőt leválhat. Az ilyen „megcsúszás”, illetve leválás elkerülésére a felületet érdesíteni kell. Ennek a gyakorlatban alkalmazott módszerei a következők:

- Menetes profil esztergálása a teljes felületen vagy csak a kritikus helyeken.
- Gyűrű alakú vagy menetes hornyok esztergálása, majd görgözése speciális szerszámmal.
- Esztergált felület szemceszórása szilíciumkarbid szemcsékkel. Ez főleg a kemény, rideg anyagoknál jön számításba, ahol az előző módszerek nem alkalmazhatók. Gyakori a menetvágással való együttes alkalmazása.

- Nagyoló esztergálás a kés csúcsának középsík alá helyezésével. (A felület vagy a menet szaggatott, durva lesz.)
- Sík felületeknél gondoskodni kell a szélek lehorgonyzásáról bevágások és/vagy menetes csapok segítségével.

d) A munkadarab előmelegítése, hűtése

A zsugorodási feszültségek csökkentése és a felületre esetleg lecsapódott pára eltávolítása céljából szórás előtt a felületet 110 - 120° C-ra, a szórópisztollyal vagy melegítő égővel, elő kell melegíteni. Bár a zsugorodási feszültségek csökkentése érdekében ennél nagyobb hőmérséklet lenne kedvezőbb, de a felületi oxidréteg vastagságának növekedése miatt ezt csak indokolt esetekben, pl. furatok, vastag rétegek szórásakor célszerű növelni. Max. értéke a szórás közben várható munkadarab hőmérséklet (~220° C).

Bizonyos esetekben, ha fennáll a veszélye a túlmelegedésnek, szükség lehet hűtésre is. Ez főleg vékonyfalú csövek vagy kis átmérőjű csapok szórásánál fordul elő. Ilyenkor két megoldás lehetséges. ha észleljük a túlmelegedést, de a megadott felső hőmérsékleti határt még nem léptük túl, megszakítjuk a szórást és megvárjuk, amíg a munkadarab kb. 100° C alá hűl. Hengeres darabot forgás közben kell hűteni. Másik lehetőség, hogy a szórással szembeni oldalról fűvott levegővel szórás közben hűtjük a darabot. A hűtést a forgatás megszűnte előtt meg kell szakítani. Ha a darab a felső hőmérsékleti határ fölé melegedett, a szórást nem szabad megszakítani, hanem a pisztoly gyors előtoló mozgásával be kell fejezni. Így a felület gyors oxidációja ellenére van esély a réteges leválás elkerülésére. Ellenkező esetben az oxidált réteget le kell munkálni és a szórást csak ezután lehet folytatni.

e) Alapozó réteg szórása

A szórt anyagok egy jelentős része csak gyengén kötődik az alapfelülethez, ezért ezeknél egy közbenső, úgynevezett alapozó anyag felszórására van szükség. Ezeknek az alkalmazása akkor is indokolt, ha a réteg leválási veszélye az igénybevétel vagy a réteg helyzete, vastagsága miatt nagy.

Alapozó anyagként általában a tiszta molibdént és a NiAl, illetve NiCrAl ötvözeteket alkalmazzák, de ezek az anyagok feltöltő rétegnek önmagukban is alkalmazhatók.

A molibdénoxid 700° C-on már gőzzé válik, így a szórás közben 1000 - 1700° C hőmérsékletű szemcsék felülete gyakorlatilag fémtiszta. A kialakuló adhéziós kötés így jóval kedvezőbb, mint az oxiddal borított szemcséknél. Az oxidgőzök keletkezése miatt csak olyan alkatrészeknél alkalmazható, melyek üzemi hőmérséklete nem haladja meg az 480 - 580° C-ot.

A nikkal-alumínium ötvözetekben a szórás közben exoterm reakció indul meg, ami a szemcsék hőmérsékletét még becsapódásukkor is magasán tartja. Ez a magas hőmérséklet és a becsapódás kinetikai energiája pontokban kohéziós hidakat hoz létre, ami a tapadó szilárdságot növeli. Az alapozó réteg javasolt vastagsága 0,05 - 0,1 mm.

f) Fedő réteg szórása

Ha a felület előkészítés, érdesítés, szükség esetén az alapozó réteg felvitele megtörtént, fel lehet szórni a választott összetételű anyagot. Alapozás esetén is törekedni kell, hogy a fedőréteg szórása minél hamarabb megtörténjen. Legjobb, ha a két művelet közvetlenül követi egymást közbenső tárolás nélkül. Hengeres darabokat forgás közben a pisztoly gépi előtolásával lehet a legjobb minőségben felszórni. Forgató berendezésként általában a gyártásban már nem használt, de működőképes esztergagépeket használnak. Bonyolultabb felületeknél a pisztoly kézi, nagyobb sorozatoknál robottal történő mozgatása jöhet számításra.

A forgácsoló megmunkálásra a munkadarab méretétől és a szórás egyenletességétől függően, átmérőben 0,5 - 1,5 mm-t kell ráhagyni.

A szórt réteg mechanikai tulajdonságait a szórési paraméterek, pl. lángszórásnál az acetilén, oxigén keverési aránya, a sűrített levegő nyomása, a huzal vagy por adagolás sebessége, a munkadarab és a pisztoly távolsága jelentősen befolyásolhatják. Mivel ezek optimális értékei csak vizsgálatok alapján határozhatók meg és jelentősen függnnek a szórópisztoly típusától, a szórt anyagtól, stb., mindig a gyártó által megadott értékeket kell beállítani.

A leggyakoribb szórési hibák és okaik:

- Az alámunkálás szélein, a vállaknál kemény gyűrű jön létre, amely megmunkálása nehéz, esztergálásnál a réteg leválását okozhatja. Oka a sarkokban összegyűlő oxidok, melyek a vállaktól távolabb lesodródtak volna a felületről. Meredek (90°-os) vállaknál célszerű a kézben tartott pisztollyal kb. 45°-os szög alatt a sarkokat először feltölteni és csak azután szórni a felület többi részét.
- A szórt anyag forgácsoló megmunkálásnál rétegesen leválik. Ennek oka a túlmelegedés, amely a rétegek felhordása közben a felület gyors oxidációját okozza, ezzel lerontva a következő réteg tapadását. Ez a jelenség elkerülhető a pisztoly gyorsabb előtoló mozgatásával, vagy a hűtésnél elmondottak figyelembevételével.
- A szórt réteg megreped. Oka a nagy rétegvastagság, a nem megfelelő felület előkészítés. Ha a kopás miatt vastag ($S > 2$ mm) réteget kell felszórni, olyan szóróanyagot kell választani, melynek kicsi a lehűlés közbeni zsugorodása és/vagy növelni kell max. 260° C-ig az előmelegítés hőmérsékletét és durvítani kell a felületet.
- A réteg leválik. Oka lehet a felület szennyezettsége, molibdén alapozó alkalmazásánál a szórás közbeni túlzott felmelegedés, a szórési paraméterek helytelen beállítása, esetleg a forgácsoló megmunkálás során elkövetett hibák.

A gyártói előírásokat és az előző szempontokat figyelembe véve valamennyi szórési eljárással jó minőségű rétegek állíthatók elő, leválási veszély nélkül. Fontos, hogy az egyes szórópisztolyokhoz csak a hozzájuk illesztett szóróanyagokat alkalmazzuk és a szórési paramétereket, beleértve a környezeti

hatásokat, kézben tudjuk tartani. Ehhez biztosítani kell a szükséges feltételeket, pl. olaj- és páramentes, állandó nyomású sűrített levegőellátás, helyi- és térelszívás, lángszórásnál a gáznyomások és mennyiségek pontos beállításához szükséges nyomásszabályzók, gázmennyiség-mérők, stb. Mivel egyes fémek, pl. molibdén, cink gőzei belélegezve mérgező hatásúak és egyes szórási eljárások alkalmazása során keletkező zaj károsíthatja a hallószerveket, a dolgozókat megfelelő egyéni védőfelszereléssel is el kell látni.

g) A szórt réteg megmunkálása

A forgácsolási paraméterek és a szerszám megválasztásánál mindig figyelemmel kell lenni, hogy nem tömör, hanem porózus szerkezetű, az alapfémhez mechanikusan és adhéziósan kötődő anyagot kell megmunkálni.

A réteg nem homogén, keménysége jelentősen eltérhet az egyes szemcsék keménységétől. A nagy oxid esetleg karbid vagy nitrid-tartalom a megmunkálásnál a szerszámkopási sebességét növeli.

Általános szabályként elfogadható, ha a réteg keménysége kisebb, mint 300 HB, K10-es keményfémlapkás szerszámmal megmunkálható, e fölött köszörülni kell.

Ha $R_a < 2,5 \mu\text{m}$ felületi érdességet akarunk előírni, befejező műveletként köszörülni és polírozni kell. Esztergálásnál, különösen a kezdő fogásoknál, vigyázni kell, nehogy a forgácsolóerő a réteg széleit felszakítsa. A szerszámél elhelyezési szögét $\kappa \leq 45^\circ$ -ra kell választani. A gyártók általában megadják a szórt ötvözetek megmunkálásához ajánlott forgácsolási paramétereket és szerszámjellemzőket. A forgács szemcsés, töredezett, jelentős mennyiségű oxidot tartalmaz. A szerszámgép ágyvezetékeire kerülve intenzív kopást okozhat, ezért a vezetékeket letakarással védeni kell.

Olyan esetekben, amikor a réteg porozitása káros, pl. hidraulika elemek, vékony korrózióvédő bevonatok, a befejező forgácsolási művelet előtt a porusokat műgyantával telíteni lehet.

A siklócsapágy felületek felújításánál viszont kimondottan előnyös a porózus réteg, mivel kenőanyag tárolásra és súrlódás közbeni kenőanyag leadásra alkalmas a réteg.

A kenőanyaggal való feltöltés módszerére, a kenőanyag – általában ásványi alapolaj – felvevő és leadó képességre a szakirodalom és a technológiai ajánlások rendkívül hiányosak. Nincs információ a kenőanyag kezelő képesség, a tapadási szilárdság, a szórt réteg adhéziós tulajdonságai közötti kapcsolatokról, mely kutatásom fő területét képezik.

2.2. Technológiai jellemzők szakirodalmi áttekintése

2.2.1. Alkalmazott lángtípusok jellemzése

A lángba bevezetett részecskék az alapfémekkel való érintkezés előtt intenzíven felhevülnek és nagymértékben felgyorsulnak. A felszórt bevonatok mikroszerkezete és a bevonatok tulajdonságai nagymértékben függenek azoktól a

jelenségektől, amelyek a részecskék repülése közben történnek. A lángtulajdonságoknak valamint a részecskék repülés közbeni hőmérsékletének, sebességének és elgőzölgésének gyakorlati ismerete lehetővé teszi a folyamat jobb megértését, korlátozza az üzemi feltételek optimalizációs idejét és végül lehetővé teszi a szórási folyamat automatizálását.

A lángok jellegzetességei

a) Hőmérséklet

A láng teljes entalpiájának meghatározása céljából azt a kalorimetrikus módszert lehet használni, amelyet az ASTM E 341-73*- szabványban írnak le. Ez a módszer a pisztolyba jutó energia-bevitel (a villamos energia mérése) valamint a hűtővíz által okozott – hűtött pisztoly esetén - energia-szóródás (a víz áramlási sebességének, a víz belépési és kilépési hőmérsékletének mérése) meghatározásán alapul. Ha az energiakülönbségeket elosztjuk a munkagáznak a mérések közötti tömegáramával, akkor megkapjuk a láng összes entalpiáját (H_t). A statikai entalpia (H_s) ahhoz szükséges, hogy meghatározzuk a láng hőmérsékletét:

$$H_s = H_t - \frac{1}{2} u^2 \quad (2.1)$$

ahol u = a láng sebessége

Ha ismert a pisztoly-fúvóka átmérője (d) és a munkagáz tömegáramlási sebessége (q), akkor a láng átlagos sebessége:

$$u = \frac{4q}{\rho_g \pi d^2} \quad (2.2)$$

ahol ρ_g = a gázláng sűrűsége.

Ha ismert a statikus entalpia, a hőmérséklet és a sűrűség közötti összefüggés (pl. CAPITELLI (1969) (1972) és társai által végzett kutatásokat), akkor lehetőség van arra, hogy néhány iteráció után meghatározzuk a láng átlagos hőmérsékletét és sebességét.

A kalorimetrikus módszer, amely egyszerűsége miatt nagyon vonzó, csupán a láng átlagos sebességének és átlagos hőmérsékletének meghatározását teszi lehetővé. A tényleges lánghőmérséklet és sebesség az axiális(tengely) és a radiális(sugár) irányban változik. A lángot általában két zónára lehet osztani (a pisztoly fúvójától kiindulva tengelyirányban):

- nagy hőmérséklet és nagy sebesség– mag-zóna
- a csillapodó hőmérséklet és sebesség területe– a kifejlődött zóna

A mag-zónában a hőmérsékletet az emissziós spektrószkópia módszerével (pl. MÜLLER 1970, RIENZI 1971) monokromátorokkal lehet meghatározni. Általános feltételek között a módszerek néhány emittált spektrum-vonal (a lángban a gázoké) megtalálását, néhány feltételezés figyelembe vételét (mint a láng villamos semlegessége és annak helyi termodinamikai egyensúlyi állapota) valamint azok

abszolút intenzitásának mérését tartalmazza. A gáz hőmérsékletét két különböző vonal által emittált sugárintenzitás arányából lehet meghatározni. Ennél a módszernél azt feltételezzük, hogy a lángnak a mért térfogatban a hőmérséklete állandó.

Más olyan módszerek, amelyeket a magzónában a hőmérséklet meghatározására használni lehet a következők: lézer által indukált sugárzás (FAUCHAIS 1984), lézer-szóródás valamint az entalpia próba módszer (FAUCHAIS 1993). A kifejlődött zónában a hőmérséklet értékeit a magas hőmérsékletű hőelemek segítségével lehet meghatározni (FISZDON 1975).

b) Sebesség

A lángok sebességének mérését általában ugyanazokkal a módszerekkel végzik, mint amelyeket a részecskék sebességének meghatározásához használnak.

A módszerek a következők:

- Lézeres sebességmérés (LV), olyan módszer, amely használata során feltételezik, hogy a finom és könnyű részecskéknek ugyanolyan sebességük van, mint amilyen a láng részecskéknek (MCKELLIGET (1982) és társai).
- A lézer-Doppler-sebességmérés (LDV) rendszerét használta a 3 µm-es méretű alumíniumoxid részecskék sebesség meghatározásánál (STEFFENS 1985).
- A lézer-két-fokusz (L2F) eljárás szintén alkalmazott gyakorlat
- Fotografikus fénycsík-eljárásnál egy gyors kamerát használnak, amely lehetővé teszi, hogy lángtól lángig a lángokban történő zavarokat követni lehessen. Ezt az eljárást használták (FRIND (1983) és társai is).
- Színképelemzési módszer, a láng által emittált vonalak Doppler-eltolódásán alapszik (CAMBRAY 1977).

Jelenleg főleg az LV módszereket használják a lángsebesség meghatározására. Mindazonáltal hangsúlyozni kell, hogy ezek a módszerek nem teszik lehetővé a lángsebességnek a mag-zónában való mérését (a láng fényereje nagyobb, mint a mérésnél használt részecskéké).

c) Vegyi összetétel

A gázminták vegyi összetételét a vegyelemzés bármely módszerével (pl. tömegspektrográfia, FISZDON 1976) vizsgálni lehet. Úgy tűnik, hogy az a mintavételi módszer, amely a pisztolyból különböző tengelyirányokban vett gázminták elemzésén alapszik, a legalkalmasabb

A lángban a gázok vegyi összetétele azt mutatja, hogy a pisztoly kilépési helytől kb. 34 mm-es távolságban az Argon-tartalom kb. 50 %-ra csökken plazmaszórásnál. A (munkagázból) a hidrogént a különböző távolságokban nem lehet észlelni. Bizonyára reakcióba lép az oxigénnel és vizet képez (FISZDON 1976). Vákuumos plazmaszórás esetén, a közép vonal sebességének méréseinél gyors kamerát használtak. A láng sokkal nagyobb sebességet mutatott (kb. 900 m/s), mint az atmoszférikus plazma szórásnál (500-600 m/s). Mindazonáltal a

sebesség csökkenése kevésbé intenzív, mint az atmoszférikus plazma szórásnál. Nagy sebességű, oxigén tartalmú gáz (HVOF) szórás esetén a szórásnál a sebesség profil azt mutatja, hogy a maximumot a pisztoly kilépési helytől kb. 5 cm-re érik el, ami után a sebesség elkezd csökkenni. WAGNER (1984) és munkatársai a gáz sebesség mérését végezték Jet-Kote típusu pisztolynak HVOF eljárásban való használatánál, ahol a pisztoly MAPP-vel (propán-szerű gázkeverék) és oxigénnel működött. A szerzők azt találták, hogy 0,8 MPa oxigénnyomásnál valamint a 0,4 MPa MAPP nyomásnál, a pisztoly kilépési helytől 300 mm-es távolságban a mért sebesség átlagértéke kb. 1770 m/s, a maximum érték pedig kb. 3000 m/s volt.

d) A láng sűrűsége és szállítási tulajdonságai

A forró gázok termodinamikájának és szállítási tulajdonságainak részletes leírása nem a kutatási területem, egy önálló tudományterület, mellyel igen sok kutató foglalkozott más (pl. gázturbinák) műszaki berendezések kapcsán. Azonban a láng sűrűségének és szállítási tulajdonságainak ismerete segíti a hő, tömeg és nyomaték transzfer (átadás) jelenségeinek megértését. E szakterület részletes tanulmányozásához a gázok termodinamikai és szállítási tulajdonságairól felállított adatbank (PATEYRON 1986) és társai ajánlható. További források a szakterülethez: CAPITELLI (1969), CAPITELLI (1972) és társai, DEVOTO (1967), MORRIS (1970) és társai, CAPITELLI (1976) (1977) és társai.

A láng és a szórt részecskék közötti impulzusátvitel

A mozgó gázba injektált tömör részecskék felgyorsulását a következő erők hozzák létre (LEWIS 1973):

- áramlási ellenállás (közegellenállás) ereje
- a nyomás-gradiens miatt létrejövő erő
- a hozzáadott tömeg miatt létrejövő erő
- a Basset-féle történeti időtartam
- külső potenciális erők (gravitációs, villamos stb.)

A legtöbb termikus szórás esetén csak az áramlási ellenállást veszik a számításnál figyelembe, ily módon a részecskemozgás egyenlete a következő:

$$\frac{1}{6} \rho_p \pi d_p^3 \frac{dv}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 \rho_g (u - v)^2 \quad (2.3)$$

ahol u = a gázsebesség, v = a részecskesebesség, d_p = a részecske átmérő, ρ_p és ρ_g = a részecske ill. a gáz sűrűsége, a C_D = közegellenállási tényező.

Az áramlási ellenállás (közegellenállás) tényezője függ a láng sebességéhez (amelyet az Re szám ír le) viszonyított részecske sebességtől, amit a következőképpen lehet levezetni:

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad Re < 0.2 \quad (2.4)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right), \quad 0.2 \leq Re < 2 \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.11 Re^{0.81}), \quad 2 \leq Re < 21 \quad (2.6)$$

$$C_D = (1 + 0.189 Re^{0.632}), \quad 21 \leq Re < 200 \quad (2.7)$$

ahol a (2.4) egyenlet a mozgást a Stoke-féle üzemi feltételeknél, míg a (2.5) egyenlet az Oseen üzemi feltételeknél írja le. Az (2.6) és (2.7) egyenleteket BEARD (1969) javasolta. A Reynolds féle számot a következőképpen lehet definiálni

$$Re = \frac{\rho_g d_p (u - v)}{\eta_g} \quad (2.8)$$

ahol: ρ_g = a gáz dinamikai viszkozitása
Repülés közben a részecske T_p hőmérséklete egészen a forráspontig is emelkedhet. És ezután a T_g láng hőmérséklet sokkal magasabb is lehet. Tehát a részecske körül határréteg van és indokolt annak feltételezése, hogy a gáz tulajdonságok a határrétegben átlagosak. Ez az oka annak, hogy miért lehet a dinamikai viszkozitást valamint a határrétegben a később tárgyalandó hővezető képességet a következő kifejezésből levezetni:

$$GP = \frac{1}{T_g - T_p} \int_{T_p}^{T_g} GP(T) dT \quad (2.9)$$

A lángba injektált összes részecske által létrejövő impulzus (nyomaték) összege egyenlő a láng-nyomaték veszteségével. Ezt a hatást (*feltöltődési hatást*), amely különösen nagy jelentőségű a nagy poradagolási sebességeknél, ideális feltételek mellett (elméletben) pl. POLAK (1969) vizsgálta. FINCKE (1990) és társai és később VARDELLE (1992) és társai az Al_2O_3 részecskék viselkedésének kísérleti méréseit végezte. A másodikként említett szerző tanulmánya a megömlesztett és az aprított alumíniumoxid részecskék (méreteloszlás = $45 + 22.5 \mu m$) sebességeit mérte a por adagolási sebesség függvényeként. Az eredmények azt mutatják, hogy az atmoszférikus plazma (APS) pisztoly kilépési helyétől 120 mm-es távolságban az átlagsebesség 270-ről 240 m/sec-ra csökkent, a sebességnek 3-ról 33 g/percre való emelkedése mellett. Mivel az ipari gyakorlatban a poradagolás sebessége

sokkal nagyobb, ezért a feltöltődési hatást a szórási paraméterek optimalizálásánál figyelembe kell venni.

A másik jelenség a „nem folytonossági hatás”, ami a részecskék méretére vonatkozik, amikor a méretek összehasonlíthatóvá válnak a lángban a közepes szabad úthosszal (pl. az Ar lángnak 5 kPa-nál, 5000 K-nél kb. 23 μm -es közepes szabad úthossza van, (FRIND (1983) és társai). Ez a hatás, amely a kis nyomásoknál a lángban lévő kisméretű szemcsék esetén fontos, a lángból a részecskékhez történő hő, tömeg és nyomatékátvitel csökkenéséhez vezet. Ezt a hatást az APS eljárásnál részletesen tárgyalják JOSHI (1986a, 1986b) és társai, míg a nagysebességű oxigénes (HOVF) eljárást JOSHI és SIVAKUMAR (1993).

A részecskék lángba történő injektálása befolyásolja a szemcsék röppályáját.

Az injektálási sebesség, azaz a részecskék sebessége a csővezeték kilépési helyénél a következőktől függ:

- a vivőgáz áramlási sebességétől,
- a szemcsemérettől,
- a szemcseadagolás sebességétől,
- az injektor és a csővezeték hosszától és átmérőjétől.

A szemcséket a kis átmérőjű (4-6 mm) csővezetékbe továbbítják, amelyek gyakran a csővezeték-falhoz ütköznek. Ez az oka annak, hogy nem tudják felvenni a vivőgáz teljes sebességét. Az ütközések akkor valószínűbbek, ha részecskék kisméretűek és a poradagolási sebesség nagy. A stabil portovábbítás feltételeit részletesebben HOUBEN (1976) ismertette. Az injektálási sebesség számításait pl. HANTZSCHE (1971) PAWLOWSKI (1980b) végezte.

Továbbá a porszemcsék nem azonos méretűek, és nagyobb méretű szemcsék csak kisebb sebességekre gyorsulnak fel, mint a kisméretű szemcsék. Ez az oka annak, hogy az injektálás sebessége is bizonyos eloszlást mutat.

Az injektálás szöge legjobb, ha 0° (axiális injektálás). Ténylegesen a D-gunTM-nél és néhány HVOF-pisztolynál van axiális injektálás. Az APS-pisztolyoknál az injektálás derékszögben (90°) történik.

A részecske sebességmérés módszerei

A részecske sebesség meghatározásának jól ismert és megbízható módszere a részecskeáramlásnak forgó tükörrel való fényképezése. A részecskék nyomvonalának ferdeségét a filmen rögzítik (lehetőleg nagy érzékenységű filmen), amely úgy jön létre, hogy a lángban a részecskék lineáris sebessége és a tükörfelület lineáris sebessége szuperponálódik. Ily módon a részecske sebességeket könnyen meg lehet határozni, ha a ferdeséget lemérjük és ismert a tükör sebessége. Bár ez a módszer egyszerű, de az a feltétel korlátozza, hogy a repülő részecskék fényerejének elegendő nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy nyomvonalat hagyjanak a filmen.

Ugyanezt az elvet használják a fotografikus fénycsík-eljárásnál. A sebesség v_p fénylő részecskéit gyorsan mozgó filmes kamerával fényképezik, amikor a filmsebesség ($v_f = 175$ m/sec) volt a FRIND (1983) és társai által végzett mérésnél. Napjainkban a részecskesebességek legtöbb mérésénél a lézer-sebességmérőt használják: FRIND (1983) és társai, WAGNER (1984) és társai.

Két népszerű rendszer van:

- lézer-Doppler-sebességmérés (LDV)
- lézer-két-fókuszos módszer (L2F)

Az LDV rendszert az alábbi szerzők tervezték és használták a részecske-sebesség mérésére:

- VARDELE (1980) és társai: lézer hullámhossz 514 nm; lézer energiája 1.5 W; mérési térfogat $1 \times 1.3 \times 1.3$ mm³; a rendszert APS eljárásnál az Al₂O₃ részecskék sebességmérésére használták
- WAGNER (1984) és társai: lézer hullámhossz 514 nm; lézer energiája 0.5 W; mérési térfogat, OD 108.3 μm, hossza 4.9 mm; a rendszert HVOF szórás eljárásnál a WC-Co részecskék sebességmérésére használták
- FINCKE (1990) és társai: lézer hullámhossz 514 nm; lézer energiája 6 W; mérési térfogat OD 0.173 mm, hossza 4.2 mm, a rendszert APS eljárásnál az NiAl és az Al₂O₃ részecskék sebességének mérésére használták

A lézer-két-fókuszos (L2F) rendszerrel a lézersugár két sugárnyalábra válik szét (SMITH 1987). Ezeket a sugárnyalábokat úgy fókuszálják, hogy két kisméretű vizsgálati térfogatot adjanak. Amikor a részecske áthalad a start térfogaton, akkor az elektronikus óra elkezd számolni azt az időt, amíg a részecske át nem halad a stop térfogaton. A részecske-sebességet a térfogatok közötti ismert értékű távolságnak a mért időintervallummal való elosztása után kapjuk meg.

Ezt a rendszert a következő kutatók használták:

- STEFFENS (1985) és társai különböző nyomások mellett az Al₂O₃ sebességének mérésére,
- SMITH (1987) az alumíniumoxid sebességének mérésére,
- BARBEZAT (1989) HVOF szórás eljárásnál, a WC-Co sebességének mérésére.

2.2.2. A láng és a szórt részecskék közötti hőátadás

A szórás eljárás paramétereinek optimalizálásának az a célja, hogy az alapfémhez ütköző összes részecske megolvadjon (és a sebessége lehetőleg a maximális legyen). Ilyen feltételek teszik lehetővé homogénebb bevonat felvitelét, amelynek eredményeképpen a legjobb bevonat-tulajdonságokat érjük el. Ez alól fontos kivételt képez a hőszigetelési hatás és a bevonatok hő-sokkal szembeni ellenállása, mert ezeknél jobb, ha a bevonatoknál bizonyos mérvű szabályozott porozitás van. Ha a részecskék kisméretűek, vagy ha a hőt jól vezetik, akkor ezt a célt könnyebb elérni, mint egyébként. Nagyméretű részecskék és/vagy gyenge

hővezetőképességű részecskék megolvasztásához szükségesnek látszik olyan eljárási feltételek kiválasztása, amelyek a részecskék felületéről az intenzív elgőzölgést nem okoznak. Ez a részecskén belüli hőmérsékleti gradiensből következik. Mindenesetre az elgőzölgés hatása nem kívánatos a következő okok miatt:

- az elgőzölgés csökkenti az eljárás termelékenységét, (amelyet úgy lehet definiálni, mint a felrakott anyag tömege és a szóráshoz használt anyag tömege közötti viszonyszámot),
- a gőz a részecskék körül lehűti a lángot, ami csökkenti a részecskékhez továbbított hőmennyiséget,
- az éppen felrakott bevonatokon a gőz kondenzációja csökkentheti a bevonat kohézióját és szívósságát,
- néhány anyag (pl. Cr_2O_3) gőzének belégzése veszélyes.

A másik olyan hatás, amely a részecskén belüli hő-gradiensből következik, az alapfémhez való ütközésnél jön létre. Azaz előfordulhat, hogy a részecske nem olvad meg. Ez a bevonat- porozitás létrehozásának egyik legfontosabb momentuma.

A lángon belüli részecskébe a lángból történő hőátadás fő folyamatai: hővezetés, hőkonvekció és hősugárzás. MEYER (1962) (1964) a folyóirat-cikkeiben a hőátadás fontos tényezőjeként megemlíti még a részecske anyag katalitikus aktivitását, amely a molekuláris lángok felületén az atomok rekombinációjához vezet, elősegítve ezzel a hőátadást. A hővezetési mechanizmusnál ezt a hatást az ambipoláris hővezetési együtthatóval ($\lambda_{\text{ambipolar}}$) részben figyelembe veszik. Az összes hővezetés tényezője (λ_{total}) (SAYCE 1976) adatai alapján:

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{atom}} + \lambda_{\text{elektron}} + \lambda_{\text{ambipolar}} \quad (2.10)$$

Ahol $\lambda_{\text{elektron}}$ és λ_{atom} a lángban másfajta tényezőkből létrejövő együttes hatás.

A hővezetés és hőkonvekció mechanizmusait általában a Nusselt-szám (Nu) írja le, és ennek a számnak a részecske gömbalakja esetén a következő jól ismert alakja van:

$$Nu = \frac{hd_p}{\lambda} = 2 + 0.66\text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.33}, \quad (2.11)$$

ahol d_p a részecske átmérője, a h a hőátadási tényező, a λ átlagértékét ki lehet számolni, ha a λ_{total} értéke ismert.

A (2.11) egyenlet jobboldalán az első tag (vagyis a 2) a hővezetés mechanizmusát írja el. Ez a mechanizmus akkor domináns, ha az Re szám kicsi, pl. akkor, ha a részecske sebessége megközelítőleg a láng sebességével egyenlő. Ez az eset akkor fordul elő, amikor a részecske a kifejlődött zónában tartózkodik. Egyébként,

különösen a részecske-repülés kezdeti szakaszában a második tagot kell figyelembe venni. Ennél a tagnál az Re számot az (2.8) egyenlet határozza meg, a Prandtl számot (Pr) pedig a következő egyenlet definiálja:

$$Pr = \frac{\eta_g (c_p)_g}{\lambda_g} \quad (2.12)$$

ahol η , λ és c_p = a dinamikai viszkozitás, a hővezetés ill. a fajhő, míg a g az a jelölés, hogy ezek gáztulajdonságok.

A lángsugárzást gyakran úgy feltételezik, mint amely összevethető a részecskéről jövő visszasugárzással és ezért ez elhanyagolható (BOURDIN 1983, SAYCE 1976).

A *nem folytonossági hatást*, amit gyakran Knudsen hatásnak is neveznek, figyelembe kell venni a ritkított lángban (VPS) lévő kis méretű részecskénél. Ez a hatás a hőátadás csökkenéséhez vezet. Ennek a csökkenésnek a becslését CHYOU és PFENDER (1989) végezte el.

Mivel a részecskék repülésük közben megolvadnak, és másrésről a részecskék különböző sebességgel mozognak, ennek gyakori összeütközés és az agglomeráció (összetömörödés) lesz a következménye. Az agglomeráció következménye lesz a részecskék átmérőjének növekedése is, ezt PAWLOWSKI (1980a) figyelte meg, amikor plazmával finom alumíniumoxid port a vízbe szórt.

Az AS-eljárásnál a hőátadás kissé különbözik más eljárásoktól. A részecskéket a cseppfolyósodó huzalból képezzük és a részecskék az alapfém irányába történő repülésük közben a gázporlasztás miatti konvekció és a részecskék felületéről érkező sugárzás révén lehűlnek (BUSSE 1989). A részecske lángban történő felhevülésének jelenségét két egymástól jól elkülöníthető esetre lehet felosztani:

- a részecskén belüli hőmérsékleti gradiens nélküli hevítés
- hőmérsékleti gradienssel való hevítés

2.2.3. A részecske hőmérséklet mérésének módszerei

A legegyszerűbb módszer, amelyet a részecskék repülés közbeni hőmérsékletének meghatározásához ajánlanak, a vízbe való szórás. Ha a részecskék a lángban megolvadt állapotban voltak, akkor a vízben gömb-alakúak lesznek. Összeszámolható a gömb alakú részecskék százalékos aránya (amint azt PAWLOWSKI (1980a) tette tanulmányában, annak megismerése céljából, hogy ténylegesen milyen hatékony a szórási paraméterek optimalálása.

E területen javasolt az optikai módszerrel történő kutatás. KRUSZEWSKA (1977) az egy-szín pirometrikus eljárást ajánlotta. HANTZSCHE (1973) két-szín pirometrikus eljárás alkalmazását javasolta. A hőmérsékletmérés pontosságát VARDELLE (1989) és társai mérésénél 20 %-ra és FINCKE (1990) és társai mérésénél pedig 5 %-ra becsülik.

2.2.4. A bevonat felépítése

A bevonat azokból az egyedi részecskékből épül fel, amelyek az alapfémhez ütköznek. A részecskék az alapfémhez való ütközés pillanatában teljesen vagy részben megolvadt állapotban vagy szilárd állapotban lehetnek. A szilárd részecskék visszapattannak vagy gyengén kötődnek a bevonat egy részéhez, csökkentve annak szívósságát. Ez az oka annak, hogy a szórási paraméterek gondos optimalizálása az ilyen részecskék kiküszöböléséhez kell, hogy vezessen. Kezdetben a részecskék az alapfémhez ütköznek. Az ebben a szakaszban végbemenő jelenségek határozzák meg a bevonatnak az alapfémhez való tapadását. A megolvadt részecskék lemezekké deformálódnak és tús vagy finomszemcsés kristályokat képezve szilárdulnak meg. A szórópiszoly az alapfém felett mozog és az első réteget általában 5–15 lemez képezi, amely a folyamat paramétereitől (a por adagolási sebességétől, a szórási távolságtól, a részecskék átmérőjétől, és a pisztoly lineáris sebességétől) függően alakul ki. A létrejött rétegen belül végbemenő jelenségek határozzák meg a kristályszerkezetet és a kristályméretet, a porozitás kialakulását és a mikrorepedések kialakulását. A pisztoly a munkadarab méretétől függően, bizonyos idő eltelte után visszatér ugyanarra a pontra. Eközben a réteg felülete ki van téve a környezet hatásának, azaz az oxidációnak (oxidálódó anyagoknál) és a lehülésnek. A lehülés maradó feszültségek kialakulásához és esetenként repedésképződéshez vezet. A réteg szórása közben a pisztoly az előzőleg felrakott réteget felhevíti, és járulékos hőáramlás keletkezik a részecskék szilárdulásából, valamint a részecskéknek a tényleges hőmérsékletre való lehüléséből. A végleges bevonatvastagságot az alapfém feletti sokszori áthaladással érik el. Ezután a bevonat szobahőmérsékletre hűl le, ez hőfeszültségek kialakulásához és esetleg repedésképződéshez vezethet, néha pedig akár a bevonatnak az alapfémről való leválásához is.

2.2.5. A részecske deformáció és hőmérséklet

Az alapfémmel való első érintkezés pillanatától kezdve a részecske deformálódni kezd. Kezdetben henger alakja van A gömbalakból henger alakúvá való deformáció idejét KUDINOV (1977) és HOUBEN (1988) 10^{-10} – 10^{-9} sec értékre becsülte. Az ütközés a lemezen belül és az alapfémbe lökéshullámot hoz létre. Később, a henger sugárirányban kezd szétterjedni, palacsinta formát vesz fel és ezzel egyidejűleg végbemegy a szilárdulási folyamat. Ezeket a folyamatokat JONES (1971), MADEJSKI (1976a) és újabban TRAPAGA (1991) valamint YOSHIDA (1992) és mások elemezték. Jelenleg Madejski megközelítése tűnik a leggyakrabban idézett megoldásnak.

A megszilárduló részecskében és az alapfém határos területein a hőmérsékleti mezők az (2.21) hővezetési egyenlet megoldásával határozhatók meg. Az egyenlet

1-D (egy dimenzióban) való megoldását CARSLow (1959) állapította meg és a tárgyalt esetre vonatkozóan több szerző pl. KUDINOV (1977), ZAAT (1983) vagy EL-KADDAH (1984) és mások úgy alkalmazta, hogy a vékony részecskéket az egyirányban végtelen alapfém megközelítésére használta. A két darab, egy irányban végtelen test ettől némileg eltérő megközelítését (a lemeztvastagság figyelembe vétele nélkül) DALLAIRE (1993) alkalmazta.

A KUDINOV (1977) által javasolt megoldás a következő egyszerűsítéseken alapul:

- az alapfém egy egyirányban végtelen test, amelynek ütközés előtti hőmérséklete T_0 ,
- a részecske az ütközés előtt folyékony és egyforma T_m olvadáspontja van,
- a részecske és az alapfém közötti érintkezés ideális,
- a hő egy irányban terjed.

A részecske és az alapfém határfelületén az érintkezési hőmérséklet a részecske T_0 szilárdulási ideje alatt egyenlő a következővel:

$$T_c = T_0 + \frac{K_\varepsilon (T_m - T_0)}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)} \quad (2.13)$$

ahol $K_\varepsilon = (\lambda_1 \alpha_2^{0.5}) / ((\lambda_2 \alpha_1^{0.5}))$, λ a hővezetőképesség, α a hődiffúziós index pedig a részecskére illetve az alapfémre vonatkozik, $\Phi(\alpha)$ a valószínűségi integrál.

Ezen a területen haladást az utóbbi időben gyors pirométerek alkalmazásával érték el. Ténylegesen, néhány laboratóriumban (MOREAU (1991) és mások; FANTASSI (1992) és mások) olyan korszerű optikai készülékeket fejlesztettek ki, amelyek lehetővé teszik a lemezfelület ütközés utáni hőmérsékletének megfigyelését.

2.2.6. Gócképződés (nukleáció), szilárdulás és kristálynövekedés

Miután a folyékony részecske deformációja megtörténik, elkezdődik a szilárdulási folyamat. A legjellegzetesebb feltételek között, a szilárdulási folyamat a részecske és az alapfém (vagy az előzőleg felszórt bevonat) közötti határfelületen kezdődik, ez a határfelület képezi a folyékony anyag számára a hőelnyelő csapdát. A gócképződés heterogén jellegű és a szilárdulási front gyorsan halad a lemez felső részének irányába [a sebességet a különböző szerzők széles tartományban adják meg: 10 cm/s-tól (MCPERSON, 1981) 50 m/s-ig (SAMPATH 1989).

A mikroszövet szerkezetet SAMPATH és HERMAN (1989) TEM (transzmissziós elektronmikroszkóp) alkalmazásával vizsgálta, APS eljárással felvitt Ni és NiCr bevonatokban a réz alapfémrel való határfelületen és a bevonaton belül, továbbá WILMS és HERMAN (1976a) az APS eljárással felvitt alumínium-oxid bevonatokban vizsgálta.

2.2.7. Az adhézió mechanizmusa

A felérdesített felületen több lemez, bizonyos mértékben, azzal az erővel tapad az alapfémhez, amely a felületi egyenetlenségeket körbefogó folyékony anyag térfogatcsökkenéséből adódik.

A lemezek nem érintkeznek az alapfémrel a teljes alsó felületükön. Ez a virág alakú lemezeknél nyilvánvaló és egy sor kísérleti tény is bizonyítja pl. KUDINOV (1977) vagy HOUBEN (1988), hogy még a palacsinta alakú lemezek sem érintkeznek teljes mértékben az alapfémrel. Az érintkezési területeket néha „hegesztési pontoknak” (KUDINOV 1977) vagy „aktív zónának” (STEFFENS 1991c és mások) nevezik és ezek a teljes lemezterület 20–30 %-ának felelnek meg (MCPHERSON 1989). A bevonatok adhéziója (tapadása) javul, ha az érintkezési terület nagyobbá válik. Ezek a területek határosak: oxidokkal (ha fémet vagy ötvözetet szórnak, amely repülés közben oxidálódik), levegővel teli pórusokkal (az alapfém felületi egyenetlenségei miatt) vagy (a részecske megdermedése közben távozó) munkagázzal teli pórusokkal.

Az érintkezési terület növelése az oxidtartalom csökkenése mellett úgy érhető el, hogy a felszóró porban dezoxidáló elemeket használnak. Egy ilyen elem, az Al, szerepét MCPHERSON (1989) tanulmányozta. A szerzők úgy találták, hogy az APS eljárásnál használt, előötvözött Ni + 5 súly% Al porrészecskék csupán 10 tömeg% oxigéntartalmú, palacsinta típusú lemezek kialakulását eredményezték. Ezzel szemben a tiszta Ni porból szórt bevonatok, amelyeket hasonló feltételek között vittek fel, 2 tömeg% oldott oxigéntartalmú (főleg NiO oxid tartalmú) virág alakú lemezeket eredményeztek.

A lemezek és az alapfém közötti érintkezési felületeken belül az adhézió a következő mechanizmusokból adódhat:

- fizikai kölcsönhatás,
- metallurgiai kölcsönhatás,
- más kölcsönhatások (mint pl. epitaxia)

a) Fizikai kölcsönhatás

A lemez és az alapfém atomjai közötti fizikai kölcsönhatás a Van der Waals-féle erők működéséből adódik (STEFFENS 1972), és csak akkor alakul ki, ha szoros és konstans az érintkezés. A felületeknek meg kell közelíteniük egymást, hogy az atomok vonzási mezőit elérjék, azaz 0,5 nm-en belül kell lenniük. Az érintkező felületek közötti fizikai kölcsönhatás kialakulásához nélkülözhetetlen előfeltételek a következők (ZAAT 1983):

- a felületek tiszták,
- a felületek nagyobb energiái állapotban vannak (pl. képlékeny alakváltozásnál),
- az érintkezés szoros (ez könnyebben létrejön, ha a lemez folyékony).

b) Metallurgiai kölcsönhatás

A metallurgiai kölcsönhatásnak két lehetséges mechanizmusa van: a diffúzió valamint a lemez és az alapfém közötti kémiai reakció.

A diffúzió főleg a gyorsan dermedő lemezben nagy koncentrációban jelenlevő vakanciák (kristályrács-hibahelyek) révén jön létre. Mivel a diffúzió termikusan aktivált folyamat, a magas érintkezési hőmérséklet növeli ennek a jelenségnek a valószínűségét. A diffúziót kísérletileg KITAHARA (1974) alumíniumra felszórt molibdén és volfrám bevonatok közötti határfelületen vizsgálta. A diffúzió a molibdén ($T_m = 2893$ K) és a volfrám ($T_m = 3668$ K) magas olvadáspontjával magyarázható, aminek eredményeképpen a szilárdulás (dermedés) közben az érintkezési hőmérséklet valószínűleg nagyobb, mint az Al alapfém olvadáspontja ($T_m = 933$ K).

2.2.8. A bevonat növekedése

A termikusan szórt bevonatok tipikus szelvénye több, egymásra felrakott lemezt mutat. A szórópisztoly az alapfém felett bizonyos lineáris sebességgel mozog, ugyanezzel a sebességgel mozog a szórási folt az alapfémen. A lemezek száma egy rétegben, azaz a pisztoly egy áthaladása alatt felrakott anyag mennyisége a lineáris sebességtől függ. A szórási technológia megtervezése a lineáris sebesség meghatározását is magában foglalja. A nagy lineáris sebesség kisebb rétegvastagságot eredményez, de másrészt a pisztoly gyorsabban tér vissza ugyanarra a szórási foltra (szórási pontra), ez pedig csökkenti a környezettel való érintkezést és ennek eredményeképpen kisebb mértékű lesz a szórt munkadarab hőmérsékletváltozása. Hasonló módon, a kis lineáris sebesség és a nagy rétegvastagság a réteg alsó és felső része közötti hőmérsékletkülönbség kialakulásához, ily módon (különösen a nagy hődilatációs tényezőjű anyagoknál, mint pl. a cirkónium) maradó feszültségek létrejöttéhez vezet. Az alapfémre felrakott por tömege térben eloszlik és ez az eloszlás megközelíti a Gauss-féle eloszlást. Ez az eloszlás a szórási távolság növekedésével jobban szétterjed. A pisztoly ezt követő áthaladásainál az egyik áthaladásnak nem szabad a másiktól nagy távolságban lennie, a rétegvastagság ingadozásának elkerülése céljából.

Mivel a rétegvastagság növeli az elsimulási (lelapulási) időt, ezért a hűlési idő is csökken (MOREAU 1991 és mások). Ez mind az egyes lemezek közötti, mind pedig a lemezek és az alapfém közötti kisebb hőátmeneti ellenállásnak köszönhető. A bevonat növekedését gyakran számítógéppel modellezik. Ezen a területen az első kutatásokat ELSING (1985) valamint KNÓTEK (1987) végezte, akikhez az utóbbi időkben CIROLINI (1991) (1994) és mások, pl. FERRARI (1991) is csatlakoztak. A modellezés megkönnyíti annak a kutatását, hogy a speciális folyamatparaméterek milyen hatást gyakorolnak a bevonat mikro-szövetszerkezetére és a bevonatok tulajdonságaira, különösen azokra, amelyek a porozitástól függenek (mechanikai és

termofizikai tulajdonságok). A bevonat hőmérsékletének alakulásával a szórás folyamán szintén foglalkoztak, melyre részletesen nem térek ki: SAMPATH (1993), MADEJSKI (1976a) és PAWLOWSKI (1981), EL-KADDAH (1984) és mások.

2.2.9. Hőfeszültségek kialakulása

A gyors lehűtés okozta feszültségek (edzési feszültségek)

Az alapfémhez (vagy az előzőleg felvitt bevonathoz) ütköző részecske deformálódik, megdermed és az aktuális (tényleges) hőmérsékletre hirtelen hűl le. Ezek a feszültségek a lemezben vannak és mindig húzófeszültségek. A σ_q húzófeszültség értékét a következő egyenlettel lehet meghatározni:

$$\sigma_q = \text{TEC}_1(T_M - T_s)E_1 \quad (2.14)$$

ahol a TEC_1 a hőterjedési együttható, E_1 a rugalmassági modulus, T_m a lemez anyagának olvadáspontja és T_s az alapfém (vagy az előzőleg felszórt bevont) hőmérséklete és az 1 index a lamellára (lemezre) vonatkozik. Egy alumínium-oxid lemeznél a gyors lehűtés okozta feszültségek értéke 100 MPa, amikor a lemez az olvadásponttól 100 K-re hűl le (KURODA 1991).

A gyors lehűtés okozta feszültségeket a felszórt réteg (bevonat) szórás közbeni görbületváltozásának *helyszíni* mérésével lehet meghatározni, amikor ismerjük a bevonat rugalmassági és a Poisson-modulusát (KURODA 1991, KURODA 1992 és mások).

A pisztoly egyszeri áthaladásakor keletkező feszültségek

Ha a pisztoly egyszeri áthaladásával felvitt réteg vastag (pl. a pisztoly alacsony sebessége vagy a por nagy adagolási sebessége miatt) és a bevonat hővezetőképessége kicsi (pl. a cirkónium esetében), akkor a két felület között a hőmérsékletkülönbség nagy lesz, amely feszültség kialakulásához vezet. Ezek a feszültségek repedésekben oldódhatnak fel. (PAWLOWSKI 1983a és mások)

Lehülési feszültségek

Lehülési feszültségek akkor alakulnak ki, amikor a bevonat és az alapfém a rétegfelrakási folyamat után lehül és azért jönnek létre, mert az alapfém valamint a bevonat hőterjedési együtthatója (TEC) helytelenül illeszkedik. (ABRAMOV 1961).

A termikus szórásra jellemző egyszerűsített feszültségmodelleket (azaz, ahol a hirtelen lehűtés okozta feszültségeket is figyelembe veszik) KURODA (1991) valamint TAKEUCHI (1990) és mások mutatták be. Az ő modelljük konstans hőmérsékletet feltételez a szórás után a bevonatban és az alapfémekben, ami nyilvánvalóan nem helytálló. FERRARI (1991) és mások egy sokkal bonyolultabb numerikus modellt dolgoztak ki, amelyben a hőmérsékleti és a tulajdonság gradienseket is figyelembe vették.

2.2.10. A bevonatok mikroszövet szerkezete

Gyors szilárdulás és gyors lehűlés

A gyors szilárdulás és a gyors lehűlés olyan jelenségek, amelyek a részecskének az alapfémhez (vagy az előzőleg felvitt bevonathoz) való ütközése után következnek be. Ezeknek a jelenségeknek az eredményeképpen metastabil fázisok is kialakulhatnak. (MCPHERSON 1982).

A felszört anyag összetételének módosulása

Szórás közben a részecskék a lángban megolvadnak és hőmérsékletük magasabb lehet, mint a forráspontjuk. A több fázisból álló anyagokban a legalacsonyabb olvadáspontú és elgőzölgési pontú fázis gyorsabban párolog el, mint a többi. Ennek az az eredménye, hogy a felszört bevonatban a vegyi összetétel megváltozik. Hasonló módosulás jön létre a lángban végbemenő oxid-redukcióból is. A megfelelő porelőkészítés és a szórás utáni hőkezelés néha lehetővé teszi ennek a problémának a leküzdését. (PAWLOWSKI 1990 és mások). Az APS és VPS eljárással történő szórás közben végbemenő oxidredukció jelenségéről, a ZrO_2 -re és a CeO_2 -re vonatkozólag INGO (1985 és 1991) és mások számoltak be. Hasonlóképpen, HERMANSSON (1985) és mások az APS eljárással felszört króm-oxid por redukcióját figyelték meg. Másrészt, a védőatmoszféra nélkül végzett szórást gyakran kíséri a fémek és ötvözetek oxidációja.

Szórás utáni kezelés és újrakristályosodás

A szórás utáni megfelelő hőmérsékleten végzett hőkezeléssel lehetőség van a metastabil fázisoknak egyensúlyi fázisokká való visszaalakítására. A nyers felszört bevonatban levő γ -alumíniumoxidok 1370 K fok feletti hőmérsékleten végzett hőkezelésnél egyensúlyi α -fázissá kristályosodnak vissza. Ugyanez a visszakristályosodás megy végbe akkor is, ha lézerkezelést alkalmazunk.

A bevonat inhomogenitása

A bevonatok nem homogének, mert a szórásra használt por szemcséi különböző méretűek. Ezen túlmenően, a porrészecskéknek sem a morfológiája, sem a vegyi, sem pedig a fázisösszetétele nem azonos. Például, Cr_2O_3 porok esetén, amely kismértékben alacsonyabb vegyértékű oxidokra redukált részecskéket tartalmaz, olyan bevonat jön létre, amelyben fémkróm zárványok vannak. (PAWLOWSKI 1990 és mások). Ezen túlmenően, a poradagolók nem mindig biztosítanak állandó adagolási sebességet. Hasonlóképpen, azoknál az eljárásoknál, ahol huzalt (AS és FS huzalt) használnak, a huzal csúcán kialakuló részecskék mérete 5–200 μm között változhat (HÖHLE 1983 és mások). Az APS és VPS szórási eljárásnál használt villamos ív a fűvókán belül mozog és ez a láng hőmérsékletének és sebességének időbeli instabilitását okozza (FISHER 1972). A pornak a lángba

történő sugárirányú injektálását a porrészecskék méreteloszlásával jár együtt és emiatt a lángban a részecskék sebessége és hőmérséklete változó (NICOLL 1986).

A termikusan szórt bevonatokban sok hiba a folyamat paraméterek nem optimális kiválasztása miatt, míg mások a technológiai sajátosságok miatt jönnek létre. A bevonatok mikro-szövetszerkezete meghatározza a bevonatok tulajdonságait. Tehát a technológiai tervezőmérnöknek a folyamatparaméterek optimalizálásakor tekintettel kell lennie arra, hogy a bevonattól milyen tulajdonságokat várnak el és a bevonat mikro-szövetszerkezete milyen kapcsolatban van ezzel a tulajdonsággal.

2.3. Szakirodalmi következtetések

A vonatkozó szakirodalmak áttekintése alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg:

- A módszerek és eszközök fejlődése és fejlesztése folyamatos a XX. század eleje óta, a kutatók napjainkban is jelentős energiákat fordítanak a technológiai részletek és elmélet alapjainak tisztázására.
- A termikus szórások kidolgozott eljárásai lehetővé teszik nemcsak a javítást, hanem gyártástechnológiai befejező műveletek tökéletesítést. Ennek eredményeként a szakterület továbbra is a műszaki érdeklődés középpontjában van.
- A legtöbb kutatást az atmoszférikus plazma szórási (APS) eljárással kapcsolatban végezték. Ez a termikus plazma viszonylag jól ismert tulajdonságaiból adódik. Ezenkívül a szórási folyamatok modellezésén dolgozó tudományos laboratóriumok többsége már rendelkezik előzetes tapasztalattal a plazma-spektrószkópia területén. Az ilyen háttér előnyös, mert ismerik a plazmatulajdonságokat, valamint az ezek vizsgálatához szükséges korszerű optikai készülékeket is. BOURDIN (1983) és társai, majd FAUCHAIS (1993) és társai, VAESSEN (1983) és társai, PFENDER (1985) kutatásaikat ilyen laboratóriumokban végezték.
- Atmoszférikus szóró (AS) eljárásnál a részecske-viselkedésére vonatkozó több tanulmány is igazolta a fenti elemzést. Másrészről a részecske AS eljárásnál való viselkedésének tanulmányozása az eljárás javítása céljából fontos, mert ez az eljárás egyszerű, olcsó és ezért nagy érdeklődésre tart számot az iparban.
- Számos modell csupán elméleti marad, mindennemű kísérleti igazolás nélkül. Csak kevés APS-re vonatkozó tanulmányban és csak egy váákumos VPS eljárásra vonatkozó tanulmányban hasonlítják össze a számított adatokat a kísérleti modellekkkel. Ilyenformán a modellek nem teljes mértékben megbízhatóak.
- SIVAKUMAR (1993) és mások előzetes tanulmányaiban, amelyeket HVOF eljárásnál a részecskék viselkedésével kapcsolatban folytattak, a lángtulajdonságok részletes leírása nem található. Emiatt a HVOF pisztolyok lángjainak kutatása is szükségesnek tűnik.

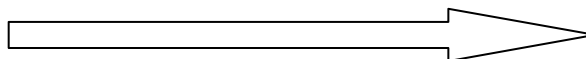
- Nincsen univerzális modell (még az APS-hez sem), amely az összes fontos hatást figyelembe veszi (azaz a Knudsen-hatást, a feltöltődési és az elgőzölgési hatást). Ilyen modell létrehozása elősegíthetné a szórási folyamat automatizálását.
- A porózus bevonatok területéről jóval kevesebb információ áll rendelkezésre. Míg az alapjelenségek (szórási dinamika, hőtranszport folyamatok...stb) tisztázottak, az alkalmazástechnikai szempontok kevésbé jelennek meg a kutatásokban.
- Porózus bevonatok – mint pl. a hideg fémporosítás – esetén nincs irodalmi információ a kenőanyagleadó képesség, felületi adhézió és rétegszilárdság együttes kapcsolatáról.

A szakirodalmi áttekintőben röviden összefoglalt szakterületi mérföldkövek időbeni alakulását a 2.1. táblázatban mutatom be.

2.4. Kutatási célkitűzéseim a szakirodalom tükrében

A kutatási célkitűzéseim a porózus rétegeknek olyan komplex értékelését eredményezik, melyek megteremtik a technológiai paraméterek és a hatékonyabb felhasználás közötti közvetlen kapcsolatot, a porózus rétegek kenőanyag-fellevő-, tároló- és leadó képességének megismerésével. Ezek a tulajdonságok szoros összefüggésben vannak az eljárástól függő porozitás mértékétől, a bevonat anyagának felületi adhéziójától és az eredő kapilláris hatástól. Mindezeket a jellemzőket befolyásolják az üzem közbeni súrlódási hő, illetve a mikrogeometriában rugalmas deformációt eredményező terhelési viszonyok.

2.1. táblázat. Irodalmi eredmények összegzése



	XX. század első fele	XX. század közepe	XX. század vége XXI. század eleje
Fémszórási jelenség felismerése, ipari hasznosításának bevezetése, alkalmazás-technika	X	X	X
Eljárások, készülékek fejlesztése	X	X	X
Hozaganyag formák, változatok, ötvözés és intenzív kutatás		X	X
Részjelenségek és folyamatok analízise (láng, szemcse, alapanyag)		X	X
Energetikai és kinematikai elemzések (hőtranszport, exoterm reakciók, agglomerátumok)		X	X
Áramlástan és technológiai kutatások (gyorsulás, becsapódás, deformációk)		X	X
Rétegszerkezetek mechanikája (szemcsék és beolvadt rétegek, kohézió, diffúzió, adhézió)		X	X
Más technológiákkal való kombináció kutatása, mechanikai vizsgálatok			X
Nagyenergiájú eljárások fejlesztése (vivőközeg, készülék)			X
Porózusan hagyott bevonatok mechanikai- technológiai értékelése			X
Folyamat numerikus modellezése			X
<i>Szórási távolság hatása a bevonatra</i>			Igen hiányos
<i>Porózus bevonatok siklási tulajdonságait javító hatások (kenőanyagátrolás és leadás), mechanikai teherbírás komplex kutatása</i>			Nincs irodalmi adat

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A szórási módszer és indokoltsága

A szakirodalmi áttekintés során részletesen bemutattam a meleg- és hideg fémporaszórási eljárások elvét és a hideg fémporaszórás általános technológiai lépéseit. Ezek megismétlése nélkül, a kutatási rendszer megtervezése kapcsán viszont indokolt a kiválasztott hideg fémporaszórási eljárás gyakorlati megvalósításáról, a piaci technikai lehetőségekről is, átfogó képet adni. Ezt feltétlenül indokoltá teszi az a tény, hogy az általam választott eljárás az egyik legelterjedtebb fémaszórási technika, viszonylag olcsón megvalósítható kisebb ipari üzemekben, gyártó- javító cégeknél.

A láng-porfelszóró készülékek energiaforrása a gázhegesztésnél használt acetilén-oxigén hegesztő berendezés. A készülékek tulajdonképpen különlegesen kiképzett gázégők, amelyeket por adagolására szolgáló szeleppel és tartállyal látták el. A készülék fő rendeltetése, hogy a fémporkeveréket az égő gázláng magjába juttassa. A poroknak a tartályból a gázlángba való továbbításának módja injektoros és külső adagolású.

Vízhatlan műanyagdobozban hozzák forgalomba a fémporokat, ez a tartály a zárófedél eltávolítása után bajonettzáras megoldással közvetlenül a készülék poradagolójához csatlakoztatható, ez a portípusok cseréjét egyszerűsíti és gyorsítja. A fémporokat előállító gyártóművek általános jellegű technológiai módszereket is kidolgoztak, valamint ezek végrehajtásához szükséges berendezéseket is kifejlesztettek. A hazai gyakorlatban a fémporfelszórási módszerek közül a Castolin, az UTP gyártó cégek módszerei a legismertebbek. A módszerek általánosságban közel azonos technológiai paramétereket írnak elő, minimális mértékű eltéréseket a kifejlesztett felszóró berendezések konstrukciós sajátosságainál észlelhetünk.

Laboratóriumi kísérleteimhez a Castolin + Eutectic cég által kifejlesztett RoToTeC 80 típusú berendezést használtam.

A gyakorlat számára háromféle módszert fejlesztettek ki a fémporok felszórására:

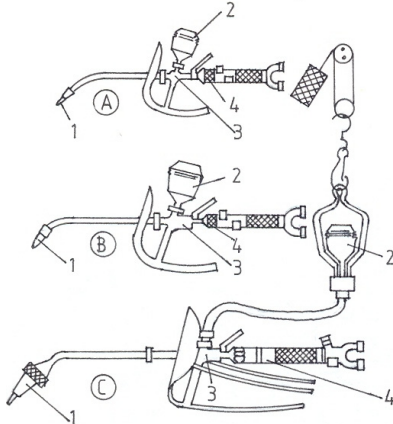
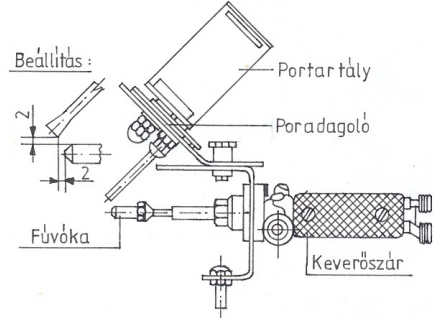
- Eutalloy eljárás,
- Eutalloy RW eljárás,
- RoToTec eljárás.

Az Eutalloy eljárás módozatait, jellemzőit, felhasználási területeit a 3.1. táblázat foglalja össze.

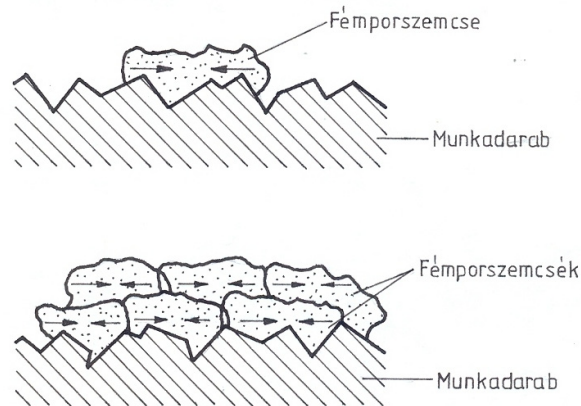
A RoToTec az utóhevítés nélküli, hidegeljáráshoz fejlesztett rendszer, az Eutalloy - és RW - eljárások kibővítését jelenti. Az eljárás alkalmas hőkezelt (edzett, nemesített) vagy hőkezeletlen acélok, rézből (kivétel a tiszta réz) alumínium ötvözetekből készített munkadarabok kopásálló rétegeinek kialakítására. A szóráshoz minden esetben külső adagolású acetilén-oxigén gázkeverékkel működő szórópisztolyt használunk. A gravitációs úton a lángba jutó fémporötvözetek megolvadnak és képlékennyé válnak. A nagy hőmérsékletű szemcsék a kis

hőmérsékletű /maximum 100 °C/ munkadarab felületére csapódva behatolnak a felületi egyenetlenségekben és mikro-hegedéses folyamatot hoznak létre.

3.1. táblázat. Eutalloy eljárás módozatai és jellemzői

Eljárás neve	Jellemzők
<p>Eutalloy eljárás</p>  <p>1=Fúvóka ; 2=Portartály ; 3=Poradagoló ; 4=Keverőszár</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A felületre felvitt eutektikus fémporokat utóhevítéssel megolvasztják, és a fémporötvezetek, valamint az alapanyag között mikrodifúziós kötés jön létre, az alapfém nem olvad meg. - A rétegvastagság 0,1-2 mm között van. - "A" típusú pisztoly: kisteljesítményű, finom élek felrakására /üveg és műanyag formaszerszámok/ - "B" típusú pisztoly: kis és közepes darabok javításához/présszerszámok, tengelyek, fogaskerék, csuszólapok stb./ - "C" típusú pisztoly: nagy darabok javításához, ahol nagy hő és felrakási teljesítmény szükséges /ventillátor lapát, extruder és szállítócsigák stb./, a szórófej ellátható vízhűtéssel és furatban is használható.
<p>Eutalloy RW</p>  <p>Beállítás: 2 2 Fúvóka Portartály Poradagoló Keverőszár</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Eutalloy eljárás nagyteljesítményű változata. - Külső poradagolású, szórási teljesítménye 16 fokozatban szabályozható. - Automatizálható az előtolás. - Nagyobb felületeknél gazdaságos alkalmazni. - Kopott hüvelyek, vezetőgörgők, szivattyú tengelyek javításánál alkalmazzák. - Szórásánál gázdús, beolvasztásnál semleges lángot használ.

A megszilárdulás után az ötvözet részei zsugorodnak és szilárdan hozzákötnek az alapfémhez (KISS 1975). A kötés jellege adhéziós (3.1. ábra).



3.1. ábra. A felszört porszemcsék elhelyezkedése a munkadarabon

A RoToTec eljárás nagy előnye, hogy a javítandó alkatrész hőfoka szórás közben nem emelkedik 200 - 250 °C fölé, így szövetszerkezeti változás, illetve deformáció sem lép fel. Ez különösen nagyobb értékű ötvözött, nagyobb széntartalmú, speciálisan hőkezelt alkatrészek felszórása esetén jelentős. Alkalmazási területe kizárólag a tiszta mechanikai igénybevétellel rendelkező szilárd illesztésű csapágy, siklócsapágy, rugós tömítőgyűrű helyek és csúszófelületek kopásainak méret helyreállítására.

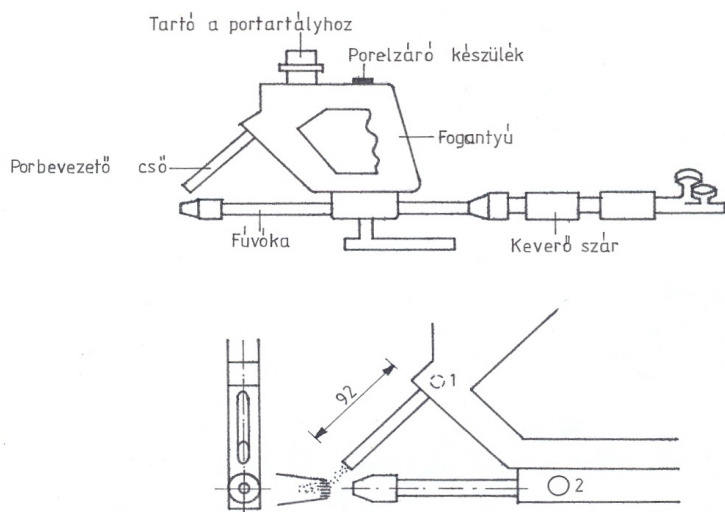
Az eljárás két fázisból áll. Először az alapanyagra felvitt Xuper Ultra Bond alapozópor - kétlépcsős exoterm folyamat segítségével - biztosítja az alapanyag és a felszört réteg közötti jó kötési kapcsolatot. Az alapozásra használt por anyaga nikkkel-aluminid /80 - 95 % Ni + 5 - 15 % Al/. Az alapozó por vastagsága kb. 0,1 mm és erre bármely hideg fémporötvözet tetszés szerint felszórható. A felszört rétegek portípustól függően esztergálással vagy köszörüléssel készre munkálhatók.

A RoToTec eljáráshoz használt pisztolyok a következők:

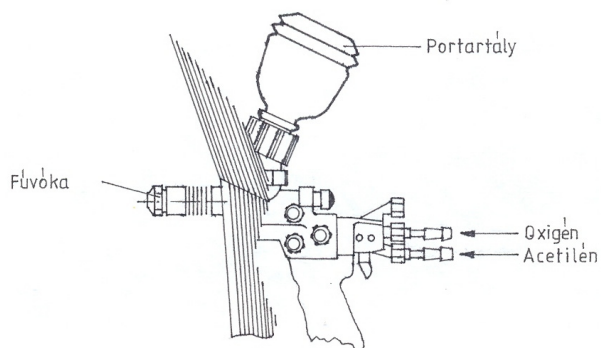
- RoToTeC típus (3.2. ábra) külső adagolású, egyszerű kivitelű kis teljesítményű szórópisztoly. Időszakos üzemben kis darabszámú javításnál használható gazdaságosan. Vékony rétegek felszórására alkalmas, a szórás általánosan javasolt távolsága 150-200 mm.

- RoToTeC 80 típus: (3.3. ábra) középkategóriájú injektoros szórópisztoly. A pisztoly helyes működéséhez szükséges oxigén (4 bar) és acetilén gáz (0,7 bar) nyomás beállítását gyorscsatlakozású beállító műszer segíti. A szórás távolsága 150-200 mm. Toldat segítségével belső palástfelületek szórására is alkalmas 120 mm átmérő felett.

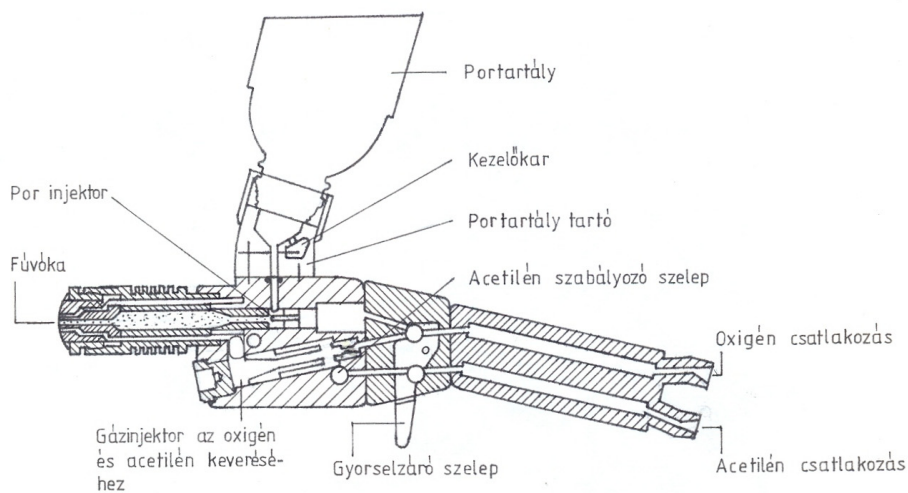
- RoToLoy típus (3.4. ábra) nagyteljesítményű injektoros szórópisztoly. A pisztolyon szabályozható a pormennyiség a porszállító gáz és az oxigén-acetilén gáz aránya. A pisztoly kiegészítő berendezések alkalmazásával felhasználható belső palástfelületek szórására is 120 mm átmérő felett. A felhordási teljesítmény 5-7 kg/h.



3.2. ábra. RoToTeC pisztoly



3.3. ábra. RoToTeC pisztoly



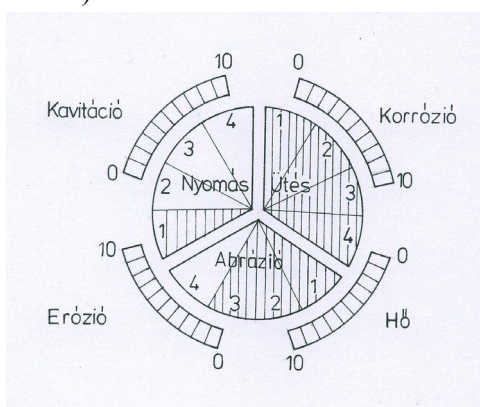
3.4. ábra. RoToLoy pisztoly

5.2. A szórandó porok

Meghatározó a porok összetétele. Általában a fémporok főbb összetevői: Ni, Cr, C, B, Si, Fe, Co, W és ezek karbidjai. A fémportvözeteket különleges technológiákkal gyártják. Az adott portípushoz szükséges fémeket vákuumkemencében összeolvasztják, majd az így nyert folyékony fémeket nagy nyomással finom fűvókán keresztül a berendezés alsó részébe permetezik. A fémötvözet finom részecskék formájában megdermed, és azok a berendezés aljában levő vízfürdőbe hullanak. Az így kapott ún. fémiszapot szárítják, majd keverő berendezésbe vezetik. Ezután a szemcseméreteket osztályozzák. A gömbszemcsék átmérőit mikroszkópi mérések alapján minden típusnál kisebbek, mint 150 µm, általában 10 - 80 µm mérettartományúra osztályozottak. Ez a szórási művelet alatt igen finom adagolást és rétegszabályozást tesz lehetővé.

A „Castolin +Eutectic” porrendszer és javasolt alkalmazásai

A Castolin cég a hozaganyag megválasztását egy igénybevételi diagrammal és az alkalmazási területek rövid ismertetésével segíti. Az igénybevételeket, melyekkel szemben ellenáll, a DurOptik diagram szemlélteti. Minél nagyobb mértékben fedett a kérdéses igénybevételre vonatkozó diagramrész, annál jobban ellenáll a bevont felület ennek az aktuális igénybevételnek (pl. 3.5. ábra) (CASTOLIN- EUTECTIC 1981).

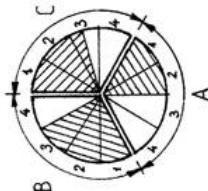
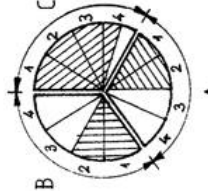
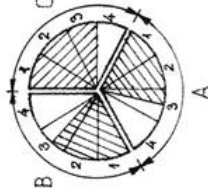


Belső szegmens	Külső szegmens	Minősítés
1	1-3	Közepes
1-2	1-5	Jó
1-3	1-7	Nagyon jó
1-4	1-10	Kiváló

3.5. ábra. DurOptik diagram

Az általam használt RoToTec eljáráshoz használható fémporokat a jellemzőik alapján a 3.2. táblázatban foglaltam össze.

3.2. táblázat. A használt porok jellemzői

Megnevezés	DurOptik diagram	Ötvöző elemek	Keménység	Láng beállítás	Alkalmazási terület
Lubrotec 19985		C, Cr, Ni, Mo, Fe	130 – 160 HB	Grázdús	Csapághelyekhez, tengelyek illesztett felületeinek javítására, sturloásnak kitett alkalmazási helyekre.
Durotec 19910		C, Cr, Si B, Ni,	300 – 360 HB	Semleges	Igen jó siklási tulajdonságn. Hidraulikus dugattyúhoz, rugós tömítőgyűrű helyekhez, sikló és golyócsapágy helyek javításához.
Hardtec 19400		C, Cr, Ni, Fe,	≈ 350 HB	Semleges	Pontszerű igénybevételekre nem alkalmas. Tengelyek, hidraulikus elemek javításához ajánlott. Jó siklási tulajdonságok, terhelésre nem érzékeny.

A kísérleteimhez választott Castolin- Eutectic porok és alapfém

A kutatási célkitűzéseimben megfogalmazottak szerint, különös figyelmet fordítok a szórt rétegek siklási tulajdonságaira, mely összefüggésben van a kenőanyagátároló képességet befolyásoló porozitással, mely kihat természetesen a rétegek szilárdsági jellemezőire is. Mindezt vizsgálom a javasolt szórási távolságok, valamint attól plusz/mínusz értékben jelentősen eltérő szórási távolságok esetén is. E szempontok figyelembe vételével olyan porokat kellett választanom, melyek eleve siklási helyek javítására szolgálnak, de nincs információ a rétegek kenőanyagátároló és leadó képességéről, az ehhez tartozó szilárdsági jellemzőkről. Végképp ismeretlen, hogy mi történik a kenéssel és szilárdsággal, ha a javasolt technológiai szórási távolságát megváltoztatjuk. További szempont volt a bevezetőben ismertetettek szerint, hogy legyen olyan porötvözet is a minták között, mely a növelt szívósság és növelt keménység elvárásainak is megfelel. Mindezek alapján, a 3.2. táblázattal összhangban, a gyártó cég ajánlásait is figyelembe véve, az alábbi porokat választottam kísérleteimhez.

- HardTec 19400
- LubroTec 19985
- DuroTec 19910

A korábban ismertetett általános technológiai utasításoknak, valamint a porokhoz tartozó gyártói utasításoknak megfelelően végeztem a felületi bevonatok létrehozását (előkészítés, tisztítás, bevonat felszórása, utómunkálás) többféle próbatesten, melyek lehetővé tették a további technológiai próbákat (szilárdsági- kopási- adhéziós- és kenőanyagleadási próbák). A szórásokat a kutatási célkitűzésekben megfogalmazottak szerint, eltérő szórási távolságokkal is elvégeztem.

Alapanyagok – korábban több ipari problémát elemezve – 16MnCr5 jelű, betétben edzhető acélt választottam. Ezt az alapanyagot gyakran használják mezőgazdasági gépekben is alkalmazott bordás vagy fogazott tengelyek esetén. E tengelyeken szinte kivétel nélkül találhatóak sikló felületek is, főleg ott, ahol tömítésekkel és siklócsapágyakkal kapcsolódnak. A megkopott sikló felületek – az edzett rész leköszörülése után – felszórhatók, jobb siklási- és kopásállósági tulajdonságokat biztosító porokkal. Az alapanyagként használt 16MnCr5 acél vegyi összetételét a 3.3. táblázat tartalmazza, melyet spektroszkópikus vizsgálattal határoztam meg, és a kapott eredményeket összehasonlítottam a szabványban előírt minőségekkel.

3.3. táblázat. 16MnCr5 minőségű acél vegyi összetétele.

	Vegyi összetétel %							
Anyag	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
16MnCr5	0,17	0,21	1,1	0,96	0,026	0,026	0,15	0,12

3.3. A felszört rétegek értékelése

A felszört rétegek vizsgálatára szabvány nem áll rendelkezésre, de más, a gyakorlatban kidolgozott módszer az irodalmakban fellelhető. A termikus szórással felvitt rétegekkel szembeni általános követelmények:

- az alapanyaggal azonos, vagy nagyobb keménység,
- kellő kopásállóság,
- kis súrlódási tényező,
- csekély, vagy semmi repedési hajlam,
- hőállóság az üzemi hőmérsékleten,
- jó hővezető-képesség és a hőtágulás jó illeszkedése az alapanyag azonos tulajdonságaihoz,
- korrózióállóság a korróziót létrehozó közeggel szemben.

A vizsgálati módszereket az alábbi szempontok szerint választják ki (NOVAK 1973):

- a gyakorlatban előforduló elhasználódási körülmények reprodukálása,
- a meglévő vizsgálóberendezések alkalmazása,
- a vizsgálati eredmények összehasonlíthatósága,
- a vizsgálathoz szükséges próbatestek előállítás a meglévő berendezésekkel,
- az egyes vizsgálati módszerekhez azonos próbaalakok, próbaméreték rögzítése annak érdekében, hogy egy próbatest több vizsgáló eljáráshoz legyen használható.

A termikus szórással felvitt rétegek vizsgálatát két területre lehet csoportosítani.

A vizsgálati módszerek csoportosítása

Porötvözetek vizsgálata:

A porötvözetek vizsgálati eredményei részben a gyári tájékoztatóban található. Előfordul, hogy ezek nem állnak rendelkezésre, ezért az azonosítás érdekében célszerű a jellemző alapanyag-vizsgálatokat elvégezni.

Vizsgálat módszerei:

- sűrűség,
- kémiai összetétel,
- olvadási mechanizmus,
- szövetszerkezeti vizsgálat.

Alkalmazástechnológiai vizsgálatok:

A vizsgálat kiterjed a porötvözetek jellemző tulajdonságainak, a felszórás közbeni változásainak értékelésére, valamint az alapanyag és a felszört réteg kapcsolatára.

Jellemzően mért tulajdonságok:

- tömörség,
- keménység,
- repedés érzékenység,
- fémorréteg fizikai kötésének vizsgálata:

- szemrevételezéssel,
- röntgennel,
- ultrahanggal,
- izotóppal,
- kötésszilárdság,
- ütésállóság,
- kopásállóság,
- hőtágulási együttható,
- éltartósság,
- súrlódási együttható,
- korrózióval szembeni ellenállóképesség,
- átmeneti zóna szövetszerkezetének vizsgálata.

Az előbb felsoroltak közül rendszeres üzemi vizsgálattal ellenőrizhetők a felszört réteg keménysége, repedése, tömörsége. A további mérések laboratóriumi feltételeket igényelnek, de a komplex értékeléshez hozzátartozik az üzemi vizsgálat is.

3.4. Kísérletterv

A laboratóriumi kísérleteimet az alábbi fő lépések szerint végeztem:

1. Próbatetek gyártása 16MnCr5 jelű anyagból.
2. A termikus szórásra alkalmazott fémporötövetek tulajdonságainak vizsgálata.
3. A fémporötövetekkel felszört próbatetekről csiszolatok készítése. Szövetszerkezeti, porozitási és keménység-eloszlási vizsgálatok.
4. A felhasznált fémporötövetek kötésszilárdságának vizsgálata, azok összehasonlítása.
5. A felszört réteg felületi energiájának mérése
6. A felszört réteg kenőanyag felvevő- és leadó képességének mérése
7. A felület és a tömbi szört anyag kémiai összetételének vizsgálata
8. A kapott eredmények komplex értékelése.

Próbatetek gyártása

Anyag és előkészítés:

A kísérleteim elvégzéséhez a szükséges méretű és darabszámú próbateteket 16MnCr5 jelű anyagból forgácsolással elkészítettem. A palástfelületek érdesítését menetkialakítással és köszörüléssel végeztem el. Az alábbiakban ismertetett szerszámokkal és technológiai adatokkal.

Géptípus: E400-as esztergagép

Szerszám: egyenes hegyes esztergakés /MSZ 1905/ kemény fémlapka minősége K10 /ISO szerint/, késszár keresztmetszete 20 x 20 mm, R = 0,2 mm, $\kappa=60^\circ$, $\tau=60^\circ$, késnyúlás 80 mm,

Technológiai adatok: $v = 8$ m/min., menetemelkedés 0,7 mm, menet mélysége: 0,35mm, kés befogása 1 mm-rel a központ alá, élék letörése 45°-os szögben.

A létrehozott felületi érdesség nagysága a megmunkált anyag tulajdonságától, a forgácsolási sebességtől, a szerszám állapotától és az MKGS rendszer rezgésétől függ. A próbatestek érdesítését kézi köszörüléssel is elvégezhető. Az általam alkalmazott kézi köszörűkorong: SUPER FLEX AS 30S BF27 /DRONCO/, korong mérete: 115 x 2,5 mm, korong kerületi sebessége: 80 m/s.

Szórás:

A vizsgálandó réteget RoToTec 80 típusú injektoros lángporfelszóró pisztollyal szórtam fel. Szórás előtt a zsírtalanított felületet enyhén oxigén-dús lánngal előmelegítettem 50 - 100°C-ra, amellyel a felületi egyenetlenségekben maradt olaj vagy zsír maradékot, s a felületre lecsapodott nedvességtartalmat eltávolítottam a kedvező kötés létrehozása érdekében. Egy-egy réteg felszórása után visszahűtöttem fűjt levegővel a próbatesteket, valamint a felületre tapadt szemcséket tiszta drótkéfével eltávolítottam. A hideg fémporaszórás technológiai jellemzői: oxigén nyomása 4,0 bar, acetilén nyomása: 0,7 bar, szórási távolság: 180 mm/110 mm/250 mm, kerületi sebesség: 20 m/min., lángfajta: semleges, szórási szög: 0°

A felszórt fémporötvezetek és rétegvastagságok:

- XUPER ULTRA BOND 51000 alapozó por 0,2 mm rétegvastagságban
- HardTec 19400, LubroTec 19985, DuroTec 19910 típusú porötvezetek felszórása.

A szórást a felületekre merőlegesen végeztem el a 45°-os letöréseknél is. Kézi előtolást alkalmaztam felszórásnál. A szórásnál a felvitt rétegek vastagsága a különböző vizsgálati módszereknek megfelelően:

- normál irányú kötőszilárdság vizsgálatánál 1,5 mm,
- nyíró kötőszilárdság vizsgálatánál 2 mm,
- adhéziós és kenőanyag felvevő vizsgálatoknál 2 mm,

A próbatestek hűtését szabad levegőn végeztem el.

A felszórt rétegek megmunkálása:

A próbatestek felszórt rétegeinek készre munkálását köszörűgépen csúcsok között végeztem el. Géptípus: KU 250 egyetemes körköszörűgép.

Szerszám típusa: TYROLIT 80A 54 I 9A V 350 x 63 x 127 osztrák köszörűszerszám, amelyet a Castolin cég is javasol.

A következő magyar gyártmányú korongot is felhasználtam: sima köszörűkorong I.350 x 63 x 127 KB 40 M 5 Ke, amelynek tulajdonságai azonosak az osztrák köszörűkorong tulajdonságaival.

A 3.4. táblázat összefoglalja az egyes bevonatokhoz tartozó technológiai paramétereket. A felszórt rétegek köszörüléssel elért átlagos felületi érdessége: $R_a = 1,6 - 0,8 \mu\text{m}$.

3.4. táblázat. Legfontosabb forgácsolási jellemzők.

Porötövet neve	Köszörűkorong Kerületi sebesség, m/s	Mdb. kerületi sebesség, m/min	Előtolás, mm/ford	Fogásmélység, mm
HardTec 19400	30	25	0,35	0,02
LubroTec 19985	20	25	0,35	0,02
DuroTec 19910	30	25	0,35	0,02

3.5. A fémporötvetek sűrűsége és szemcseszerkezete

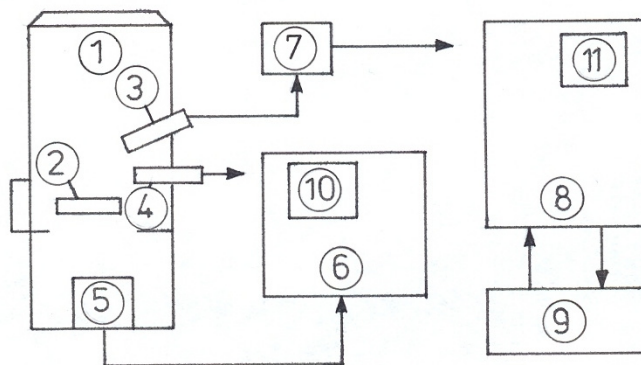
A porötvetek sűrűségét g/cm^3 -ben határozzuk meg. Enyhe rázással tömörített, 1 cm^3 fémporötvet tömegének mérésénél - a pontosabb eredmény érdekében - tíz mérés átlagát vettem alapul. Pontosabb érték piknométerrel való méréssel kapható. Ennek alapja Archimédesz törvénye. A piknométeres mérést erősen befolyásolja, hogy a mérendő anyagot a víz nedvesíti-e, ugyanis a fémporötvet felületéhez tapadó levegőt nem lehet teljesen eltávolítani, s ez hibát okozhat. Amikor a piknométert a fémporötvettel és a vízzel megtöltöttem, a levegő eltávolítása végett a piknométert vízszög szivattyúval kötöttem össze és függőleges helyzetben addig rázogattam, míg a buborék távozása teljesen megszűnt. A mért értékekből számításal meghatároztam a sűrűséget. A pontosabb értékeket legalább három mérés átlagaként kapjuk az előbb említett hibák miatt.

A fémporötvetek szemcseszerkezetét, a szemcsék méreteit a gyártó cégek többnyire megadják. A szemcsék mérete, nagysága meghatározza az alkalmazható felszórás módszereket és az alkalmazott berendezéseket. Ellenőrző vizsgálattal a különböző szemcseméretet százalékos eloszlását 1 dm^3 porötvetre vonatkoztatva laboratóriumi rázószita sorozattal határoztam meg. A szemcseméret eloszlását mérőskálás beosztású tárgylemezre szórt fémporról mikroszkóp alatt készített fényképfelvételeken ellenőriztem.

3.6. A fémporötvetek kémiai összetétele

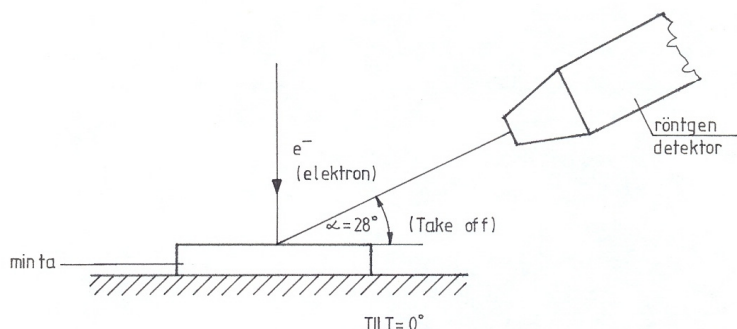
A gyártó cégek csak a por ötvözőit adják meg, azok %-os összetételét nem. Az összetételek %-os meghatározására a nedves analízist, a spektrum analízist, valamint atomabszorpciós spektrométeres vizsgálatot lehet alkalmazni. A felszórt réteg összetételének megállapítására felszórás után több technikai módszer is létezik, pl. RAMAN spektroszkópia. Méréseim során egyszerűbb hozzáférhetőség miatt egy másik lehetőséget használtam, pásztázó (SEM) elektron mikroszkópot (JEOL JSM 35 C típus/ EDAX) energiadiszipatív röntgen analízátor feltétellel. (3.6.ábra). Az EDAX SiLi félvezető detektort tartalmaz. Az EDAX 711 típusú analízátorhoz van kapcsolva az értékelő számítógép. A minta értékeléséhez az EDAX laboratórium FDEM jelű programját használtam ZAF korrekcióval, amit ez a program tartalmaz, így meghatároztam a felszórt fémporötvetek összetételét. A vizsgálat során a gyorsító feszültség 25 kV , a röntgen detektor dőlési szöge (Take

off) 28° volt (3.7. ábra). A minta döntés nélkül helyezkedett el az elektronmikroszkóp oszlopában (TILT= 0°).



3.6. ábra. A mérőberendezés blokkvázlata

1. Mikroszkóp oszlop; 2. minta; 3. rtg-detektor; 4. másodlagos elektron detektor; 5. áteresztett elektron detektor; 6. mikroszkóp elektronikus rendszere; 7. rtg-jel erősítő; 8. rtg-analizátor; 9. elektronikus számítógép; 10. katódsugárcső a morfológiai kép megjelenítéséhez; 11. katódsugárcső a rtg-spektrum megjelenítéséhez.

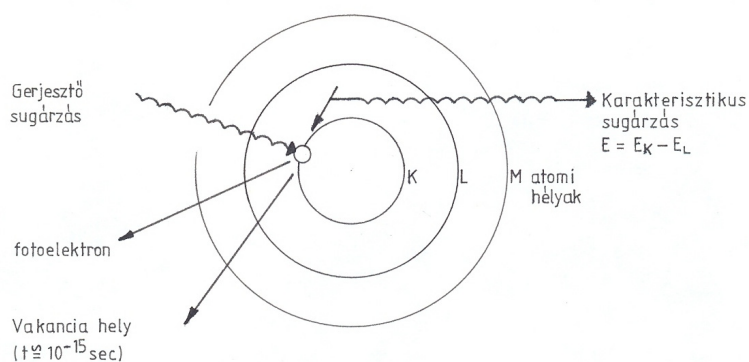


3.7. ábra. A röntgen detektor elhelyezése

A pásztázó /SEM/ elektronmikroszkópban a minta leképezésére szolgáló elektron nyaláb a mintából röntgen sugárzást (rtg) is kivált. A keletkező rtg-spektrum a gerjesztés körülményeitől (gyorsítófeszültség, geometriai viszonyok), valamint a mintát alkotó kémiai elemek mennyiségétől és minőségétől függ. Ha tehát az elektronmikroszkóphoz egy olyan rtg analizátort kapcsolunk, amely alkalmas a keletkező rtg sugárzás detektálására és a keletkező rtg - spektrum tárolására, olyan berendezéshez jutunk, amely amellet, hogy láthatóvá teszi a vizsgált minta strukturáját, a fémporötvözet ötvözőinek összetételéről is információt szolgáltat. A detektálendő rtg-spektrum folytonos háttérsugárzás és diszkrét energiájú rtg-vonalak szuperpozíciójából áll. A sugárzás keletkezésének fizikai alapja, hogy a folytonos háttérsugárzás, vagy fékezési sugárzás a bombázó elektronok és a mintát alkotó atomok elektrosztatikus kölcsönhatásának a következménye. A diszkrét rtg-

vonalak a mintát alkotó kémiai elemek minőségére jellemző karakterisztikus rgt sugarak. Ezek keletkezésének oka: az atomok zárt elektronhéjainak ionizációja. A zárt héjakon keletkező "lyukak" magasabb energiájú héjakról származó elektronokkal töltődnek be, igen rövid idő alatt ($< 10^{-15}$ s). Ezzel egyidejűleg a héjak energiakülönbségével azonos energiájú elektromágneses sugárzás, rgt foton emittálódik. A detektálható rgt vonalat annak megfelelően szokás elnevezni, hogy az ionizáció melyik héját érintette. Ennek alapján különböztetjük meg az egyes kémiai elemek K, L, illetve M vonalait (3.8. ábra). Az elektronmikroszkóp és a rgt-analizátor funkcionális összekapcsolásának szinte egyedülálló előnye az, hogy igen kicsiny, kedvező esetben $1\mu\text{m}^3$ -nél kisebb térfogatú minta elemek kémiai összetétele határozható meg segítségével úgy, hogy ezzel párhuzamosan ez a szerkezeti elem még látható is.

Adott elemnél a karakterisztikus vonalak energiája a K-tól az L, M stb. vonalak felé haladva csökken. Ugyanazon spektrumvonal energiája pedig a rendszám növekedésével nő. E mérő rendszer további részleteit már korábban publikáltam, a továbbiakban az eredményeket ismertetem.



3.8. ábra. A sugárkeltés folyamata

3.7. A felszört réteg tömörség (porozitás) és repedés vizsgálata

A felszört réteg tömörségére két jellemző tulajdonságot szoktak megadni. Egyik a réteg mechanikai teherviselő képességét jellemzi, míg a másik a szört réteg porozitását fejezi ki.

A teherviselő képesség ellenőrzésére a gyakorlatban elterjedt gyors módszer a Vickers vagy mikroVickers-féle keménységmérés annak ellenére, hogy porózus rétegek keménységmérése csak tájékoztató jellegű lehet. Méréskor a felszört felületen és a réteg metszetében, különböző pontokon végeztem méréseket. A gyártói ajánlások szerint a tömörség (porozitás) megfelelő, ha a mérések 90 %-a az adott ötvözet típusra előirt keménység alsó határértékénél magasabb keménységet jelez. Ezek a határok jelenleg, a mért értékekre vonatkozóan:

- DuroTec 19910 mikrokeménység: $340 \mu\text{HV}_{100}$
- HardTec 19400 mikrokeménység: $332 \mu\text{HV}_{100}$

- LubroTec 19985 mikrokeménység: 190 μHV_{100}

Az alapanyagra felszört és megmunkált fémporréteg porozitás vizsgálatát el lehet végezni szemrevételezéssel/nagyítóval (hátrány: szubjektív eredmények), penetráló folyadékkal (nehézség kvantitatív mérés), vagy mikroszkóp alatt is (főleg kétdimenziós kép-értékelés). Kutatásom során digitális képfeldolgozási technikával megvizsgáltam a porozitás mértékét csiszolatokról készült mikroszkópos felvételek alapján. A méréseket három csiszolati mélységben is megismételtem, hogy a számszerű becslésénél közelíthessem a 3D-s értékelést a porozitásra.

Repedésvizsgálatra alkalmazható a penetráló folyadékos eljárás, amely alkalmas a felületig terjedő folytonossági hiányok kimutatására. A felületre felvitt nagy behatoló képességű anyag a jelenlévő repedésekbe behatol. A porozitás miatt a módszer nem adott biztos, értékelhető eredményt, így helyette vizuális, mikroszkópos vizsgálatot kellett végezni. 100-szoros nagyítás esetén tapasztalt eredményeket az „Eredmények” fejezetben foglalom össze.

3.8. Szövetszerkezeti vizsgálat

A fémporötvözetek megolvasztott, majd szobahőmérsékleten lehűtött állapotáról készített csiszolat szövetszerkezeti vizsgálata megmutatja a különböző fémporötvözetek jellegzetes szövetszerkezeteit.

A felszört réteg szövetszerkezetének vizsgálata kétségtelenül bizonyítja, hogy a felszört réteg és az alapanyag között a kapcsolat adhéziós, mivel felszórás közben az alapanyag hőmérséklete 200 - 250°C-ot éri csak el, így a kohéziós kapcsolat kizárt. Az átmeneti zóna szövetszerkezetében változás (szemcsedurvulás) nem lép fel. A fémporszemcsék a röptartam alatt oxidálódnak, és a szövetszerkezeteken látható módon egyes szemcsék oxidrétege megszakad és két, vagy több fémes mag összefüggő egészet alkot. De nem mindegyik szemcse viselkedik így. Az egyes, szabálytalanul kialakult megmerevedett és oxidhártyával körülvett szemcsék lehetőséget nyújtanak a szört rétegben elhelyezkedő gázzárványok (porozitás) mennyiségének ellenőrzésére is.

A mikroszkópi felvételekhez az előkészített csiszolatokat 5 %-os alkoholos HN_3 -ban marattam meg és felvételeket készítettem róluk, amiket értékeltem a továbbiakban.

3.9. A keménység változása a felszört réteg metszetében és az átmeneti zónában

A termikus szórással felvitt rétegek szilárdsági tulajdonságai, a keménység is igen sok tényezőtől függenek. Ilyenek: az alkalmazott szórás mód, alkalmazott pisztolyfajta, szemcséfinomság, szórás távolság, oxigén és acetilén gáz nyomása és az alkalmazott lángfajta (MOLNÁR 2003). Általában a szórás távolság növelésével a keménység csökken, mert a szemcsék a hosszabb röptáv miatt kisebb mozgási energiával ütköznek a felületre, valamint a szemcsék a hosszabb röptartam következtében már megdermedve érik el a felületet, a képlékeny deformációra képtelenek, így a tömörséget és a keménységet is rontják. A szórás távolság

változása hatással van a szemcsék eredő mozgásjellemzőire, mely megnyilvánulhat a rétegvastagság változása mentén bekövetkező keménység változással. A jelenség ellenőrzésére a szórt rétegek metszetében felvett keménységi trendeket értékeltem.

3.10. Kötésszilárdsági vizsgálatok

A különböző kötések (adhéziós, kohéziós, diffúziós) aránya függ a szemcsék hőmérsékletétől, mozgásenergiájától, oxidtartalmától az előmelegítés hőmérsékletétől és az utóhevítéstől. Az eddigi vizsgálatok és a szakirodalom szerint is az utóhevítés nélküli termikus szórások kötésszilárdsága kisebb az utóhevítéssel készült termikus szórások értékénél, mivel az utóbbiak esetében jelentős diffúziós kötés is jelen van. A viszonylag alacsony kötésszilárdság nemcsak abból adódik, hogy az adhéziós kötés jellemző az utóhevítés nélküli termikus szórásra, hanem abból is, hogy az alaptest és szórt réteg hőtágulási együtthatóján kívül a hőmérsékletcsökkenés is különböző, így jelentős maradó feszültségek ébrednek (MOLNÁR 2002). A feszültségnek azt az összetevőjét tudjuk mérni, amely külső terhelésből adódik. Arra kell törekedni a méréskor, hogy normál, vagy csúsztató jellegű feszültséget szuperponáljunk a felülethatáron levő maradó feszültségekhez mindaddig, amíg a leválás be nem következik. A kötésszilárdságot befolyásolja a mechanikai inhomogenitásból adódó látszólagos szilárdságváltozás is. Ennek oka, hogy különböző alakváltozó-képességű rétegek esetén, a határfelületen több tengelyű feszültségállapot alakul ki. A kötésszilárdság mérésekor törekedni kell, hogy az üzemi viszonyokat közelítsük meg.

A kötésszilárdság mérésének két fontos jelentősége van:

- össze lehet hasonlítani az új szórási módszereket a gyakorlatban már bevált módszerekkel,
- a felületi előkészítés helyes megválasztásának fejlesztése.

A kötésszilárdság értéke függ az alaptesttől, a szórt anyagtól, a termikus szórás-technológiájától és a vizsgálati körülményektől (FARKAS 1984).

Befolyásoló tényezők:

- alaptest felületi minősége (felületi tisztasága, érdessége előkészítési módjai)
- alaptest anyagminősége (mechanikai tulajdonságok, kémiai összetétel, hőkezeltségi állapot)
- alaptest fizikai jellemzői (olvadáspont, hővezetési tényező hőtágulási együttható, fajlagos hőkapacitás, fajlagos tömeg Young-féle rugalmassági modulus)
- alaptest geometriai jellemzői (alak, méret) a szórt anyag jellege (fém és fémötvözet, álötvözet, vegyület)
- a szórt anyag anyagminősége (mechanikai tulajdonság, kémiai összetétel)
- a szórt anyag kivitele (por, huzal, pálcá)
- a szórt anyag fizikai jellemzői (olvadáspont, hővezetési tényező, hőtágulási együttható, fajlagos hőkapacitás, fajlagos tömeg, Young-féle rugalmassági modulus)

- a termikus szórás eljárásai
- termikus szórás jellemzői (hőforrás intenzitása, szórt szemcsék sebessége, szórás haladási sebessége, hozaganyag adagolás sebessége, szórás távolsága, szórás szöge)
- vizsgálati körülmények állapot tényezői (feszültségállapot hőmérséklet, igénybevétel sebessége)
- próbatest (kialakítása, geometriai mérete, hőkezeltégi állapot)
- vizsgáló berendezés (pontossága, merevsége, működési elve)
- igénybevétel (normál, csúsztató jelleg)
- terhelés jellege (egyszeres, ismétlődő).

3.10.1. Normál irányú kötőszilárdság meghatározása

A normál irány a külső terhelésre vonatkozik. Az ide vonatkozó szakirodalmakban ismertetett módszerek kivétel nélkül a külső terhelésből adódó, leválást okozó feszültséget tekintik kötőszilárdságnak (FARKAS 1984, OLÁH 1977).

$$R_{\perp} = \frac{F_{\perp}}{A}, \text{ ahol}$$

R_{\perp} = normál irányú kötőszilárdság (MPa)

F_{\perp} = a szórt felületre merőlegesen ható erő (N)

A = a leszakítandó felület (mm^2).

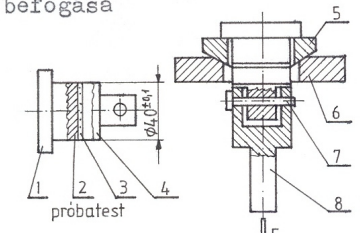
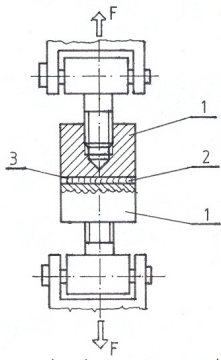
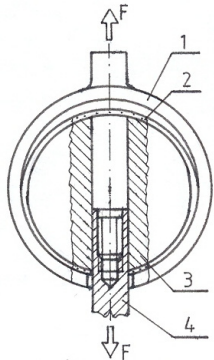
A normál irányú kötőszilárdság meghatározásának módjait a 3.5. táblázat tartalmazza. Az ismertetett módszerekben az alkalmazott próbatestek különböző méretűek és kialakításúak, de jól összehasonlítható eredményt nem adnak. Csak olyan eredmények hasonlíthatók össze, amelyek azonos körülmények között készültek. A próbatest kiválasztásakor figyelembe kell venni:

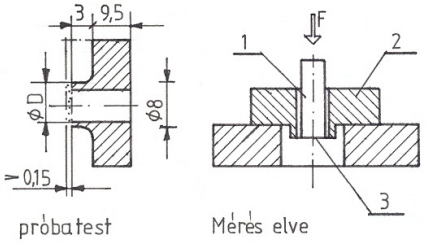
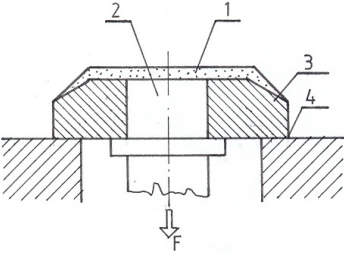
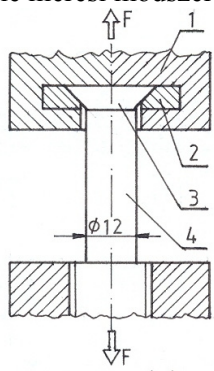
- a hőtágulásból adódó zsugorodás kis mértékben befolyásolja a mért értéket,
- hengeres alakú próbatestek felszórása és megmunkálása a legegyszerűbb,
- kisméretű próbatestek anyagfelhasználása kedvezőbb,
- a fémporréteg szakadása és elnyíródása a határfelületen következzen be.

A 3.5. táblázatban felsorolt módszerek közül a NÁDASI (1971) által javasolt módszert választottam a vizsgálataim elvégzéséhez, mivel a kiválasztáshoz a következő szempontokat vettem figyelembe:

- a próbatest kialakítása egyszerű,
- nincs szükség olyan ragasztó anyagra, amelynek normál irányú kötőszilárdsága nagyobb a vizsgált rétegnél,
- egyenletes réteg alakítható ki a fémporrétegből,
- terhelés hatására körgyűrű alakú határfelületen válik le a szórt réteg.

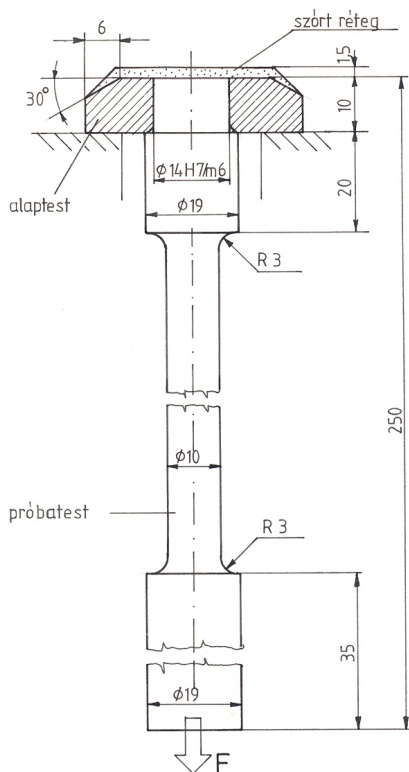
3.5. táblázat. Normál irányú kötőszilárdság meghatározásának lehetőségei.

Próbatest kialakítása	Jellemzők
<p>DIN 50160 próbatest és befogása</p>  <p>1=húzólap; 2=ragasztó réteg; 3=szórt réteg; 4=próbatfej; 5=önbedítő alátét; 6=támasztó lap; 7=csapszeg; 8=befogószar</p> <p>Mérés elve</p>	<ul style="list-style-type: none"> - alapelveik azonosak, - eltérés csak a leszakítandó méretben és befogásban van, - leszakítandó rétegnek egyenletesnek kell lenni, - réteg minimális vastagsága 0,04 mm, hogy a ragasztó ne hatoljon át a porózus rétegen
<p>ASTM 210 /USA/ mérési módszere</p>  <p>1=próbatess; 2=szórt réteg; 3=ragasztó réteg</p>	<ul style="list-style-type: none"> - olyan ragasztóanyag kell, amelynek a normál irányú kötőszilárdsága nagyobb, mint a vizsgált rétegé, - az utóhevítés nélküli termikus szórások vizsgálatára alkalmazható.
 <p>1=kengyel; 2=szórt réteg; 3=próbatess; 4=húzó szar</p>	<ul style="list-style-type: none"> - előnye, hogy a vizsgált réteg felületét a gyakorlatban alkalmazott módszerrel kell előkészíteni, - húzóerő kisebb, mint a szórt réteg elnyírásához szükséges erő, ezt a feltételt a próbatest felületének és a szórt réteg vastagságának megfelelő arányával lehet elérni.

<p>Deloro Stellite cég mérési módszere</p>  <p>1=nyomó csap; 2=próbatest; 3=szört réteg</p>	<ul style="list-style-type: none"> - furatok furása a szört rétegig és ebbe a furatba helyezett nyomó csappal lehet átvinni a terhelést,
<p>Nádasi-féle mérési módszer</p>  <p>1=szört réteg; 2=próbatest; 3=alaptest 4=támasztó gyűrű</p>	<ul style="list-style-type: none"> - a terhelt felület és a rétegvastagság helyes megválasztásával, terhelés hatására körgyűrű alakú határfelületen válik le a szört réteg.
<p>Molnár-féle mérési módszer</p>  <p>1=befogófej; 2=támasztó gyűrű; 3=szört réteg; 4=próbatest</p>	<ul style="list-style-type: none"> - réteg felszórása a próbatest külső felületére, - a terhelt felület és a rétegvastagság helyes megválasztásával a réteg leválása körgyűrű alakban történik.

A vizsgálathoz a 3.9. ábrán látható próbatestet alakítottam ki és ennek segítségével határoztam meg a normál irányú kötésszilárdságot. Ennek fényképe a 3.10. ábrán látható. Az alkalmazott próbatest anyagminősége 16MnCr5, a felületre felszört rétegeket az eddig ismertetett három fajta fémpor-ötvözetből készítettem el. Mind a három porötvözet esetén, mind az öt szórási távolságra 5 db próbatestet

készítettem, azaz összesen $3 \times (5 \times 5) = 75$ db próbatest készült. Felszórás előtt a szórandó felületek érdesítését, felszórás után a felszórt felületek megmunkálását köszörüléssel végeztem el. A felszórt réteg vastagsága 1,5 mm. A szakítást ZD 20 típusú szakítógépen végeztem.



3.9. ábra. Normál irányú kötőszilárdság meghatározásához kialakított próbatest



3.10. ábra. Normál irányú kötőszilárdság mérésénél alkalmazott próbatest

3.10.2. Nyíró kötészilárdság meghatározása

A csúsztató kötészilárdság meghatározásánál is a külső terhelést vesszük figyelembe.

$$R_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{A}, \text{ ahol}$$

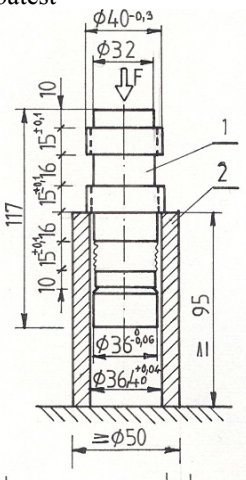
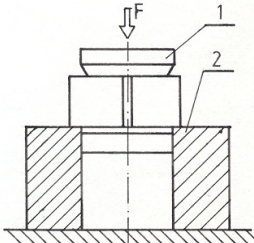
R_{\parallel} = nyíró kötészilárdság (MPa)

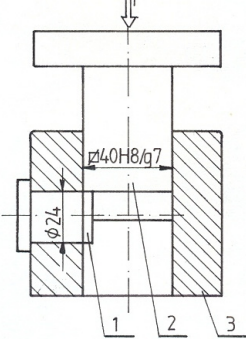
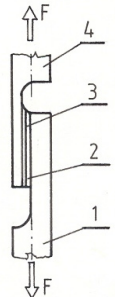
F_{\parallel} = a szórt réteg határfelületével párhuzamosan ható terhelés (N)

A = a lenyírandó felület (mm^2)

A nyíró kötészilárdság meghatározásának módjait a 3.6. táblázat tartalmazza.

3.6. táblázat. Nyíró kötészilárdság meghatározásának módjai

Próbatest kialakítása	Jellemzők
<p>DIN 50161 próbatest</p>  <p>1 = próbatest ; 2 = vágólap</p>	<ul style="list-style-type: none"> - három mérés végzésére is alkalmas, - a felszórt rétegből sokat kell lemunkálni, hosszadalmas és költséges, - a zsugorodásból adódó kötés erősen érezteti hatását, - nyírás axiális irányban
<p>METCO mérési módszere</p>  <p>1=próbatest ; 2= vágólap</p>	<ul style="list-style-type: none"> - jellemzői megegyeznek a DIN 50161 próbatest jellemzőivel, - a zsugorkötés csökkentésére a felszórt réteget felhasítják

<p>Molnár-féle mérési módszer</p>  <p>1=próbatest ; 2=vágóbélyeg ; 3=vágólap</p>	<ul style="list-style-type: none"> - a felszört réteg a próbatest véglapjára felszórva - a felszört rétegnek egyenletesnek kell lenni.
<p>Everts-féle mérési módszer</p>  <p>1=alaplapp ; 2=szört réteg ; 3=ragasztó réteg ; 4=húzólap</p>	<ul style="list-style-type: none"> - a terhelésnek a felületen megoszlónak kell lenni, - a felszört rétegnek egyenletesnek kell lenni, - a szört rétegre merőlegesen kell szakítani - a ragasztóanyagának a kötése nagyobb legyen, mint a szört rétegnek.

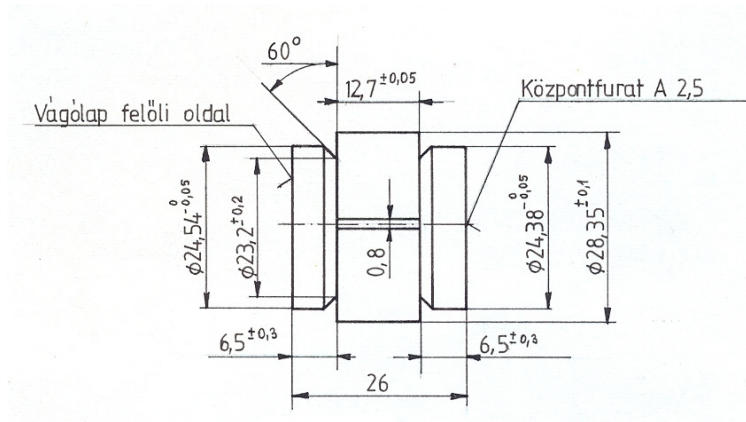
A nyíró kötésszilárdság meghatározására a METCO mérési módszerét választottam, a következő szempontokat vettem figyelembe:

- az elnyíródás a határfelületen következzen be,
- a próbatest kialakítása és felszórása egyszerű legyen,
- a próbatest szórás utáni megmunkálásával kapott felület és az előkészített felület egytengelyűsége csúcsok közötti megmunkálással biztosítható legyen.

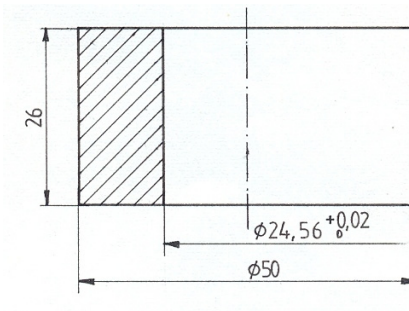
A próbatest kialakítása a 3.11. ábrán látható. A felszórás és a felület-előkészítés technológiai adatai megegyeznek a korábban ismertettekkel. A próbatesteket felszórás után csúcsok közötti köszörüléssel azonos méretűre munkáltam. A próbatestekre hornyot martam a zsigorkötés és az egyenetlen magasságból adódó alakzárás lecsökkentésére. A próbatestek palástfelületéről a 3.12. 3.13. és 3.14. ábrán látható vágólapal nyírtam le a 2mm vastagságban felszört réteget.

A vágólap X21Cr12 (régi jelölés K1) minőségű, keménysége 62HRC. A nyírást ZD 20 típusú szakítógéppel végeztem el. A nyírási vizsgálatok eredményeit a 4.16

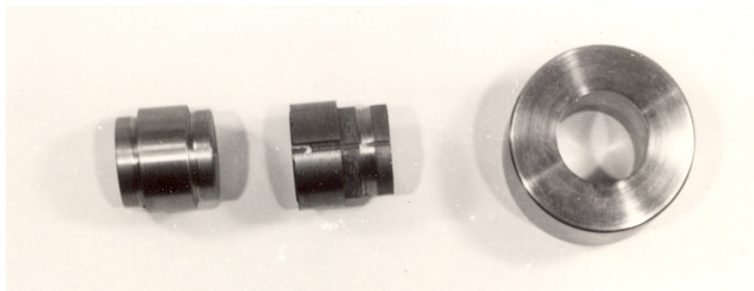
– 4.18. ábrák szemléltetik. Hasonlóan a normál irányú kötősszilárdsági vizsgálatokhoz, itt is feltüntettem az öt próbatétel eredményeiből kapott átlagértékeket, valamint a 95%-os előfordulási valószínűséget reprezentáló $\pm 2\sigma = 4\sigma$ szórási tartományt.



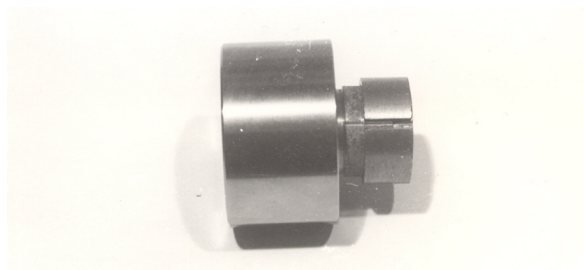
3.11. ábra. METCO cég-féle próbatétel a nyíró kötősszilárdság meghatározásához



3.12. ábra. Vágólap a palástfelületre felszórt rétegek nyírósszilárdságának meghatározásához



3.13. ábra. Nyíró kötősszilárdság mérésénél alkalmazott próbatestek



3.14. ábra. Nyíró kötőszilárdság mérésénél alkalmazott próbatest és vágólap kapcsolata

A vágólap nem hagyott karcot egyetlen próbatest felületén sem a nyírás során, a felszört réteg 2 mm vastag gyűrű alakjában egy darabban nyíródott le, a nyírás az alapozó rétegben ment végbe. A 3.14. ábrán látható az alkalmazott próbatest és vágólap kapcsolata a vizsgálatnál.

3.11. A kenőanyag felvevő- és leadó képesség

A porózus, szört rétegek egyik legfontosabb alkalmazási előnye lehet, hogy súrlódó üzemi rendszerekben kenőanyaggal telíthetők a pórusok. A hideg fémorszórással létrehozott felületek értékelését elvégeztem a kenőanyag felvevő és leadó képesség alapján is. PELLÉNYI (1997) tézisszerűen megfogalmazta elméletét, és kidolgozta módszerét annak, hogyan kell értelmezni és mérni porózus, azaz nedvszívó képességgel rendelkező anyagok kenőanyagleadó képességét. Elméletét és módszerét mezőgazdasági gépekben alkalmazott ragasztott szerkezetű facsapágyakra dolgozta ki, de az alapelv érvényesíthető minden porózus réteg esetében, mint pl. a hideg fémorszört rétegek esetében. Erre vonatkozó egyéb, tudományos igényű, megalapozott eredmények és összefüggések a szakirodalomban igen szegényesek.

PELLÉNYI (1997) gyakorlati tapasztalatai és a laboratóriumi vizsgálatai is egyértelműen igazolták, hogy a facsapágyak várható élettartama alapvetően a csapágy kenőanyag leadó képességével függ össze.

A facsapágyak kenőanyag-leadó képességére κ -, a következő összefüggést vezette be:

$$\kappa = \frac{M_{ki}}{M_E} \cdot 100[\%]$$

ahol: M_{ki} - a kifolyt kenőanyag tömege [g]

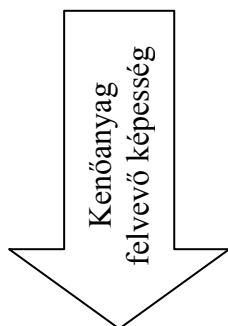
M_E - az eredeti vizsgált csapágyanyag tömege [g]

Ez a jellemző jól mérhető, a mérési eredmények matematikai statisztikai módszerekkel feldolgozhatók.

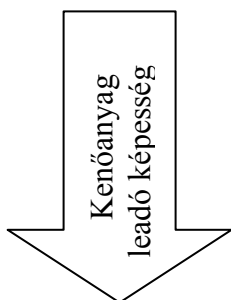
Ezt az alapelvet követve végeztem el a szört próbatest mintákkal kísérleteimet.

A mérés menete:

A kísérletekhez 15MnCr5-ös anyagminőségből készített Ø35/26x45-es vastagfalú csövet szórtam fel 1-1,5 mm rétegvastagsággal. A felszórás után minden próbatetest szórt rétegének a térfogatát kiszámoltam a megmért dimenziók alapján. Ez azért szükséges, mert az összehasonlíthatóság miatt, a felvett és leadott kenőolaj mennyiséget egységnyi szórt réteg térfogatra határozom meg.



- Szórás után minden egyes próbatetest tömegét meghatároztam, 0.00001 g pontossággal.
- A szórt rétegeket nem köszörültem, hanem szórás után a próbatesteket 4h hosszat 80°C-os olajban – 15W40 – áztattam. A felfűtés sebessége 20°C-ról 80°C-ra 2h időtartamot tett ki. Az áztatás (telítés) után a meleg próbatesteket szárazra töröltem, majd a tömegüket megmértem.
- A tömegkülönbségekből meghatároztam az egyes próbatestek abszolút olajfelvételét, majd a felszórt réteg térfogatának ismeretében a fajlagos olajfelvételt, azaz: olaj tömege „gramm”-ban mérve és 1 mm³ porózus szórt réteg térfogategységre vonatkoztatva (g/cm³).



- Ezután a próbatesteket 4h alatt, levegőn visszahűtöttem 20 °C-ra, majd 2h pihentetés után szárazra töröltem őket.
- Ezt követően a minták tömegét ismét megmértem, majd a csökkenésekből kiszámoltam a leadott olaj abszolút értékét, valamint a réteg térfogatra számított fajlagos értékét (mg/cm³).
- Meghatároztam az egyes bevonatokra kapott, felvett- és leadott fajlagos oljmennyiségek közötti százalékos eltérést.

A leírt folyamatot 180 mm ideálisnak tartott, valamint 100- és 260 mm szélsőséges szórási távolsággal készített minták esetén is elvégeztem. Minden egyes értékelési pont felvételéhez hét felszórt próbatesten végeztem el az olajtelítés és leadás kísérleteket.

3.12. Felületi szabadenergia és kémiai összetétel (XPS mérések)

A porózus rétegekben végbemenő kapilláris hatást – amikor a felületi erők és jelenségek dominálnak a tömeghatások felett – az adhézió befolyásolja. Az adhéziós képesség közvetve kifejezhető mérőszámmal is, a felületi szabadenergia meghatározással. Ennek elméleti alapja és meghatározási módszere a szakirodalomban tisztázott (FARKAS 1997). A felületi szabadenergia meghatározás egyik bevált lehetősége a csepp-próba, vagy peremszög mérés. A módszerrel nemcsak a felületi szabadenergia mértéke határozható meg, hanem a szabványos cseppösszetételek alkalmazásával az is eldönthető, hogy hidrofílnak

vagy hidrofóbnak tekinthető-e egy adott felület. Ez kenéstechnikai szempontból kiemelten fontos, hiszen vannak olyan alkalmazási helyek felszórt tengelyfelületek esetében is (pl. mezőgazdasági vagy élelmiszeripari termékfeldolgozás), ahol a kenőhatást víz vagy pára biztosítja. Klasszikus hajtómű alkalmazásoknál viszont legtöbbször hajtóműolaj a kenőanyag.

A nedvesedési peremszögméréseket egy SEE System (Advex Instruments, Cseh Köztársaság) típusú berendezéssel, ún. statikus ülő csepp módszerrel, kétszer desztillált vízzel és dijódmétánnal (ReagentPlus, 99%, Sigma-Aldrich), 23 °C-on hajtottam végre, a 2 µl-es cseppek Hamilton fecskendővel a próbatestek felületére juttatásával. Mindegyik mérési pont 5 db, száraz felületre felvitt független mérés átlagának az eredménye.

A felületi szabadenergia meghatározására az Owens-Wendt módszer került alkalmazásra (OWENS 1969).

A felületi réteg kémiai összetételének ellenőrzésére XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) kiegészítő méréseket is végeztem, hogy a felületi energia komponensek és az összetétel kapcsolatát is vizsgálhassam.



4. EREDMÉNYEK

4.1. A fémporötvözetek sűrűsége és szemcseszerkezete

A felhasznált fémporötvözetek sűrűségi értékeinek mérési eredményei a 4.1. táblázatban találhatóak.

4.1. táblázat. Sűrűségi értékek

Fémporötvözet neve	Sűrűség (g/cm ³)
DuroTec 19910	7,77
HardTec 19400	7,35
LubroTec 19985	8,26

Az eltérő sűrűségértékekre a vegyi összetétel értékei adják meg a választ. A termékismertetőben megadott összetételek ismeretében a DuroTec 19910 és a LubroTec 19985 jelű fémporoknál a Ni és Cr %-os aránya, míg a HardTec 19400 jelű poroknál a Fe, Cr és kis mennyiségben Ni % a meghatározó.

Javasolt szemcseméret az egyes szórási módokhoz az irodalom alapján (4.2.táblázat): (KRETZSCHMAR 1981)

4.2. táblázat. Javasolt szemcseméret

Eljárás	Szemcseméret
lángporfelszórás	20 - 80 μ m
Lángszóró hegesztés	20 - 150 μ m
Plazmaszórás, nagy sebességű és nagy teljesítményű	5 - 20 μ m
Plazmaszórás, kis sebességű (<200 m/s) és kis teljesítményű (<40 KW)	20 - 60 μ m
Plazma-szóróhegesztés	250 μ m-ig

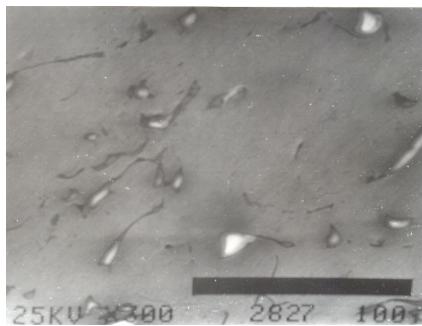
A fémporötvözetek felszórásakor a megfelelő szemcseméretet (szemcsefinomságot) az indokolja, hogy a szórási módra jellemző, tömegegységre vonatkoztatott fajlagos energia és a szórási sebesség megfelelő olvadási és mozgási energiát eredményezzen a felszóráshoz. A hideg fémporoszási módnál használt (RoToTec 80-as pisztoly) fémporötvözetek szemcseméretét szitasorozattal vizsgáltam meg, s a mérés során kapott értékek a megadott 20-80 μ m tartományba helyezkedtek el.

4.2. A fémporötvözetek kémiai összetétele

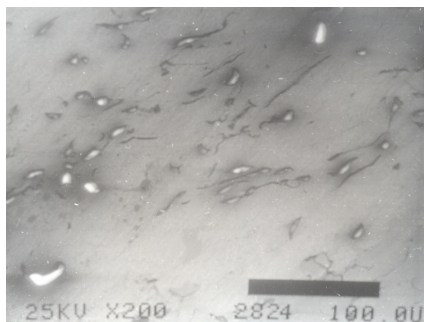
A kísérletekhez kiválasztott három fémporötvözet összetételét a 3.6. részben ismertetett eljárással vizsgáltam meg. Kimutattam azokat a fő ötvöző elemeket, amelyek az egyes fémporokra jellemzőek /Cr, Ni, Fe/. Erre azért is szükségem volt, mert a szakirodalomban utalást találtam az általam használt fémporötvözetek

összetételére, de a Castolin-Eutectic Intézet képviselője éppen ellentétes információt adott a fémporötvözetek összetételéről. A méréseim a Castolin-Eutectic Intézet adatait igazolták.

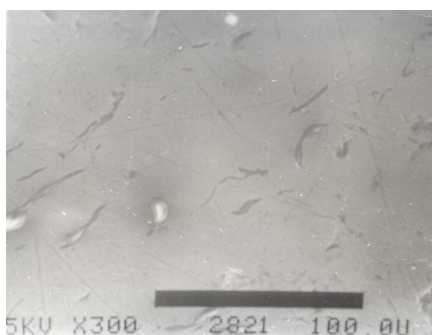
A 4.1. ábrán a DuroTec 19910, a 4.2. ábrán a HardTec 19400, a 4.3. ábrán pedig a LubroTec 19985 jelű fémporötvözetek azon felületeiről készült felvételek láthatók, ahol a méréshez szükséges felületi gerjesztést végeztem el. A gerjesztett felületeket a csiszoláshoz előkészített próbatesteken alakítottam ki, közel az alapanyag és a felszört réteg találkozásához.



4.1. ábra. DuroTec 19910 jelű fémporötvözet gerjesztett területe, (N 300x)



4.2. ábra. HardTec 19400 jelű fémporötvözet gerjesztett területe, (N 200x)



4.3. ábra. LubroTec 19985 jelű fémporötvözet gerjesztett területe, (N 300x)

A fémporötvezetek összetételének ellenőrzését atomabszorpciós spektrométeres (UNICAM SP 1900) méréssel is elvégeztem. A fémporok oldása sósavsalétromsav (HCL-HN₃) elegyben történt. Az oldatot acetilén-levegő keverék lángjába porlasztjuk be és mérjük a kiválasztott ötvöző intenzitásának mértékét. Az intenzitást hasonlítjuk össze egy előzőleg az adott ötvözőre jellemző hitelesítő görbével, melyből leolvasható az adott ötvöző koncentrációja. Az így meghatározott ötvözők %-os mennyisége közel azonos volt 8 pásztaáz elektronmikroszkóppal mért adatokkal. Az eredmények összefoglalása a 4.3. táblázatban található.

4.3. A felszört réteg tömörség (porozitás) és repedés vizsgálata

Az elvégzett mikrokeménység mérési vizsgálataim eredményeinek értékelése a 4.4. táblázatban található. Húsz mérés értékelése alapján állapítottam meg a feltüntetett értékeket. A használt műszer: NEOPHOT 2, 100g mikrokeménység mérő. 100 g terhelést alkalmazva, az alapanyag keménysége 150 – 160 μHV_{100}

Kiegészítő mérésként - aminek gyakorlati jelentősége nincs a beolvasztással járó leválás miatt – a beolvasztott, azaz porozitás nélküli szört bevonatok keménységét is meghatároztam tájékoztató jelleggel.

Csiszolatok 500x-os nagyítású képei, és a porozitás átlagos értékei digitális képfeldolgozással

Csiszolatok három eltérő mélységben, egymástól 15 μm távolságra készültek, minden értékelési feltételhez három próbatestet vizsgálva. Így kilenc kép (3x3) digitális feldolgozásából kapott porozitási értékek átlaga szerepel a 4.5. 4.6. és 4.7. táblázatokban, egy-egy mintakép bemutatásával.

A 4.5. táblázat alapján megállapítható, hogy:

a) 180 mm szórási távolság felett a porozitás jelentősen csökken, ami több tényező együttes hatása:

- a hosszabb gázláng úton is még a gyorsulási fázisban lehetnek a szemcsék, nagyobb sebességre gyorsulva, így a szemcse deformációja nagyobb lehet,

- a lángban töltött gyorsulási idő a szemcsék magasabb hőmérsékletét eredményezi, így a szemcsék képlékenyebbek lehetnek a becsapódás pillanatában

b) 180 mm szórás és az alatti távolságok esetén nagyméretű pórusok megjelenése jellemző, szélsőségesen kis szórási távolság esetén a porozitás átlagos értéke csökken.

A 4.6. táblázat alapján megállapítható, hogy:

A HardTec 19400 bevonat esetén a porozitás a szórási távolsággal folyamatosan nő. (A 8%-os porozitás eredményezte a későbbiekben a legjobb olajfelvételt.) Ehhez képest nagyobb szórási távolságnál a pórusok mérete megnő, kisebb szórási távolságnál csökken. Ez arra enged következtetni, hogy a becsapódás

szemcsesűrűsége a meghatározó, a deformáció és esetleges lágyulás nem játszik fontos szerepet.

4.3/a.táblázat. A használt porok kémiai összetétele

Fémporötvszövet	Vegyí összetétel %										
	C	Ni	Cr	Fe	Mn	Mo	Co	B	Si	S	
Jele											
DuroTec 19910	0,11	84,61	9,35	2,05	0,02	0,25	0,05	1,1	4,8	0,015	
HardTec 19400	0,1	1,08	15,8	78,1	0,08	-	-	1,03	-	0,018	
LubroTec 19985	0,03	74,7	15,42	8,35	0,11	0,1	0,1	-	-	0,01	

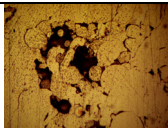
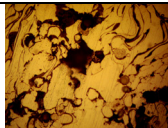
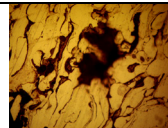
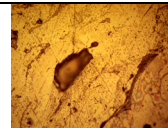
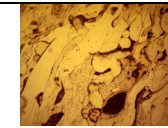
4.3/b.táblázat. A használt alapozó por kémiai összetétele

Fémporötvszövet	Vegyí összetétel %		
Jele	Al	Ni	Mo
XUPER ULTRA BOND 51000	4,97	89,45	5,42

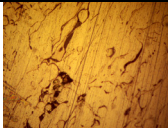
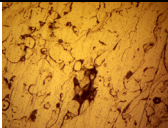
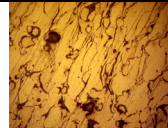
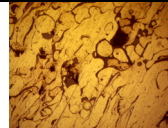
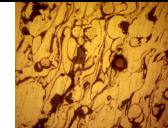
4.4. táblázat. Tömörség Vickers-féle ellenőrzéssel

Portípus	Csökkentett szórási távolság, keménység értékek (H), μHV_{100} , *H/H _N hányados		H _N , normál szórási távolság, keménység értékek μHV_{100}	Növelt szórási távolság, keménység értékek (H) μHV_{100} , *H/H _N hányados		Porozitás nélküli keménység, μHV_{100}
	100 mm	140 mm	180 mm	220 mm	260 mm	
DuroTec 19910	308 *0,9	341 *0,99	(4.7.ábra) 342	324 *0,94	291 *0,85	401
HardTec 19400	319 *0,95	332 *0,99	(4.8.ábra) 335	318 *0,95	301 *0,89	394
LubroTec 19985	177 *0,89	195 *0,98	(4.9.ábra) 198	192 *0,96	188 *0,95	202

4.5. táblázat. DuroTec 19910 porozitási értékei

Szórási távolság				
100 mm	140 mm	180 mm	220 mm	260 mm
				
Átlagos porozitás 12 %	Átlagos porozitás 26 %	Átlagos porozitás 23 %	Átlagos porozitás 8 %	Átlagos porozitás 7 %

4.6. táblázat. HardTec 19400 porozitási értékei

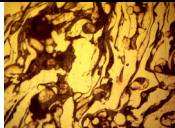
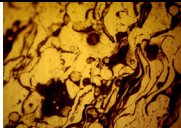
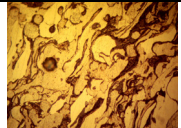
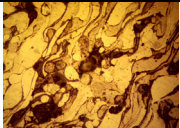
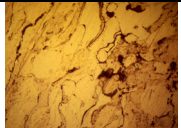
Szórási távolság				
100 mm	140 mm	180 mm	220 mm	260 mm
				
Átlagos porozitás 4 %	Átlagos porozitás 6 %	Átlagos porozitás 8 %	Átlagos porozitás 10 %	Átlagos porozitás 14 %

A 4.7. táblázat alapján megállapítható, hogy:

A LubroTec 19985 bevonat esetén, ellentétben a HardTec-vel, a szórási távolság növelésével a porozitás fokozatosan csökken, ami a növekvő képlékenység és mozgási energia eredménye. Rövid szórási távolság esetén a pórusok mérete

növekszik. (A későbbiekben a 20-21%-os porozitás adta a legkedvezőbb olajfelvételt és leadást.)

4.7. táblázat. LubroTec 19985 porozitási értékei

Szórási távolság				
100 mm	140 mm	180 mm	220 mm	260 mm
				
Átlagos porozitás 28 %	Átlagos porozitás 27 %	Átlagos porozitás 21 %	Átlagos porozitás 20 %	Átlagos porozitás 8 %

A repedésvizsgálatok kapcsán megállapítható, hogy a felületek egyenletesek voltak, a porozitáson kívül alig volt érzékelhető hajszálrepedés megjelenése. Az észlelt repedések is a szórási távolság szélső értékeinél jelentkeztek csak. Az összefoglaló eredmények a 4.8. táblázatban találhatóak.

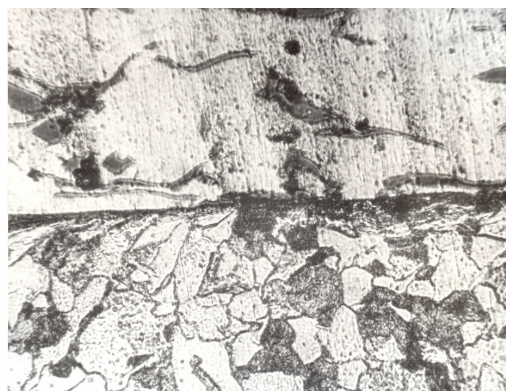
4.8. táblázat. A felületek repedésvizsgálati eredményei

Portípus	Csökkentett szórási távolság,		Normál szórási távolság,	Növelt szórási távolság,	
	100 mm	140 mm		180 mm	220 mm
DuroTec 19910	Kezdődő hajszálrepedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Kezdődő hajszálrepedés
HardTec 19400	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Kezdődő hajszálrepedés
LubroTec 19985	Kezdődő hajszálrepedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés	Megfelelő, nincs repedés

4.4. Szövetszerkezeti vizsgálat

A mikroszkópi felvételekhez az előkészített csiszolatokat 5 %-os alkoholos HNO_3 -ban marattam meg és felvételeket készítettem róluk. A 4.4. ábrán bemutatott felvétel a DuroTec 19910 jelű porral készített réteget mutatja, normál szórási távolság esetén. Az alapanyag 16MnCr5, aminek az összetételét a 3.3. táblázat tartalmazza. Az összetételből következően az alapanyag túlnyomórészt ferritet (fehér kristályok) és mintegy 20 %-ban perlitet (szürke kristályok) tartalmaz, normalizált állapotú. Látható, hogy az alapanyag szövetszerkezete a szórt réteggel érintkező átmeneti zónában sem változott, legfeljebb kisebb kristálytorzulások figyelhetők meg. Az alapanyag és felszórt réteg határfelületén helyenként vékony oxidhártya nyomai láthatók. Nagyobb méretű oxidzárványok vagy tapadási hiányosságok nincsenek. A 4.3. táblázat tartalmazza a réteg összetételét. A

DuroTec 19910 porréteg Ni alapú (84,61%), a 4.4. ábra felső részén a világos mező Ni mátrixú anyagrészt, a sötétebb mezők pedig a Cr; B; Si vegyületek.



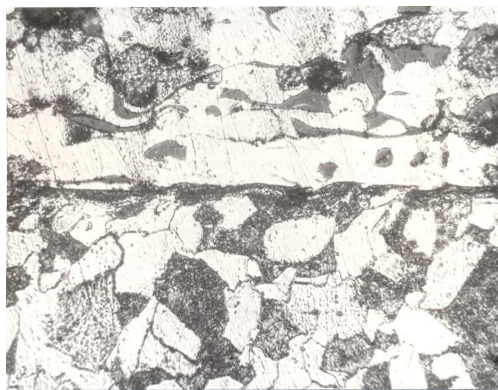
4.4. ábra. DuroTec 19910 jelű porral szórt réteg és átmeneti zóna, (500x)

A 4.5. ábrán a HardTec 19400 jelű porral készített réteg, és átmeneti zónája látható. Az alapanyag itt is ferrit perlités normalizált állapotú 16MnCr5. Előzőekhez hasonlóan az alapanyag és a felszórt réteg határfelületén kisméretű kristálytorzulás és vékony oxidhártya figyelhető meg. A 4.3/a. táblázat tartalmazza a felszórt réteg összetételét. A felszórt réteg világos mezeje FeCr szilárd oldat kristályokból áll, a sötét mezők nagy része a porozitást vagy nemfémek zárványok helyét mutatja.



4.5. ábra. HardTec 19400 jelű porral szórt réteg és átmeneti zóna, (N 500x)

A 4.6. ábrán a LubroTec 19985 jelű porral készített réteg és átmeneti zónája látható. Az alapanyag azonos kristályszerkezetű a 4.4. és 4.5. ábrán bemutatott anyaggal. A felszórt réteg határfelületén sem változott a szövetszerkezet, kisebb kristálytorzulások léptek fel. Helyenként a határfelületen vékony oxidhártya nyomai láthatók. A 4.3/a. táblázat tartalmazza a réteg összetételét. A Ni alapú mátrixban - a 4.6. ábra felső részének világos mezeje - FeCr szilárd oldat kristályok helyezkednek el, valamint a sötét mezők az oxidok jelenlétére utalnak.



4.6. ábra. LubroTec 19985 jelű porral szórt réteg és átmeneti zóna, (N 500x)

A 4.4. – 4.6. ábrák normál, gyártói ajánlásnak megfelelő szórási távolság esetén készített csiszolatokat mutatnak. A növelt és csökkentett szórási távolságok hatását a csiszolaton kétféleképpen lehetett érzékelni, főleg a szélsőséges esetekben:

- csökkentett szórási távolságok: jobban deformált szemcsék
- növelt szórási távolságok: szabályosabb szemcsealak

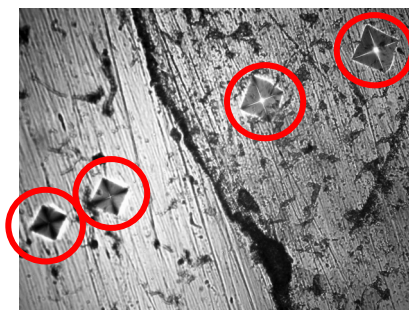
A mikroszkópi felvételek elemzése mennyiségi, mérőszámmal jellemezhető eltérést nem tett lehetővé, de a szélsőséges szórási távolságoknál készült csiszolatok mikroszkópos képein az eltérés az ideálisnak tartott állapottól felismerhető.

4.5. A keménység változása a felszórt réteg metszetében és az átmeneti zónában

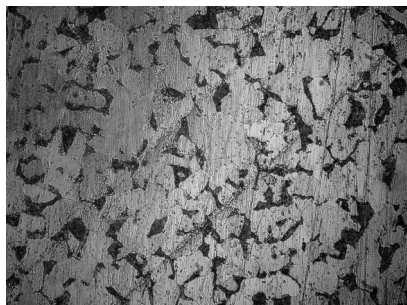
A metszetben a keménység mérésére a szövetszerkezeti vizsgálatához elkészített csiszolatokat használtam fel. A felszórt réteg és az átmeneti zóna keménységét NEOPOTH-2 fémmikroszkóp mikro keménységmérőjével mértem. A 4.7. – 4.9. ábrák a metszetekben készített keménységmérések nyomait mutatják.



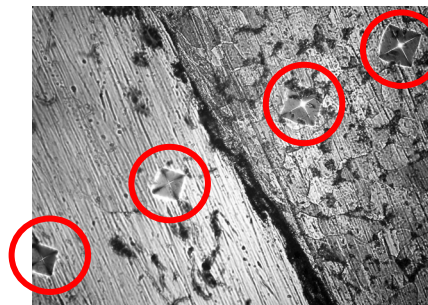
4.7/a. ábra. DuroTec 19910 szórt réteg. (500x)



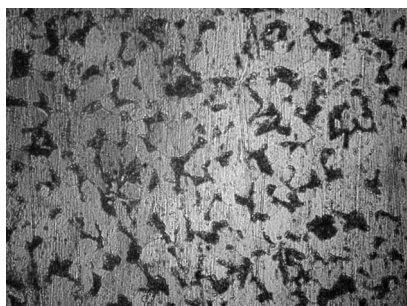
4.7/b. ábra. Mikrokeménység mérés nyomai a metszet különböző részein. (500x)



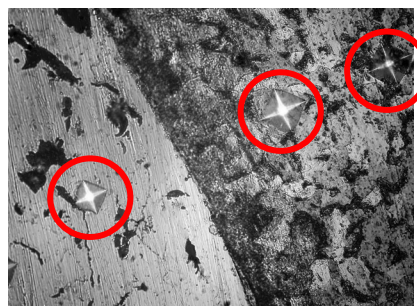
4.8/a. ábra. HardTec 19400
szórt réteg. (500x)



4.8/b. ábra. Mikrokeménység
mérés nyomai a metszet
különböző részein. (500x)



4.9/a. ábra. LubroTec 19985
szórt réteg. (500x)

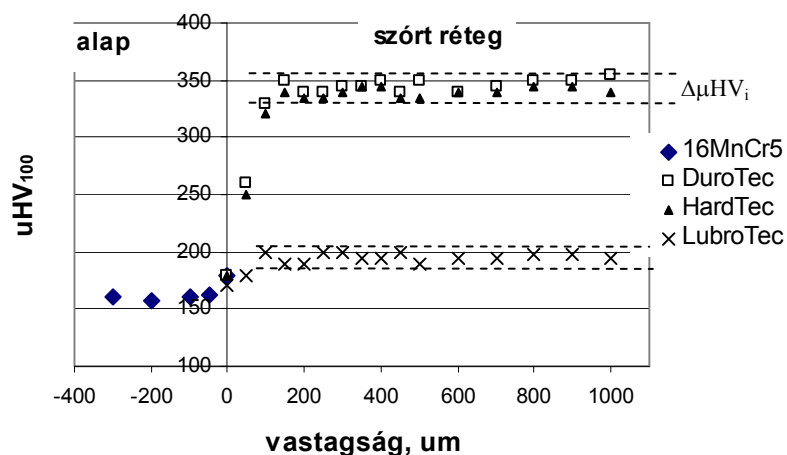


4.9/b. ábra. Mikrokeménység
mérés nyomai a metszet
különböző részein. (500x)

A metszeti keménység változását három szórási távolság esetén – 100 mm, 180 mm és 260 mm - mindhárom pornál a 4.10. 4.11. és 4.12. ábrák szemléltetik. Az ábrák nem átlagolt eredmények, hanem egy- egy reprezentatív próbatest mérési eredményei. A rétegek keménysége teljes vastagságban közel azonos, így a szerkezet homogén eloszlást mutat. A homogenitás összhangban van a mikrokeménység mérésen alapuló tömörség vizsgálat eredményeivel, melyet a 4.4. táblázat már ismertetett.

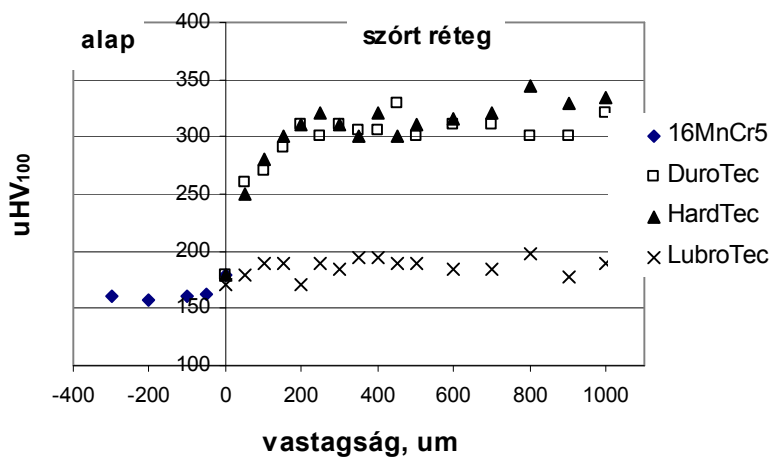
Az ábrákból látható, hogy a 180 mm-es szórási táv adta a legjobb keménység értékeket és a legkisebb szóráásokat. A normál távolságról szórt (ideális) rétegek keménységének eltérését az egyes rétegek összetételének különbsége adja. A DuroTec 19910 és a HardTec 19400 jelű fémporötvözetek nagyobb keménységét a jelen levő C, B, Si keménységnövelő hatásai okozzák, míg ezen ötvözők a LubroTec 19985 jelű fémporötvözetben nem, vagy csak igen kis mértékben található meg. A DuroTec 19910 és a HardTec 19400 bevonatok keménysége között meghatározó eltérést nem tapasztaltam.

Mikrokeménység a keresztmetszetben, normál szórási távolság (180 mm)

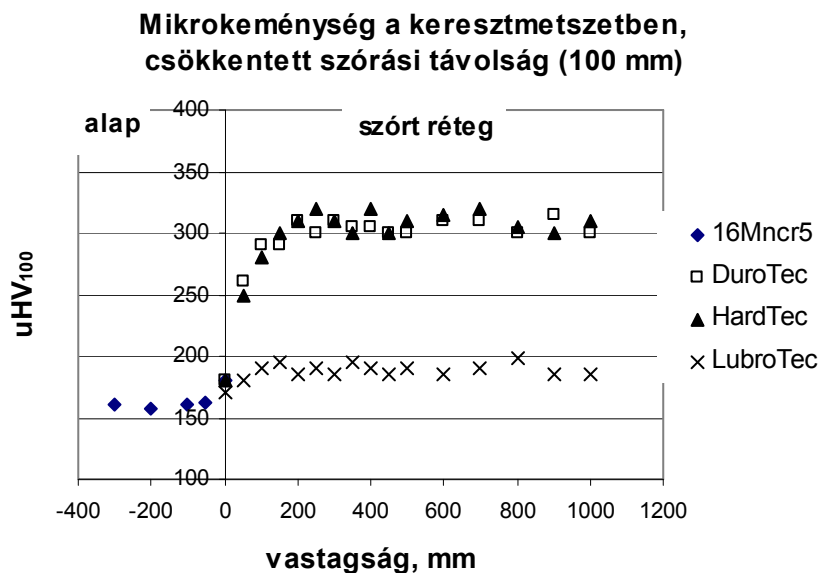


4.10. ábra. Normál szórási távolság esetén a mikrokeménység alakulása az alapanyag- a kötési zóna és a szórt réteg metszetében ($\Delta\mu HV_i < 10\%$)

Mikrokeménység a keresztmetszetben, növelt szórási táv (260 mm)



4.11. ábra. 260 mm-re növelt szórási távolság esetén a mikrokeménység alakulása az alapanyag- a kötési zóna és a szórt réteg metszetében

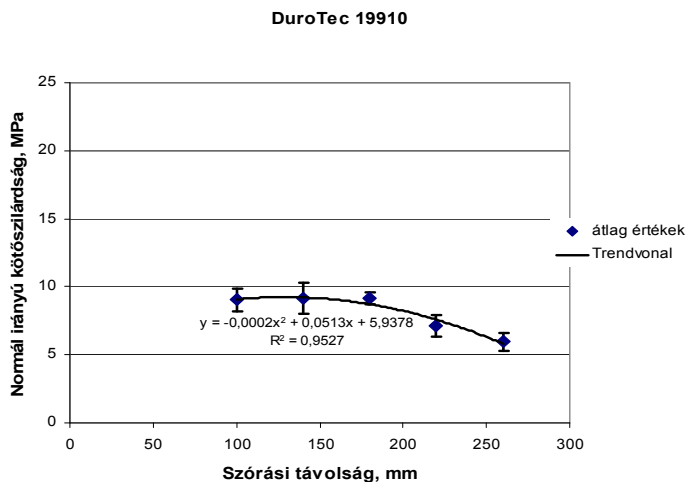


4.12. ábra. 100 mm-re csökkentett szórási távolság esetén a mikrokeménység alakulása az alapanyag- a kötési zóna és a szórt réteg metszetében

4.6. Kötésszilárdsági vizsgálatok

A vizsgálati módszer bemutatásnál alkalmazott mérési rendszerek szerint a kötésszilárdsági eredmények az alábbiak szerint alakultak.

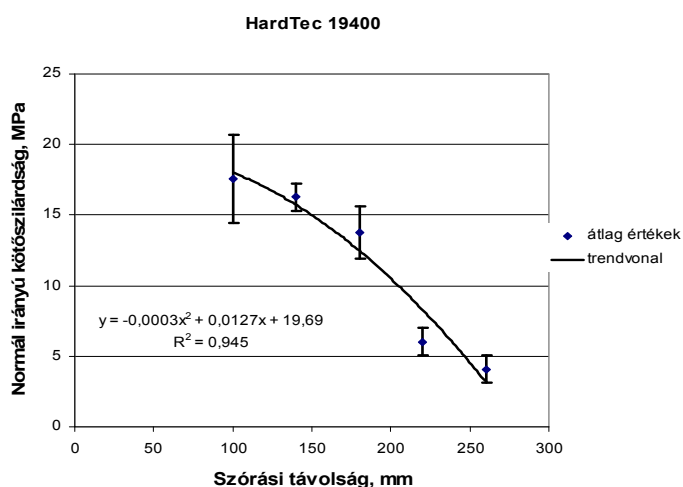
4.6.1. Normál irányú kötésszilárdság



4.13. ábra. A DuroTec 19910 porral szórt próbatetek normál irányú kötősszilárdsága a szórási távolság függvényében.

A normál irányú kötőszilárdság vizsgálati eredményeit a 4.13 – 4.15. ábrák szemléltetik. Az ábrákon az egyes mérési pontok 5 próbatest mérési eredményeinek átlagát mutatják, továbbá a 95%-os valószínűséget reprezentáló $\pm 2\sigma = 4\sigma$ szórási tartományt.

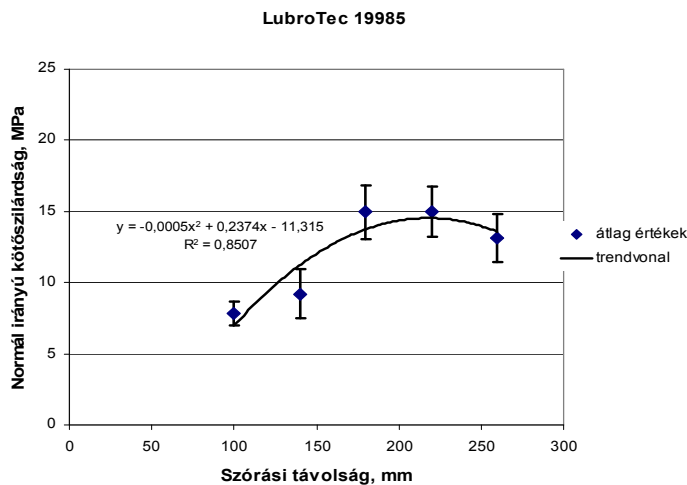
- A 4.13. ábrából leolvasható, hogy a DuroTec 19910 porral szórt réteg normál irányú kötőszilárdsága a szórási távolság növelésére érzékenyebb. A 180 mm optimális szórási távolsághoz képest a távolság növelése a szilárdság csökkenését eredményezte, mely másodfokú polinommal közelíthető.
- A szórási távolság csökkentése átlagban nem változtatta meg a kötés szilárdságát, de a jelentősen megnőtt szórások a technológia bizonytalanságát jelzik csökkent szórási távolság esetén.
- A technológia kézi kivitelezéséhez fontos következtetés, a normálirányú kötőszilárdság szempontjából, hogy az ideális 180 mm szórási távolságtól való eltérés – mely kézi szórás esetén biztosan bekövetkezik – kevésbé hátrányos, ha az a szórási távolság csökkenésével jár.



4.14. ábra. A HardTec 19400 porral szórt próbatestek normál irányú kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében.

- A 4.14. ábrán megfigyelhető, hogy a HardTec 19400 bevonattal szórt réteg normál irányú kötőszilárdság átlagértékei a szórási távolság csökkentése esetén még nőttek is, bár a 100 mm-es szórási távolsághoz tartozó nagy szórás a technológia bizonytalanná válására utal.
- Ennél a porötvözetnél megállapítható, hogy a szórási távolság növelése jelentősen csökkentette a normál irányú kötőszilárdságot.
- A kísérletek alapján megfogalmazható, hogy a HardTec 19400 porötvözet normál irányú kötőszilárdságának legkedvezőbb esete – figyelembe véve a kapott szilárdsági értékeket és szórásokat – a szakirodalmi és gyártói alapadatként kezelt 180 mm helyett 140 mm szórási távolságnál adódott.

- Ennél a porötövözetnél javasolható a szórási távolág intervallum bevezetése 140 – 180 mm közötti ajánlással.



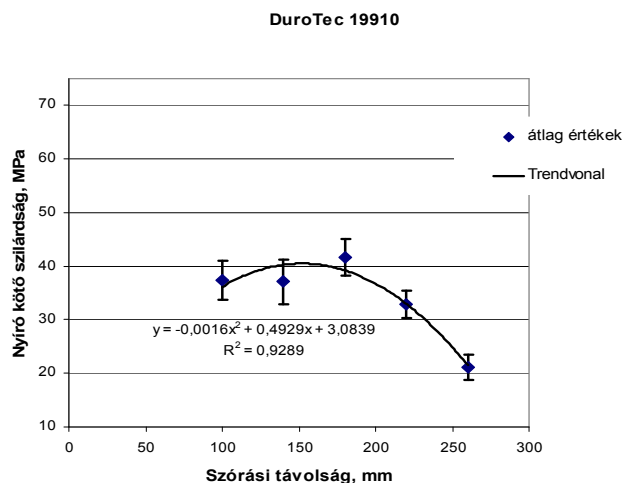
4.15. ábra. A LubroTec 19985 porral szórt próbatetek normál irányú kötősszilárdsága a szórási távolság függvényében.

- A 4.15. ábra szerint a LubroTec 19985 porötövözzel szórt réteg normál irányú kötősszilárdsága a szórási távolság függvényében, a korábbi ábrákon bemutatottakhoz képest - HardTec 19400 és DuroTec 19910 – ellentétes trendet eredményezett. A korábbi fejezetekben bemutattam, hogy a LubroTec 19985 porösszetétele, porozitása és mikrokeménysége eltér a HardTec 19400 és LubroTec 19985 poroktól. A különbség a 4.15. ábra szilárdságváltozási trendjében is megmutatkozik.
- A LubroTec 19985 szilárdsága a szórási távolság csökkenésére érzékenyen változik, erősen csökken, míg a szórási távolság növelése kevésbé csökkentette le a kötősszilárdságot. Megfigyelhető, hogy a mérési eredmények szórása egyenletes, csak a kis szórási távolság esetén volt mind az öt próbatest esetén szinte azonos mérési eredmény, 100 mm-es felszórási távolság esetén a relatív szórás mindössze 5% volt.
- Ennél a porötövözetnél is javasolható a szórási távolág intervallum bevezetése 180 – 220 mm közötti ajánlással.

A három porötövözet összehasonlítása kapcsán megállapítható, hogy a HardTec 19400 és a LubroTec 19985 ötvözetek normál irányú kötősszilárdsága közel azonos a javasolt szórási intervallumokban. A DuroTec 19910 fémporötövözet valamivel alacsonyabb kötősszilárdságát az eredményezi, hogy a tulajdonságait meghatározó fő ötvözők (C, Ni, Cr, Fe) mellé adalékolt szilícium és a bór diffúzív hatása csak korlátozottan érvényesül a hideg fémporszórési technológiákban.

4.6.2. Nyíró kötőszilárdság

A 4.16 ábra szerint megfogalmazható, hogy hasonlóan a normál irányú kötőszilárdsághoz, a DuroTec 19910 porral szórt réteg nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság növelésére érzékeny. A 180 mm optimális szórási távolsághoz képest a távolság növelése a szilárdság csökkenését eredményezte, mely másodfokú polinommal közelíthető.



4.16. ábra. A DuroTec 19910 porral szórt próbatestek nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében.

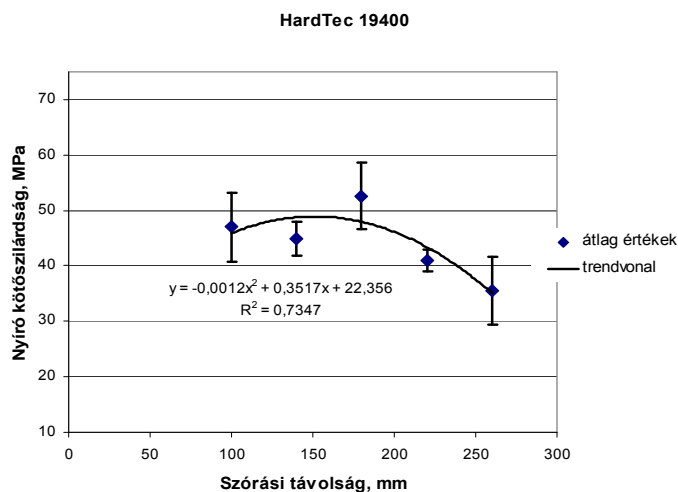
- A szórási távolság csökkentése átlagban alig 10%-kal csökkentette le a kötés szilárdságát. Mérési eredmények szórásai közel azonosak (relatív szórások 4- 5,5%).
- A technológia kézi kivitelezéséhez fontos következtetés, a nyíró kötőszilárdság szempontjából, hogy az ideális 180 mm szórási távolságtól való eltérés – mely kézi szórási esetén biztosan bekövetkezik – kevésbé hátrányos, ha az a szórási távolság csökkenésével jár.
- Összehasonlítva az ideális 180 mm körüli szórási távolsághoz tartozó szilárdsági eredményeket, megállapítható, hogy a DuroTec 19910 porötözettel szórt rétegek nyírószilárdsága közel 4,4-szerese a normálirányú kötőszilárdságnak.

A 4.17. ábra alapján, a HardTec 19400 anyag nyíró kötőszilárdságával kapcsolatban az alábbiak fogalmazhatók meg:

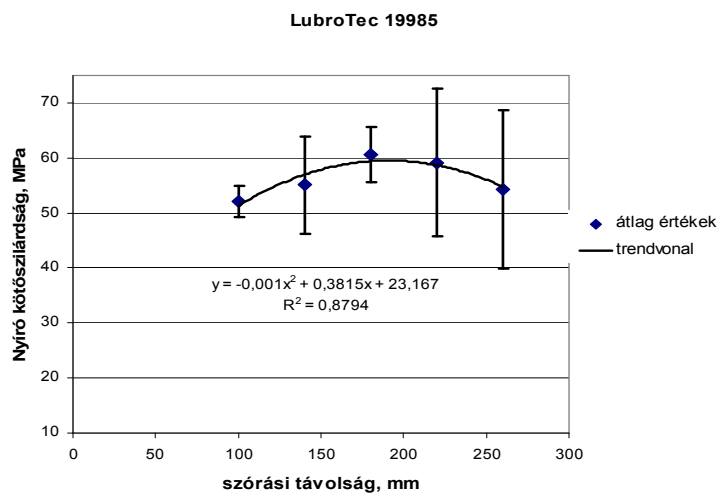
- A HardTec 19400 bevonattal szórt réteg nyíró kötőszilárdság átlagértékei a szórási távolság csökkentése esetén kis mértékben, alig 5%-kal csökkentek, a mért értékek szórása sem változott kedvezőtlenül.
- Megállapítható, hogy a szórási távolság növelése csökkentette a normál irányú kötőszilárdságot, bár kevésbé mint a másik porok esetében.
- A kísérletek alapján megfogalmazható, hogy a HardTec 19400 porötözettel nyíró kötőszilárdságának legkedvezőbb esete – figyelembe véve a kapott

szilárdsági értékeket és szórásokat – a szakirodalmi és gyártói alapadatként kezelt 180 mm helyett egy szórási intervallumra kiterjeszhető.

- Ennél a porötözetnél a javasolható szórási távolság intervalluma 150 - 190 mm közötti ajánlás lehet.



4.17. ábra. A HardTec 19400 porral szórt próbatetek nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében.



4.18. ábra. A LubroTec 19985 porral szórt próbatetek nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében.

- A 4.18. ábra szerint a LubroTec 19985 porötözettel szórt réteg nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében, a korábbi ábrákon bemutatottakhoz képest - HardTec 19400 és DuroTec 19910 – ellentétes trendet eredményezett. Ez a viselkedés egyértelműbben megfogalmazható a normál irányú kötőszilárdság kapcsán, de a nyíró szilárdság görbéjén is megfigyelhető.

- A LubroTec 19985 nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság csökkenésére érzékenyebben változik (erősebben csökken), mint a felszórási távolsága növelése esetén. Megfigyelhető, hogy a mérési eredmények szórása jelentősen megnő a felszórási távolság növelésével (relatív szórások elérik a 11%-ot), ami technológia bizonytalanságára utal. Kis felszórási távolság esetén (100 mm) egyenletes eredmények adódtak, de jelenetösen csökkent szilárdsági értékekkel.
- A nyíró kötőszilárdság szempontjából, ennél az ötvözetnél javasolt a gyártói 180 mm körüli szórási távolság betartása. Amennyiben szórási tűrésmezét kell megadni, akkor a 180 mm-től felfelé, max. 200 mm-ig elfogadható a szórási távolság.

A három porötözet szilárdsági értékeinek összehasonlítása alapján megállapítható:

- A LubroTec 19985 porötözet szolgáltatja a legnagyobb nyíró kötőszilárdságot a 180 - 200 mm felszórási mérettartományban. Itt a szilárdság elérte a 60MPa értéket, melyhez kedvező 3-5%-os relatív szórás tartozik.
- A HardTec 19400 porötözetek nyíró kötőszilárdsága elérte az 50MPa értéket, melyhez javasolható szórási távolság intervalluma 150 - 190 mm. Ekkor a mért értékek relatív szórása 3-5% közötti.
- A DuroTec 19910 fémporötözet nyíró kötőszilárdsága elérte a 40 MPa körüli szintet. Ez tartható a 160-180mm-es felszórási távolság esetén, mely kedvező relatív szórásokkal párosult (4-5%).

A DuroTec 19910 esetében mért kisebb nyíró szilárdsági értékek – hasonlóan a normál irányú szilárdsági értékekhez – ismételten felhívják a figyelmet arra, hogy a tulajdonságait meghatározó fő ötvözők (C, Ni, Cr, Fe) mellé adalékolt szilícium és bór diffúzió hatásának korlátozottsága az anyagi rendszer együttes hatásának eredménye. A bór és szilícium adalékolás célja a diffúziós képességek kihasználásával, a kötőszilárdság javítása. A kísérletek egyértelműen bizonyították, hogy ez a diffúziós képességet az anyagi és technológiai rendszer, az ötvözet szerkezet és felszórási eljárás is erősen befolyásolja.

Hideg fémorszórás esetén a bór és szilícium adalékolás, vagy a mértékük növelése, nem jelenti automatikusan a diffúziós kötés erősítését is. A meleg fémorszórás eljáráskor alkalmazott külön hőenergia bevitel (porózus réteg beolvasztása) már teljesen más feltételrendszert biztosít a diffúzió kialakulására.

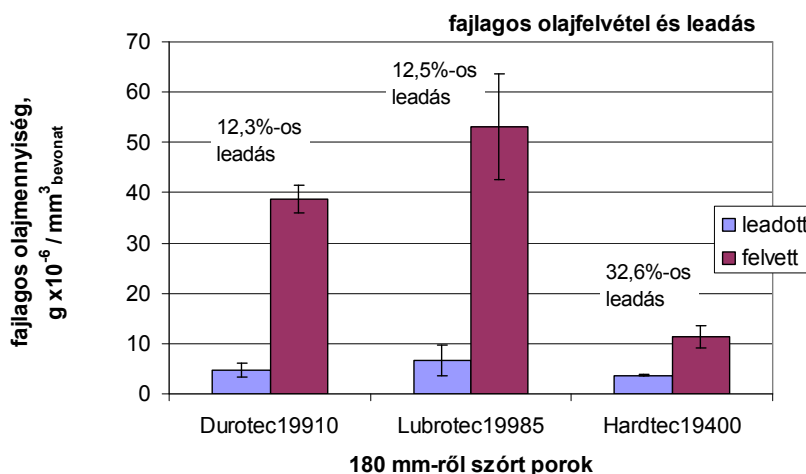
A 4.9. táblázat összefoglalja a kötőszilárdsági vizsgálatok fontosabb eredményeit

4.7. A kenőanyag felvevő- és leadó képesség

A 4.19. ábra a 180 mm-ről szórt próbatestek olajfelvételi és leadási eredményeit szemlélteti. Az oszlopokon feltüntetett hibaszávok a $\pm 2\sigma$ mérettartományt, azaz 95%-os előfordulási mérettartományt jelölik.

4.9. táblázat. kötőszilárdsági vizsgálati eredmények összegzése

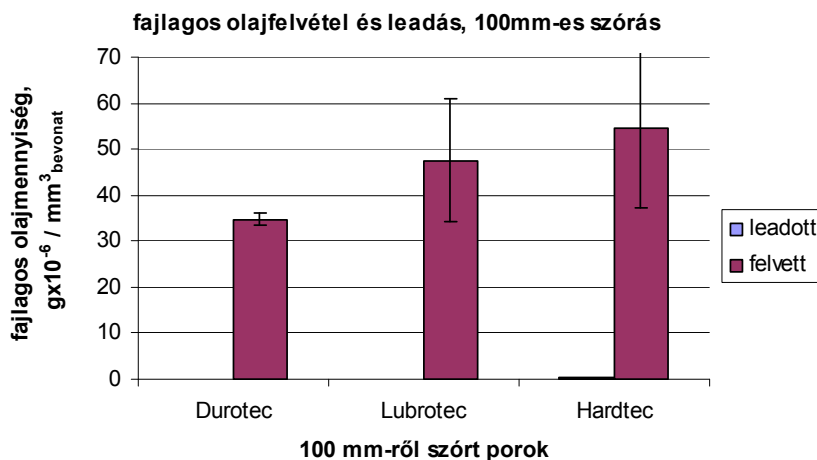
Porötvözet	Normál irányú kötőszilárdság, MPa, R_{\perp}		Nyíró kötőszilárdság, MPa, R_{\parallel}		$R_{\perp} / R_{\parallel}$ hányados
	Maximális értékek, MPa	Javasolt szórási távolság, mm	Maximális értékek, MPa	Javasolt szórási távolság, mm	
DuroTec 19910	9	130 - 180	40	160 - 180	4,4
HardTec 19400	14 - 15	140 - 160	50	150 - 190	3,4
LubroTec 19985	14 - 15	180 - 220	60	180 - 200	4



4.19. ábra. 180 mm szórási távolságból felvitt bevonatok kenőolaj felvevő- és leadó képessége, ΔT vizsgálati intervallum 60°C , ($20^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$)

- A Lubrotec 19985 bevonat kapcsán megállapítható, hogy kimagaslóan nagy mennyiségű olajat volt képes felvenni 1 mm^3 bevonati térfogatra vonatkoztatva, és ennek 12,5%-át tudta leadni, ami végeredményben a legnagyobb leadott olajmennyiség a három bevonat összehasonlításában.
- A Hardtec 19400 és Durotec 19910 anyagú bevonatok kevesebb olajat vettek fel, mint a LubroTec 19985. A HardTec 19400 olajleadása %-osan, a felvett mennyiséghez képest, számottevőnek minősült a másik két bevonathoz képest, de végeredményben nem éri el a LubroTec 19985 által leadott mennyiséget.

A 4.20. ábra a 100 mm szórási távolságról felvitt bevonatok olajfelvevő és leadó képességét mutatja.



4.20.ábra. 100 mm szórási távolságról felvitt bevonatok fajlagos olajfelvevő és leadó képessége

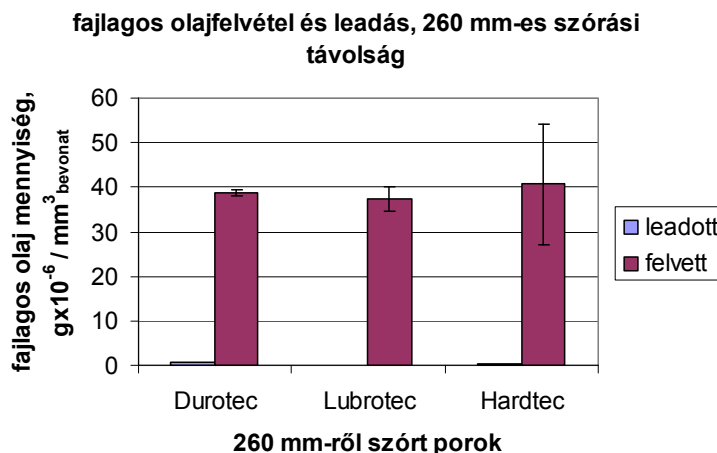
Összehasonlítva az eredményeket a normál szórási távolsághoz (180mm) tartozó eredményekkel (4.19.ábra) szembevetendő eltérések tapasztalhatók.

- Míg a felvett olajmennyiség a DuroTec 19910 és LubroTec 19985 vonatkozásában alig változik, addig a Hardtec bevonat felvétele átlagosan ötszörösére nő.
- Mindhárom bevonat esetében megállapítható, hogy a felvett olajmennyiség meghatározásánál a mérési eredmények szórása két-háromszorosára nőtt, ami a technológia, a rétegszerkezet bizonytalanságát jelzi.
- A kenőolaj leadó képesség drasztikusan lecsökkent olyan alacsony értékre, hogy a 4.20.ábrán az oszlopok megjelenítése nem látszik a 0-1% körüli értékek miatt. A leadott olajmennyiség a felvétel %-ában mindhárom bevonattípus esetén közel azonos, gyakorlatilag közelíti a nullát. Ez azt jelenti, hogy az extrém közeli szórási távolságról felvitt rétegek önkenő képessége megszűnik, a felvett olaj csak folyamatos rétegekopás esetén tud kenőhatást kifejteni.

A 4.21. ábra szemlélteti a 260 mm-ről szórt kísérletek eredményeinek statisztikai feldolgozását. Az eredmények jelentősen eltérnek az ideális szórási - normál szórási - távolságnál (180mm) kapott eredményektől, de eltérő jelenségek figyelhetők meg a szélsőségesen rövid szórási távolság eredményeitől is. Megállapítható, hogy:

- Olajfelvétel szempontjából a növelt szórási távolság és a normál távolságú szórás között nagy eltérés nem mutatkozik, a $40 \times 10^{-6} \text{ g/mm}^3_{\text{bevonat}}$ körüli olajfelvétel mindhárom bevonat esetén mérhető volt.

- A DuroTec 19910 és LubroTec 19985 próbatestek esetén a mérési eredmények szórása csökkent a normál illetve rövidtávolságú felszórási eredményekhez képest, míg HardTec 19400 szórása és olajfelvétele is jelentősen megnőtt.
- Az olajleadó képesség a normál felszórási távolsághoz képest csökkent, közel a tizedére.
- Az olajleadó képesség – annak ellenére, hogy tizede a normál szórási távolság eredményeinek – a HardTec 19400 és DuroTec 19910 esetében közel háromszorosa a rövid (100mm) szórási távolságnál tapasztalt értékeknek.



4.21. ábra. 260 mm szórási távolságról felvitt bevonatok fajlagos olajfelvevő és leadó képessége

A növelt szórási távolsággal létrehozott porózus bevonatok esetén is igaz az, ami a csökkentett szórási távolságra jellemző, hogy önkenő képesség csak akkor várható el a felülettől, ha folyamatos kopás van a tribológiai rendszerben, ami a felvett kenőolajat folyamatosan felszabadítja. Ez az alkalmazhatóságukat jelentősen korlátozza.

4.7.1. A kenőolaj felvétel- és leadás valamint a porozitás kapcsolata

Az olajfelvevő és leadó képességek magyarázatára célszerű megvizsgálni a porozitást, majd a felületi energia viszonyokat, hiszen az olajbejutást a porózus rétegszerkezetbe alapvetően befolyásolja a tényleges szerkezet és a felület összetétele.

A szórt réteg metszetében készült csiszolat alapján, a porozitás %-os értékelésére kitértem a 4.3. részben, a tömörségi vizsgálatok kapcsán. Statisztikai szoftver segítségével összehasonlítottam az egyes szórási távolságokhoz tartozó porozitási értékeket és a kenőanyagfelvevő- leadó képességet.

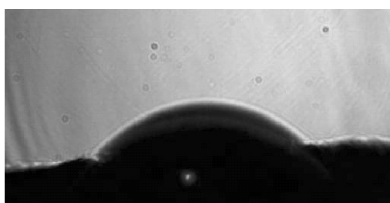
Ez alapján megfogalmazható, hogy a réteg belső szerkezetét jellemző porozításra alkalmazott digitális képfeldolgozási eredménynek és az olajfelvétel-leadás között nincs közvetlen korreláció. Ezek a tapasztalatok egyértelműen rávilágítanak a valós felület meghatározó szerepére, ezért a felület tulajdonságait – energia viszonyok, összetétel – kell a továbbiakban kutatni, hogy a kenőolajleadó és felvevő képesség mérési eredményeire magyarázatot lehessen adni.

Ismert az anyagtudományból, hogy a tömbi anyagszerkezet szinte mindig eltér a felülettől. A felületi réteg kémiai összetétele és energetikai elemzése, a kettő közötti kapcsolat feltárása további magyarázattal szolgálhat a kenőolajfelvevő és leadó képességre.

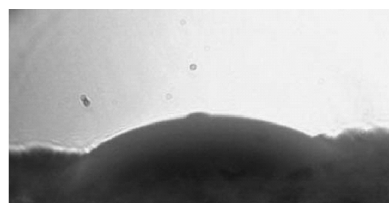
4.7.2. A felszört rétegek adhíziós képessége, felületi szabadenergia

A DuroTec 19910, HardTec 19400 és LubroTec 19985 porötvözeteimmel tesztfelületeket szórtam az ideális 180 mm szórási távolságról (a 4.7. fejezet egyértelműen bizonyította, hogy gyakorlat szempontjából csak az olajleadó képességgel is rendelkező próbatestekkel érdemes további kutatásokat végezni). Hasonlóan a szilárdsági statisztikai elemzésekhez, öt-öt próbatestet készítve minden méréshez – a csepp-próba peremszög mérés elvégezhető volt. A felszórás után semleges gázlánggal a felületi réteg beolvasztásra került csak épp egy záróréteg létrehozására, mely szükséges a peremszög mérési módszer elvégzéséhez (zárt, sík felület).

A 4.22/a ábra a DuroTec 19910 porötvözet beolvasztott felületén ülő vízcseppet, míg a 4.22/b ábra a dijódmétán csepp szemlélteti.



4.22/a. ábra. Ülő vízcsepp a felületen



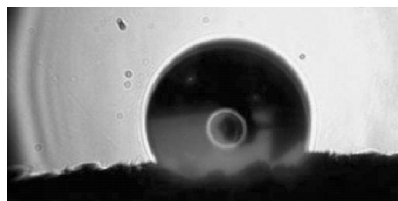
4.22/b. ábra. Ülő dijódmétán csepp a felületen

A 4.23. ábra a HardTec 19400 19400 porötvözet beolvasztott felületén ülő vízcseppet szemlélteti.

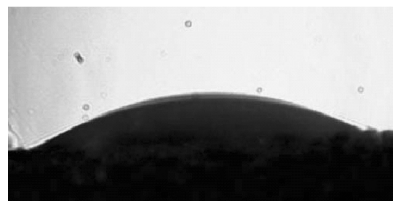


4.23. ábra. HardTec 19400 porötvözet beolvasztott felületén ülő vízcsepp

A 4.24/a ábra a LubroTec 19985 porótvözet beolvasztott felületén ülő vízcsepp, míg a 4.24/b ábra a dijódmetán cseppet szemlélteti. A mért peremszögek értékeit a 4.10 táblázat tartalmazza. A táblázatban feltüntettem a pereszögekből OWENS és WENDT (1969) módszerével számított felületi energia, valamint a poláris és apoláris (vagy diszperziós) komponensek értékeit.



4.24/a. ábra. Ülő vízcsepp a LubroTec felületen



4.24/b. ábra. Ülő dijódmetán csepp a LubroTec felületen

Látható, hogy a bevonatok felületi energiája a következő sorrendben nőtt: LubroTec < HardTec < DuroTec. A felületi energia domináns komponense LubroTec 19985 esetében a poláris komponens, míg DuroTec 19910 és HardTec 19400 esetében a diszperziós komponens volt.

4.10. táblázat. A csepppróba peremszög-értékei, a számított felületi energia és komponensei (180 mm-es szórási távolság)

Bevonat	Víz peremszög (°)	Dijódmetán peremszög (°)	Felületi energia mJ/m ²	Poláris komponens mJ/m ²	Diszperzív komponens mJ/m ²
DuroTec	50±2	30±7	57.0	14.4	42.7
HardTec	86±7	≈0.5	52.0	1.2	50.8
LubroTec	106±7	36±6	41.3	41.1	0.2

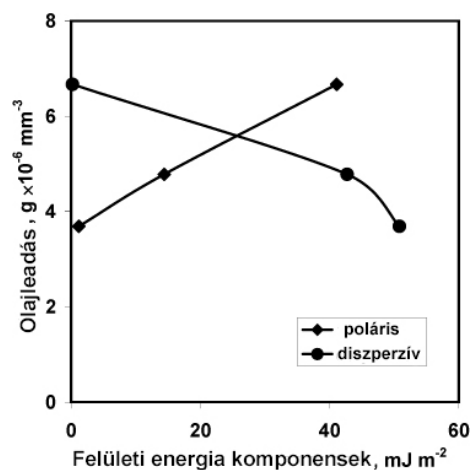
A 4.25. ábra az olajleadás és a felületi energia komponensei közötti összefüggést szemlélteti. Látható, hogy az olajleadás nő a poláris komponens növekedésével és a diszperziós komponens csökkenésével. A legjobb kenési - azaz legnagyobb olajleadási - jellemzőkkel rendelkező LubroTec 19985 bevonat felületi energiájának a legnagyobb a poláris és a legkisebb a diszperziós energia-komponense (4.10. táblázat).

4.7.3. Felületi energia komponensek és réteg-összetétel kapcsolata

A felületi réteg kémiai összetételének ellenőrzésére XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) kiegészítő méréseket is végeztem, hogy a felületi energia komponensek és az összetétel kapcsolatát is vizsgálhassam.

A 4.7.2. részben ismertetett LubroTec 19985 eredmény – növekvő poláris komponens növekvő olajleadással jár - egyben azt is jelenti, hogy a vizsgált bevonatok közül a LubroTec 19985 felülete a legkevésbé oleofil. A LubroTec

19985 bevonatnak ez a tulajdonsága a felület kémiai összetételével magyarázható: a 4.11. táblázat – XPS mérések eredményei - tanúsága szerint ennek a bevonatnak a felületén a legnagyobb az ötvözetképző fémek együttes koncentrációja és a legkisebb a nemfémek együttes koncentrációja.



4.25. ábra. Az olajleadás és felületi energia komponensek kapcsolata

A 4.11. táblázat eredményei felhívják a figyelmet arra, hogy a szórási technológia eredményeként létrejövő felület kémiai összetétele eltérő a porösszetétel jellemző arányaitól. Ez azt is bizonyítja, hogy az eredeti porösszetétel és a kenőanyagfelvevő képesség között nehéz kapcsolatot kimutatni és tervezni, hiszen a kenőanyagfelvevő- és leadó képesség szempontjából meghatározó a szórás utáni felület összetétele, annak poláris és diszperzív energetikai komponensei.

4.11. táblázat. A felületi réteg összetétele normál szórási távolág (180mm) esetén, XPS mérés (m%)

Bevonat	O	C	Ni	Cr	Fe	Mo	B	Si	P
DuroTec	39.7	14.1	12.1	9.9		0.9	6.3	13.3	3.6
HardTec	38.1	8.4	10.6	12.1	8.9	0.9	4.7	12.8	3.4
LubroTec	30.4	12.5	27.5	18.1				11.5	

4.8. Új tudományos eredmények

Feltételek:

A hideg fémposztrási technológia szélsőséges üzemi alkalmazási területeihez kiválasztottam három jellemző porötövet, melyek karakteresen jellemezhetők a kémiai összetételükkel.

- HardTec 19400 - kemény bevonat, abrázációs hatások elleni védelem (meghatározó: Fe 78,1 %, Cr 15,8 %, Ni 1,08 %), továbbiakban „HardTec összetétel”.
- LubroTec 19985 - kiemelt siklási követelmények (meghatározó: Ni 74,7%, Cr 15,42%, Fe 8,35 %), továbbiakban „LubroTec összetétel”.
- DuroTec 19910 - szívós és kemény bevonat a dinamikus terhelhetőség kihasználása (meghatározó: Ni 84,61 %, Cr 9,35 %, Si 4,8 %, Fe 2,05 %, B 1,1 %), továbbiakban „DuroTec összetétel”.

A szakirodalmi és gyártói technológiai paramétereket betartva, egy technológiai jellemző változtatásának - a felszórási távolság – a függvényében értékeltem a vizsgálati eredményeket. Az általánosan ajánlott 180 mm-t kiterjesztettem 220 és 260, illetve 140 és 100 mm szórási távolságra. Ezek alapján a szilárdsági, olajfelvétel- és leadási, valamint felületi energia vonatkozásában megfogalmaztam az alábbiakat.

1. tézis.

A Vickers-ellenőrzésen alapuló tömörségi vizsgálattal (felületi és metszeti keménységértékek együttes értékelése) megállapítottam, hogy a porózus szórt réteg tömörsége a szórási távolságra érzéketlen, csak a szórási távolság szélső értékeinél volt tapasztalható 5 – 10%-os keménység csökkenés. Ez az eredmény nem korrelál a digitális képfeldolgozáson alapuló porozitás-változás eredményeivel, így a keménységcsökkenés elsősorban a szemcse szerkezet teherviselő képességét befolyásoló egyéb tényezők (szemcsealak-, méret, szemcsefelületi adhézió...stb) együttes hatása. Továbbá megállapítottam, hogy a szórási távolság változtatása nem jár repedésveszély növekedéssel.

2. tézis.

Megállapítottam, hogy adott szórási távolság esetén felvett, a szórt réteg metszetében értelmezett mikrokeménység eloszlás egyenletes a 180 mm-es szórási távolságon, a $\Delta\mu\text{HV}$ sáv (keménységértékek terjedelme) $< 10\%$ a mért maximális μHV értékhez képest. A szórási távolság szélső értékeinél meghatározott trendeknél a $\Delta\mu\text{HV}$ sáv 10-20%-ra nő anyagfüggően, mindemellét az átlagos keménység csökken az 1. tézispontban megfogalmazottak szerint. A csökkenés mértéke a Ni, Cr, Si és Fe meghatározó komponenseket tartalmazó porötvetnél volt jelentősebb.

3. tézis.

A Nádasi-féle módszerrel végzett normál irányú kötőszilárdsági vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a kötőszilárdságot a szórási távolság befolyásolja, eltérő mértékben és jelleggel a különböző porötvözetek esetében, az alábbiak szerint:

3/a. A „DuroTec összetételű” porötvözzel szórt réteg normál irányú kötőszilárdsága a szórási távolság növelésére érzékeny. A 180 mm optimális szórási távolsághoz képest a távolság növelése a szilárdság csökkenését eredményezi, a trend másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,0002x^2 + 0,0513x + 5,9378$$

A szórási távolság csökkentése átlagban nem változtatja meg a kötés szilárdságát, de a megnőtt mérési eredmény szórások a technológia bizonytalanságát jelzik csökkentett szórási távolság esetén. A 180 mm szórási távolságtól való eltérés kevésbé hátrányos, ha az a szórási távolság csökkenésével jár.

3/b. A „HardTec összetételű” bevonattal szórt réteg normál irányú kötőszilárdság átlagértékei a szórási távolság csökkentése esetén enyhén növekedtek a mérési eredmények szórásával együtt. A szórási távolság növelése jelentősen csökkenti a normál irányú kötőszilárdságot. A trend másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,0003x^2 + 0,0127x + 19,69$$

Definiáltam a szórási távolság intervallumot, mely a normál irányú kötőszilárdság szempontjából a „HardTec összetételű” pornál 140 – 180 mm közötti érték.

3/c. A „LubroTec összetételű” porötvözzel szórt réteg normál irányú kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében, a HardTec és DuroTec összetétellel ellentétes trendet eredményez. A „LubroTec összetételű” szórt réteg szilárdsága a szórási távolság csökkentése esetén erősen csökken, míg a szórási távolság növelése kevésbé csökkenti le a kötőszilárdságot. A trend másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,0005x^2 + 0,2374x - 11,315$$

A szórási távolság intervalluma értelmezhető, javasolt értéke 180 – 220 mm közötti.

4. tézis.

A METCO-féle nyíró kötőszilárdsági méréseimmel igazoltam, hogy a felszórási távolság befolyásolja a nyíró kötési szilárdságot, eltérő mértékben mindhárom porötvözet esetén, de ez a befolyásoló hatás nem egyezik meg a normálirányú kötőszilárdság trendjeivel.

4/a. A „DuroTec” réteg nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság növelésére érzékeny. A 180 mm optimális szórási távolsághoz képest a távolság növelése a szilárdság csökkenését eredményezi, mely másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,0016x^2 + 0,4929x + 3,0839$$

A szórási távolság csökkentése átlagban alig 10%-kal csökkentette a kötés szilárdságát, a mérési eredmények szórásai közel azonosak (relatív szórások 4- 5,5%). Megállapítottam, hogy az optimális felszórási távolság intervallumon belül a „DuroTec összetételű” porötvtözetrel szórt rétegek nyírószilárdsága 4,4-szerese a normálirányú kötőszilárdságnak. Ez az arány más szórási távolságok esetén kisebb.

4/b. A „HardTec összetételű” bevonattal szórt réteg nyíró kötőszilárdság átlagértékei a szórási távolság csökkentése esetén kis mértékben, alig 5%-kal csökkentek, a mért értékek szórása sem változott kedvezőtlenül. A szórási távolság növelése csökkenti a nyíró kötőszilárdságot. A trend másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,0012x^2 + 0,3517x + 22,356$$

Ennél a porötvtözetnél a javasolt optimális szórási távolság intervalluma 150 - 190 mm.

4/c. A „LubroTec” réteg nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság függvényében, a „HardTec és DuroTec” bevonatokkal ellentétes trendet eredményezett, mely másodfokú polinommal közelíthető.

$$y = -0,001x^2 + 0,3815x + 23,167$$

A „LubroTec összetételű” bevonat nyíró kötőszilárdsága a szórási távolság csökkenésére érzékenyebben változik (erősebben csökken), mint a felszórási távolság növelése esetén. A nyíró kötőszilárdság szempontjából javasolt a gyártói 180 mm körüli szórási távolság betartása.

5. tézis.

Méréseim alapján megállapítottam a három porötvtözet szilárdsági értékeit összehasonlítva, hogy a „DuroTec összetételű” bevonat esetében mért kisebb nyíró szilárdsági értékek – hasonlóan a normál irányú szilárdsági értékekhez – igazolják azt, hogy a porötvtözet tulajdonságait meghatározó fő ötvözők (C, Ni, Cr, Fe) mellé adalékolt szilícium és bór diffúzív hatása hideg fémforszórás esetén nem, vagy csak gyengén érvényesül. A mérési eredmények bizonyították, hogy hideg fémforszórás esetén a B és Si diffúziós képessége az anyagi és technológiai rendszer, az ötvözet szerkezet és felszórási eljárás által erősen befolyásolt és korlátozott.

6. tézis.

XPS mérésekkel igazoltam, hogy a szórás utáni felület kémiai összetétele eltér az eredeti porösszetételektől, mely kihat a kenőanyagfelvevő- és leadó képességre. Megállapítottam, hogy a felület a vizsgált poroknál a hidegszórási művelet hatására Fe-ben szegényedik, míg B, C, és Si dúsulás következik be. Ez igazolja továbbá az 5. tézispontban megfogalmazott, a B és Si eredeti kötőszilárdság javító szerepének gátoltságát is.

7. tézis.

Megállapítottam, hogy a szórt porózus rétegek kenőolajleadó képessége legnagyobb a normál szórási távolság esetén, a szórási távolság változtatása drasztikusan lecsökkenti az olajleadó képességet. Méréseimmel igazoltam, hogy az olajleadó képesség növekszik a felületi energia poláris komponensének növekedésével és a diszperzív komponens csökkenésével. A legnagyobb olajleadást a LubroTec 19985 réteg biztosította, melynek legnagyobb a poláris energia komponense és legkisebb a diszperzív energia komponense, továbbá legmagasabb a fémes összetevő komponens aránya.

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A szakirodalmi áttekintésből kiderült, hogy a különböző porötvözetekhez a gyártók részletes ajánlásokat mellékelnek a javasolt felhasználási területekről és a várható bevonat tulajdonságokról (pl. DurOptik diagram).

A gyakorlati alkalmazás szempontjából kiemelkedően fontos tény, hogy a porok felszórása főleg kézi technológiával készül, hiszen ez adja a gyorsaságot, rugalmasságot az eljáráshoz. A kézi eljárás mindig tartalmaz szubjektivitást, ebből következik, hogy a legtöbb porösszetétel esetén javasolt szórási távolság, mint abszolút érték, nem tartható be.

A kereskedelmi forgalomban hideg fémportszórásra ajánlott porok közül behatóan három, alapvetően eltérő porcsoportot képviselő porötvözetet, mely a hidegen szórt alkatrészek legszélsőségesebb alkalmazási körülményeire ajánlottak és siklófelületként is funkcionálnak.

- Kutató munkám során, a három jellegzetesen használt hidegszórási porösszetétel esetén vizsgáltam a szórási távolság komplex hatását a bevonat tulajdonságaira, melynek összegzése az 5.1. táblázatban található.

Az 5.1. táblázat kapcsán megfogalmazható, hogy az ajánlott normál szórási távolság változtatásának hatása:

- nem jelentős a mikrokeménység, repedéskeletkezés szempontjából
- bizonyos korlátok között elfogadható kötőanyagviselkedési szempontok alapján
- nem elfogadható kenőanyagleadó képesség szempontjából.

Az 5.1. táblázati összefoglalás a hideg fémportszórési technológia alkalmazásának pontosabb tervezését (HardTec 19400, LubroTec 19985, DuroTec 19910), az előállított porózus felületi bevonatok használhatóságának kiterjesztését jelenti a mérnöki gyakorlatban.

5.1. táblázat. Kutatási eredmények áttekintő táblázata

megfelelő					
Elfogadható		Kismértékű gyengülés		Gyenge, nem elfogadható	
	Szélsőségesen csökkentett szórási távolság, 100 mm	140mm szórási távolság	Normál szórási távolság, 180 mm	220mm szórási távolság	Szélsőségesen növelt szórási távolság, 260 mm
	← Csökkentett szórási távolság			→ Növelt szórási távolság	
Tömörség					
DuroTec 19910					
HardTec 19400					
LubroTec 19985					
Repedésvizsgálat					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					
Keménység eloszlás a szórt rétegben					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					
Normál irányú kötőszilárdság					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					
Nyíró szilárdság					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					
Kenőolaj felvevő képesség					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					
Kenőolaj leadó képesség					
DuroTec19910					
HardTec19400					
LubroTec 19985					

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A termikus szórással kialakított felületek technológiája az elmúlt évtizedekben látványos fejlődésen ment keresztül, és a fejlesztés napjainkban sem állt meg. A módszer olyan kiemelt műszaki alkalmazásokban is használatos, mint a sugárhajtómű alkatrészek felújítása, javítása.

Kutatási programomban a hideg fémporozási eljárásra, azaz a porózus szerkezetű felületi bevonatok vizsgálatára helyeztem a hangsúlyt. Normál üzemben megkopott tengelyek, általában siklócsapágy felületek, vagy jól beazonosítható egyéb súrlódó felületek felújítására elterjedt módszer a hideg fémporozás. A technológia fő előnye, hogy ötvözött tengelyek esetén is alkalmazható, mivel 200 – 300 °C-nál nagyobb hőhatás elkerülésével az edződés, szövetszerkezeti változás elkerülhető.

Kutatási programomban a kereskedelmi forgalomban hideg fémporozásra ajánlott porok közül behatároltam három, alapvetően eltérő porcsoportot képviselő porötvözetet, mely a hidegen szórt alkatrészek legszélsőségesebb alkalmazási körülményeire ajánlottak és siklófelületként is funkcionálnak.

- HardTec 19400,
- LubroTec 19985,
- DuroTec 19910

A kiválasztott porokkal az alábbi kutatásokat végeztem el:

Poronként szórasi- felhordási kísérletek elvégzése, melynek során vizsgáltam a rétegek tömörségét (porozitását), keménységét, kötésszilárdságát, a felületi energia viszonyait, a kenőanyag felvevő- és leadó képességet úgy, hogy több szórasi távolságot is alkalmaztam, mely kézi technológia esetén az egyik legszubsjektívebb technológiai paraméter. A kísérleteim fő változója:

- általánosan javasolt, gyártói szórasi távolság (180 mm),
- szélső értékben 40%-kal növelt szórasi távolság,
- szélső értékben 40%-kal csökkentett szórasi távolság és
- további szórasi távolságok alkalmazása a szélsőértékek között

A felszórt rétegeket értékeltem szerkezeti, mechanikai, felületi energia és kenőolajfelvevő- és leadó tulajdonságok alapján. A kapott mérési eredmények feldolgozása alapján, a felszórtasi távolság és a rétegek tulajdonságai közötti trendeket és összefüggéseket állapítottam meg. Feltártam az egyes porösszetételek közötti hasonlóságok és technológiai jellemzők közötti kapcsolatokat. Pontosítottam az egyes porokhoz kapcsolódó technológiai ismereteket a karbantartási adatbázisokban való megjelenítéshez.

A kutatás eredményei leegyszerűsítve a technológiai tervezés adatbázisát szélesítik, ami a sikeresebb porösszetétel választást, hosszabb élettartamú és megbízhatóbb tengelyfelújítást eredményez. Mindezen túl, a kísérleti sorozatok értékelése olyan trendek is rávilágít, amely a porösszetételek fejlesztését is szolgálja, a termikusan felszórt tengelyek komplex technológiai kivitelezését támogatja a karbantartás tervezésétől a selejtezésig, és jelenleg nem, vagy korlátozott mértékben elérhető információt képviselnek a szakterületen.



SUMMARY

The technology of surfaces produced with thermal spraying underwent on spectacular development in the past decades and the development goes on nowadays, too. The method is also used at such advanced technical application as renewing, repairing parts of jet propelled power plant. I have put the emphasis on my research work, to the cold flame spraying that is on the examination of surface coatings with porous structure. The cold flame spraying is a wide-spread method renewing shafts worn in normal work renewing sliding bearing surfaces, or other sliding surfaces well identifiable. The main advantage of the technology is it can be also used in case of alloyed shafts as avoiding heat effect higher than 200-300°C the get hardening, the texture change can be avoided.

I have selected three basically different powder alloys representing various powder groups suggested for cold flame spraying in my research program suggested for the most extreme application of parts sprayed with cold technology and they function as sliding surface, too.

- HardTec 19400,
- LubroTec 19955,
- DuroTec 19910.

I have carried out the following research-work with the powders chosen:

Performing spraying-application tests during which I examined the density (porosity), the hardness, the bond strength, the conditions of surface energy, the adsorption – and release capacity of lubricant of surface layers by applying several spraying distances which is the most subjective technological parameter in case of manual technology.

The main variable of my tests are:

- generally suggested, producers' spraying distance (180 mm),
- increased with 40% the spraying distance in extreme value,
- reduced with 40% the spraying distance in extreme value, and
- using further spraying distances between extreme values.

I have evaluated the layers sprayed on the basis of structural, mechanical, surface energy and of lubricant oil adsorption – and emission characteristics. Based on processing the measuring results got I have established trends and connections between the characteristics of layers and spraying distances. I revealed the connections between the similarity of certain powder compositions and technological characteristics. I made more exact the technological knowledge connected to certain powders for representing in the service data base. The results of the research-work simplifying widen the data base of technological planning resulting more successful selection of powder compositions, supporting the complex technological operation of the shafts thermally sprayed from the service planning to the rejection and presently don't represent or represent only in limited degree attainable information on the professional field.



MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

ABRAMOV V. V. (1961): Residual Stresses and Deformation, in Metals (in Russian) (Mashgiz, Moskva, (USSR).

ASTM E 341-73* -szabvány

BACH F. W., MÖHWALD K., LAARMAN A., WENZ T. (2006): Modern Surface Technology (120 page) WILEY-VCH.

BACH F.-W., LAARMANN A., WENZ T. (Eds.) (2004): Modern Surface Technology, Wiley-VCH, Weinheim.

BARBEZAT G. (1989): Hochgeschwindigkeits-Flammspritzten von Schutzschichten. Metalloberfläche, 43, pp 459-466.

BEARD K. V., PRUPPACHER H. R. (1969): A determination of terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. Journal Atmospheric Science, 26, pp 1006-1072.

BHUSHAN B., GUPTA B. K. (1991): Handbook of Tribology: Material Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, New York.

BOURDIN E., FAUCHAIS P., BOULOS M. I. (1983): Transient heat conduction un plasma conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer, 26, pp 567-582.

BUSSE K. H. SOBBE H. (1989): Spray particle behaviour during atmospheric arc spraying. 12th International Thermal Spraying Conference, London, UK, 4-9 June, Paper 35.

CAMBRAY P. (1977): Mesure de vitesse dans les jets de plasma. Revue de Physique Applique, 12, pp 1039-1042.

CAPITELLI M., FIOCEILI E., MOLINARI E. (1969): Equilibrium compositions and thermodynamics properties of mixed plasmas, University of Bari, Bari, Italy.

CAPITELLI M., FIOCEILI E., MOLINARI E. (1972) Equilibrium compositions and thermodynamics properties of mixed plasmas, University of Bari, Bari, Italy.

CAPITELLI M., GORSE C. FAUCHAIS P. (1976): Transport coefficients of Ar-H₂ high temperature mixtures. Journal de Chimie Ph., 73, pp 755- 759.

CAPITELLI M., GORSE C. FAUCHAIS P. (1977): Transport coefficients of high temperature N₂-H₂ mixtures, Le journal de Physique, 38, pp 653-657.

CARSLOW H. S., JAEGER J. C. (1959): Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, Oxford, England.

CASTOLIN – EUTECTIC (1981): Termékek és eljárások katalógusa. GTI. 1981.

CASTOLIN + EUTECTIC S. A. (1984): Easy-to use precision tool for "hot" or "cold" E + C TeroCote Wear - preventive coatings Svitzerland, Lausanne.

CHYOU P., PFENDER E. (1989): Behaviour of particulates in thermal plasma flow. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 9, pp 45-71.

CIROLINI S. (1991): Computer simulation of plasma sprayed coatings, I -Coating deposition model. Surface and Coating Technology, 48, pp 137-145.

CIROLINI S. (1994): Modelling the microstructure of thermal barrier coatings. Proceedings of Symposium on Materials. Design and Analyses, New Orleans, USA, 23-26 January.

CLEMENT R. (1970): SFEC France Paris: Cord for Coating by Bloppe Prjection US Patent No.: 3,503, 844 Marc. 31.

DALLAIRE S., DUFOUR M., GAUTHIER B. (1993): Characterization of wear damages in coatings by optical profilometry. 5th National Thermal Spray Conference, Anaheim, California, USA, 7-11 June, pp 493-498.

DAVIS J. R. (Ed.) (2004): Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH.

DEVOTO R. S. (1967): Transport coefficients of partially ionized argon. The Physics of Fluids, 10, pp 354-364.

DIN EN 657: 2005-05 Termiches Spritzen - Begriffe, Einteilung; Deutsche Fassung EN 657:2005

DITTRICH F. J., SHEPARD A. P. (1967): Flame Spraying Exothermically Reacting Intermetallic Compaund Forming Composites US Patent No. 3, 322, 515 May 30.

EL-KADDAH N., MCKELLIGET J., SZEKELY J. (1984): Heat transfer and fluid flow in plasma spraying. Metallurgical Transactions B, 15B, pp 59- 70.

ELSING R., KNOTEK O. (1985): Modellrechnungen zum Einfluß des lamellaren Aufbaus von thermisch gespritzten Schichten auf deren mechanisches Verhalten. Metall, 39, pp 231-235.

EMBER M., JÁNOSSY GY., SZIJÁRTÓ O. (1983): Mezőgazdasági gépek javítása. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.

ENGLAND G.: Independent Metallurgist & Consultant to the Thermal Spray Coating Industry. Nature of Thermal Spray Coatings

ESAB KFT: A hegesztéses javítás és karbantartás kézikönyve. Budapest.
www.esab.hu

FANTASSI S., VARDELLE M., FAUCHAIS P., MOREAU C. (1992): Investigation of the splat formation versus different particulate temperatures and velocities prior to impact. 13th International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, 28 May-5 June, pp 755-760.

FARKAS F., FARKAS F. J. (1997): Ragasztási kézikönyv, Budapest: Műszaki Könyvkiadó.

FARKAS L. (1984): Fémszórás alkalmazási lehetőségei az építőipari gépalkatrészek felújításakor. Szakmérnöki diplomaterv, Budapest, 1984.

FAUCHAIS PCOUDERT., J. F., VARDELLE A. M., DENOIRJEAN A. (1993): Diagnostics of thermal plasma jets. In: Plasma Spraying, ed. R. Suryanarayanan (World Scientific, Hong Kong), pp 61-95.

FAUCHAIS PCOUDERT., J. F., VARDELLE A. M., LESINSKI J. (1984) Diagnostics under thermal plasma conditions. Material. " Research Society Symposium Proceeding.", 30, pp 37-51.

FERRARI M. (1991): Computer simulation of plasma sprayed coatings II. Effective bulk properties and thermal stress calculations. Surface and Coatings Technology, 48, pp 147-154.

FINCKE J. R., SWANK W. D., JEFFREY C. L. (1990): Simultaneous measurement of particle size, velocity and temperature in thermal plasmas. IEEE Transactions on Plasma Science, 18, pp 948-957

FISHER I. A. (1972): Variables influencing the characteristics of plasma sprayed coatings. International Metallurgical Reviews, 17, pp 117-129.

FISZDON J., GAUK W., DANIAULT J. (1976): Mesures des parametres du jet de plasma pour plasmatron de projection. *Revue Internationale des Hautes Temperatures et Refractaires*, 13, pp 11-15.

FISZDON J., LESINSKI J. (1975): Acceleration et fusion des grains dans un jet de plasma d'argon-hydrogene. *International Round Table on Study and Applications of Transport Phenomena in Thermal Plasmas*, Odeillo, France, 12-16 September, Paper IV.1.

FRANK J. H. (2001): *Thermal Spray Terminology and Company Origins*, First Printing 2001, ASM International, Materials Park OHIO USA

FRIND G., GOODY C. P., PRESCOTT L. E. (1983): Measurements of particle velocity in two low pressure plasma jets. *6th International Symposium on Plasma Chemistry*, Montreal, Canada, 24-28 July, Paper A-4-5.

GRAINGER S. (1992): *Engineering Coatings - design and application* Abington Publishing.

GRAINGER S., BLUNT J. (Eds.) (1998): *Engineering Coatings: Design and Applications*, 2nd ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

HABIB K. A., SAURA J. J., FERRER C., DAMRA M. S., GIMÉNEZ E., CABEDO L. (2006): Comparison of flame sprayed Al₂O₃/TiO₂ coatings: Their microstructure, mechanical properties and tribology behavior, *Surface Coating Technology* 201, pp 1436-1443.

HANTZSCHE H. (1971): Bedeutung der Pulverfördergeschwindigkeit beim Plasmaspritzen. *Sch.technik*, 21, pp 399-403.

HANTZSCHE H. (1973): Temperature measurements of powder particles in a plasma jet. *7th International Metal Spraying Conference*, London, UK, 10-14 September, Paper 16.

HARTMANN V., FELKER J., KALMÁR V., HORVÁTH G. (1986): *Mezőgazdasági gépalkatrészek felújítása*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

HERMANEK F. J. (2001): *Thermal Spray Terminology and Company Origins*, First Printing, ASM International, Materials Park OHIO USA.

HERMANSSON L., EKLUND L., ASKENGREN L., CARLSSON, R. (1985): On the microstructure of plasma-sprayed chromium oxide. Unpublished data.

- HOUBEN J. M. (1976): Some remarks on plasma spraying powder injection techniques. 8th International Thermal Spraying Conference, Miami Beach, Florida, USA, 27 September-1 October, pp 68-77.
- HOUBEN J. M. (1988): Relation of the adhesion of plasma sprayed coatings to the process parameters size, velocity and heat content of the spray particles. PhD Thesis, Technical University of Eindhoven, Eindhoven, Holland.
- HÖHLE H. M. (1983): Optimization of electric arc and flame spraying conditions by application of high-speed cinematography. 10th International Thermal Spraying Conference, Essen, Germany, 2-6 May, pp 146-148.
- INGO G. (1985, 1991): Origin of darkening in 8 wt.% yttria-zirconia plasma sprayed thermal barrier coatings. *Journal of American Ceramic Society*, 74, pp 381-386.
- JANIK J. szerk. (2001): *Gépüzemfenntartás I. Főiskolai Kiadó, Dunaújváros.*
- JANIK J. szerk. (2001): *Gépüzemfenntartás II. Főiskolai Kiadó, Dunaújváros.*
- JONES H. (1971): Cooling, freezing and substrate impact of droplets formed by rotary atomization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, pp 1657-1660.
- JOSHI S. V., PARK J. Y., TAYLOR P. R. RICHARDSON L. S. (1986b) Particle gas mass transfer under plasma conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29, pp 1565-1573.
- JOSHI S. V., PARK J. Y., TAYLOR P. R. RICHARDSON L. S. (1986a): Knudsen effect on plasma-particle mass transfer. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 6, pp 281-298.
- JOSHI S. V., SIVAKUMAR R. (1993): An analytical approach to plasma spraying. In: *Plasma Spraying*, ed. R. Suryanarayanan (World Scientific, Singapore), pp 121-141.
- KISS F., VLADÁR T. (1975): Új megtakarítási lehetőségek a javító és karbantartó hegesztés alkalmazásával I-III. *Korszerű technológiák. 1975/5-6. 1976/3. és az 1977/4.*
- KITAHARA S., HASUI A. (1974): A study of bonding mechanism of sprayed coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 11, pp 747-753.
- KNOTEK O. ELSING R. (1987): Monte Carlo simulation of the Lamellar structure of thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 32, pp 261-271.

KRETZSCHMAR E. (1981): Neue Erkenntnisse aus dem Gebiet des Thermischen Spritzens. Schweißtechnik /Berlin/.

KRETZSCHMAR E. (1962): Metall-, Keramik- und Plassspritzen VEB Verlag Technik Berlin.

KRUSZEWSKA B. LESINSKI J. (1977): Temperature distributions of solid particles in a plasma stream. *Revue de Physique Appliquee*, 12, pp 1209-1211.

KUDINOV V.V. (1977): Plasma Coatings, Izdatelstvo Nauka, Moscow, USSR (in Russian)

KULIK A. J., NIKITIN M. D., KOLESZNIKOVA V. SZ. (1977): Gazotermiceszkoe napülenie iznoszosztojkijh pokritij aljuminevüh porsnej dizelej B. Kn.: Diffuzionnoe naszisenie i pokritija na metallah. Nauka Dumka, Kiev 1977. c. 81-84.

KURODA S. (1992): Significance of the quenching stress in the cohesion and adhesion of thermally sprayed coatings. 13th International Thermal Spraying Conference, Orlando, Florida, USA, 28 May-5 June, pp 903-909.

KURODA S., CLYNE T. W. (1991): The quenching stresses in thermally sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 200, pp 49-66.

LEWIS J. A., GAUVIN W. H. (1973): Motion of particles entrained in a plasma jet. *AIChE Journal*, 19, pp 982-990.

MADEJSKI J. (1976a): Solidification of droplets on a cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, pp 1009-1013

MAEV R. GR., LESHCHYNSKY V. (2008): Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray: Physics & Technology, Wiley-VCH, Weinheim.

MCHUGH K. M. (é.n.) Near-Net-Shape Manufacturing: Spray-Formed Metal Matrix Composites and Tooling, Idaho National Engineering Laboratory.

MCKELLIGET J., SZEKELY J., VARDELLE J. M., FAUCHAIS P. (1982): Temperature and velocity fields in a gas stream exiting a plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2, pp 317-332.

MCPERSON R., CHEANG P. (1989): Microstructural analysis of Ni-Al plasma sprayed coatings. 12th International Thermal Spraying Conference, London, UK, 4-9 June, Paper 17 .

MCPHERSON R. (1981): The relationship between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 83, pp 297-310.

MCPHERSON R., SHAFER B. V. (1982): Interlamellar contact within plasma sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 97, pp 201-204.

MEYER H. (1962): Das Verhalten von Pulvern im Plasmastrahl. *Berichte Deutsche Keramische Gesellschaft*, 39, pp 115-124.

MEYER H. (1964): Über das Schmelzen von Pulvern im Plasmastrahl. *Berichte Deutsche Keramische Gesellschaft*, 41, 112-118.

MOGUL Metallizing Flame Spraying Manual First Edition Chicago 1963.

MOLNÁR A. (1979): Szóró-felrakó technológiák. Oktatási segédlet NME Miskolc.

MOLNÁR A. (2002): Termikus szórás. Miskolci Egyetem. Oktatási segédlet.

MOLNÁR A. (2003): A termikus szórás alkalmazása és annak előnyei. Egyetemi előadás kézirat. Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Kar.

MOLNÁR A. (2003): A termikus szórás eljárásai. Egyetemi előadás kézírata, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki kar.

MOREAU C., CIELO P., LAMONTAGNE M., DALLAIRE S., KRAPEZ J. C., VARDELLE M. (1991): Temperature evolution of plasma sprayed niobium particles impacting on a substrate. *Surface and Coating Technology*, 46, pp 173-187.

MORRIS C., RUDIS R. P., YOS J. M. (1970): Measurements of electrical and thermal conductivity of hydrogen, nitrogen and argon at high temperatures. *The Physics of Fluids*, 13, pp 608-617.

MÜLLER K. N. (1970) Temperature measurement of plasma flames. 6th International Metal Spraying Conference, Paris, France, 14-19 September. Paper B 1.

NÁDASI E. (1971): A fémszórás korszerű módszerei, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.

NICOLL A. R., ESCHNAUER H. (1986): Quality assurance of plasma spray powders. 11th International Thermal Spray Conference, Montreal, Canada, 8-12 September, pp 289-299.

NOVAK W. (1973): Vorschlag zur Vereinheitlichung von Prüfenmethoden für Auftragschweissungen. Schweisstechnik /Berlin/, 23. 1973. 1-2. pp. 22-25, 69-73.

OLÁH I. (1977): Gépjárműjavítás technológia I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.

ORGOVÁN L. (1979): Felületvédelmi zsebkönyv Műszaki Könyvkiadó Budapest.

OWENS D.K., WENDT R.C. (1969): Estimation of the surface free energy of polymers, Journal of Applied Polymer Sciences. 13 (1969) pp 1741-1747.

Pateyron B., Elchinger M. F., Delluc G., Aubreton J. (1986): Banque de données de l'Université et du CNRS, Université de Limoges, Limoges, France.

PATTISON J., CELOTTO S., KHAN A., O'NAILL W. (2008): Standoff distance and bow shock phenomena in the cold spray process, Surface Coating Technology 202, pp 1143-1454.

PAWLOWSKI L. (1980a) The vacuum plasma sprayed copper and tantalum coatings. 9th International Thermal Spraying Conference, The Hague, Netherlands, 19-23 May, pp 299-305.

PAWLOWSKI L. (1980b): Optimization of arc plasma spraying parameters. Surfacing Journal, 11, pp 8-16.

PAWLOWSKI L. (1981): Temperature distribution in plasma sprayed coatings. Thin Solid Films, 81, pp 79-88.

PAWLOWSKI L. (1983a): Vitrification par laser des couches céramiques projetées par plasma. Reports of Group of Thermodynamics and Plasma at University of Limoges, Limoges, France. Report pp 574-83.

PAWLOWSKI L. (1990): Properties of plasma sprayed YBa₂Cu₃O_x high temperature superconductors. 3rd National Thermal Spray Conference, Long Beach, California, USA, 20-25 May, pp 641-646.

PELLÉNYI L. (1997): Mezőgazdasági gépek korszerű ragasztott önkendő facsapágyainak tribológiai és mechanikai paraméterei. PhD. Dolgozat. Gödöllő, 1997.

PFENDER E., LEE Y. C. (1985): Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part I. The motion of a single particle without thermal effects. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 5, pp 211-237

- POLAK L. S. SUROV N. S. (1969): Research on interaction between the particles and plasm in a nozzle [In Russian]. *Fizika i Chimija Obrabotki Materialov*, no.2, 19-29.
- RIENZI S. A., ANGELIN L. (1971) Spectrometric measurements in an arc jet. *Revue Internationale des Hautes Temperatures et Refractaires*, 8, pp 5-10.
- RODRIGUEZ R. M. H., PAREDES R. S. C., WIDO S. H., CALIXTO A. (2007): Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and by electric arc spray, *Surface Coating Technology* 202, pp 172-179.
- ROINTAN F. B. (2000): *Handbook of Hard Coatings Deposition Technologies, Properties and Applications*. William Andrew Publishing. Norwich NY USA.
- SAINT - GOBAIN - Coating Solutions Flexi-cords features Technológiai ismertető
- SAINT - GOBAIN: Coating Solutions Worldwide Expertise in Material Technologies, ROKIDE Spray System
- SAMPATH S. (1993): Microstructural characteristics of plasma spray consolidated amorphous powders. *Materials Science and Engineering*, A167, pp 1-10.
- SAMPATH S., HERMAN, H. (1989): Microstructural development of plasma sprayed coatings. 12th International Thermal Spraying Conference, London, UK, 4-9 June, Paper 53.
- SAYCE I. G. (1976): Heat and mass transfer in thermal plasmas. *Pure and Applied Chemistry*, 48, pp 215-228.
- SCHATT W. (1979): *Pulvermetallurgie Sinter- und Verbundwerkstoffe VEB* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig.
- SCHOOP M. U. (1909): Erste stationäre Metallspritzanlage, Patente DRP 258505 , Schweizer Patent 49278, Franz Patent 406 387, 407 178, Engl. Patent 5712 (1910).
- SCHOOP M. U. (1921): Flammsspritzpistole Schwizer Patentschrift Nr. 93, 300.
- SCHOOP M. U., DAESCHLE C. H. (1935): *Handbuch der Metallspritz - Technik*. Zürich - Leipzig - Stuttgart - Wien; Rascher & Cie A. G. Verlag.
- SMITH M. F., DYKHUIZEN R. C. (1987): The effect of chamber pressure on particle velocities in low-pressure plasma deposition. 1st National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, 14-17 September, pp 21-25.

- STAROSTA R. (2009): Properties of thermal spraying Ni-Al alloy coatings, *Advanced Material Science*, 9, pp 30-40.
- STEFFENS H. D., BUSSE K. H., SELBACH H. (1985): Measurements of particle and plasma velocity in a low pressure plasma jet. 7th International Symposium on Plasma Chemistry, Eindhoven, The Netherlands, 1-5 July, Paper B-5-2.
- STEFFENS H. D., MÜLLER K. N. (1972): Grundlagen der Haftung thermisch gespritzter Schichten. *Adhösion*, 2, pp 34-38.
- STEFFENS H. D., WIELAGE B., DROZAK J. (1991c): Interface phenomena and bonding mechanism of thermally sprayed metal and ceramic composites. *Surface and Coatings Technology*, 45, pp 299-308.
- STERN K. H. (1996): *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings. Thermal Spray Coatings* p 261. Chapman & Hall.
- TAKÁCS J. (2004): *Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában* Műgyetem Kiadó.
- TAKEUCHI S. (1990): Modelling of residual stresses in plasma sprayed coating: effects of substrate temperature. *Surface and Coatings Technology*, 43/44, pp 426-435.
- THURSTON S. H. (1900): Process of coating one metal with another and resulting product. US Patent No.: 661,650 Nov. 18.
- THURSTON S. H. (1902): Method of Impacting one Metal Upon US Patent No.: 706,701 and 706,702 August 12.
- TRAPAGA G., SZEKELY J. (1991): Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes. *Metallurgical Transactions B*, 22 B, pp 901-914.
- UTP -Scweissmaterial AG Rheinfelden: UNY-SPRAY-Jet sets new standards in field of modern flame-spraying *New Perspectives in Flame Spraying Technology* UTP EXOBOND Verfahren
- VARDELLE A. M., FAUCHAIS P. (1986): Les transferts de quantité de mouvement et de chaleur plasma particules solides dans un plasma d'arc en extinction. *Revue Internationale de Hautes Temperatures et Refractaires*, 23, pp 69-85.

VARDELLE A., VARDELLE M., MCPHERSON R., FAUCHAIS P. (1980): Study on influence of particle temperature and velocity distribution within a plasma jet coating formation. 9th International Thermal Spraying Conference, The Hague, Netherlands, 19-23 May, Paper 30.

VARDELLE M., VARDELLE A., FAUCHAIS P. (1989): Etude comparative du traitement thermique des poudres en projection plasma a l'air et en atmosphere controlée. Revue Internationale de Hautes Temperatures et Refractaires, 25, pp 83-91.

VARDELLE, M. P., FAUCHAIS P., BOULOS M. I. (1992): Loading effect by oxide powders in dc plasma jets. 13th International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, 28 May-5 June, pp 543-547.

WAGNER N., GNIIDIG K., KREYE H., KRONEWETTER H. (1984): Particle velocity in hypersonic flame spraying of WC-Co. Surface Technology, 22, pp 61-71.

WHEILDON W. M. (1955): Coating metals and other materials with oxide and articles made thereby. US Patent No. 2,707,691 May 3.

WILMS V., HERMAN H. (1976a): Plasma spraying of Al₂O₃ and Al₂O₃- Y₂O₃. Thin Solid Films, 39, pp 251-262.

YOSHIDA T., OKADA T., HATAMANI H., KUMAOKA H. (1992): Integrated fabrication process for solid fuel cells using novel plasma spraying. Plasma Sources Science and Technology, 1, pp 195-201.

ZAAT J. H. (1983): A quarter of a century of plasma spraying. Annual Reviews Material Science, 13, pp 9-42.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk**Lektorált cikk világnyelven:**

1. Horváth Cs., Kerekes I., Tiba Zs., Fazekas L. (2005): Quality Awareness in Maintenance – Examples of Hungarian Companies. Manufacturing Engineering, Slovak Republic, Kosice 2005/1. pp. 41-44.
2. Fazekas L., Tiba Zs. (2009): Utilization of metal spraying when renewing the front carriage of autobuses. Machine Design, 2009, Serbia, Novi Sad pp. 339-342.
3. Fazekas L., Tiba Zs., (2009): Testing the sprayed layers applied on machine element. Technological Engineering 2009/2., Slovak Republic, Zilina. pp. 23-26.
4. Fazekas L., Tiba Zs. (2010): Interlaminar strength-tests of the surface layer built up with cold metal spraying methods during renewals, Machine Design 2010, Serbia, Novi Sad. pp 309-312.
5. Fazekas L., Tiba Zs., Kalácska G. (2011): The examination of the lubricant storing and releasing ability of thermally sprayed surfaces. Technological Engineering, Slovak Republic, Zilina. (in print)
6. G. Kalácska, L. Fazekas, R. Keresztes, A. Tóth, J. Szépvölgyi (2011): Cold flame-sprayed and oil-impregnated porous metallic coatings. Applied Surface Science. Elsevier. (in print)

Lektorált cikk magyar nyelven:

7. Fazekas L., Márton T. (1996): Fém-szórás alkalmazási lehetőségének gyakorlati megoldása a Hajdú Volán Rt-nél. = Gépgyártástechnológia. XXXVI. No.5. 7-9 o.
8. Fazekas L., Zsákai L. (1997): Mellső futómű felújítása, fém-szórás alkalmazás lehetőségei Karbantartás és Diagnosztika. IV.évf. 1szám. 30-33. o.
9. Fazekas Lajos: (1997): A fém-szórás, a felvitt rétegek vizsgálata. = Gépgyártástechnológia. XXXVII, No.5. 13-18. o.
10. Fazekas Lajos (2001): A termikus szórás szerepe a javításban. = Gépgyártás, XLI. Évf. 4, No 6. 46-49. o.

11. Fazekas L., Dr. Dúll S. (2002): A gépjavításnál alkalmazott termikus szórás oktatása az általános és karbantartó gépész hallgatók részére. = Gépgyártás, XLII. Évf. április-május, No 4-5. 71-73. o.
12. Fazekas L., Pálincás I. (2009): Karbantartás-, tribológia és az alkatrészfelújítás kapcsolata. GÉP LX. Évfolyam, 4-5., 62-66. o.

Konferencia kiadvány magyar nyelven:

13. Fazekas Lajos (1993): Alkatrészfelújítás és a tribológia kapcsolata. TRIBOKORR '93, I. Tribológiai, Korrózióvédelmi és Alkatrészfelújítási Konferencia, Siófok, április 27-29. 256-268. o.
14. Fazekas Lajos (1994): Termikus szórás (fémszórás) eljárások kopásvédelemre, TRIBOKORR '94. II. Tribológiai Korrózióvédelmi és Alkatrészfelújítási Konferencia, Siófok, december. 6-8. 7-16. o.
15. Fazekas Lajos (1995): Kopásvédelem és fémszórás (termikus szórás) Országos Karbantartási Konferencia, Nyíregyháza 1995. ápr. 27-28., MTESZ Borsodi Műszaki, Gazdasági Élet XL No 3. 67-72. o.
16. Fazekas L., Pethe A. (1995): A vezérműtengely felújítása fémporszórásos technológiával, TRIBOKORR '95. III. Tribológiai, Korrózióvédelmi és Alkatrészfelújítási Konferencia, Gyula. IX. 19-20 81-90. o.
17. Fazekas L., Németh A. (1995): Motor főtengely (forgattyústengely) csapágy és szimmering helyeinek javítása, ENERGOREP '95. V. Energetikai és Karbantartási Konferencia, Siófok, november 28-30. 97-104. o.
18. Fazekas Lajos. (1999): Termikus szórás alkalmazása autóbuszok mellső futóműveinek felújításánál. Országos Karbantartási Konferencia, Pécs, 1999. április 28-30. Északkelet – Magyarország, No.3. p.13-18. o.
19. Fazekas Lajos (2000): Termikus szórás eljárások szerepe a kopással tönkrement alkatrészek felújításában. Országos Karbantartási és Minőségbiztosítási Konferencia. 2000, Nyíregyháza 2000. június. 28-30, Északkelet Magyarország, No 6. 13-17. o.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Több évtizedes szakterületi kutatómunkám segítőkész kollégák támogatása nélkül nem valósulhatott volna meg.

Köszönettel tartozom a Debreceni Egyetemről dr.Szűcs Edit, dr.Tiba Zsolt és dr.Kalmár Ferenc kollégáknak, hogy a lehetőséget biztosítottak a PhD dolgozat megírásához. Ki kell emelnem dr.Dull Sándor, dr.Varga Ferenc, Nádházi László és Székács István támogatást a kísérlettervezés, próbatestgyártás és mérés területén.

Köszönettel tartozom dr.Molnár András hegesztő szakmérnöknek, aki értékes konzultációkkal és javaslatokkal segítette kutató munkám.

A Szent István Egyetem dolgozói közül Szabadi László, Fledrich Gellért, dr.Janik József segítettek a kutató munkám.

Az MTA KKI munkatársai közül köszönettel tartozom dr.Tóth Andrásnak az XPS és felületi energia mérésekhez nyújtott értékes segítségéért.

Külön köszönet illeti témavezetőim – dr.Kalácska Gábor, dr.Pálinkás István - önzetlen támogatását és rengeteg időráfordítását, melyet a kutatómunkám során végig biztosítottak.

Mindez a munka nem jöhetett volna létre, ha a családom, feleségem - Piroska - kitartása és megértése nincs végig mellettem.