

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Szalai Szabolcs

Széchenyi István Egyetem
Audi Hungária Járműmérnöki Kar
2021

Szalai Szabolcs

**Alumínium jármű karosszéria lemezek
alakíthatóságának elemzése**

Doktori értekezés

Témavezető:

Dr. Dogossy Gábor
Egyetemi docens
Széchenyi István Egyetem Győr
Anyagtudományi és Technológiai Tanszék

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Győr
2021. január 31.

Tartalomjegyzék

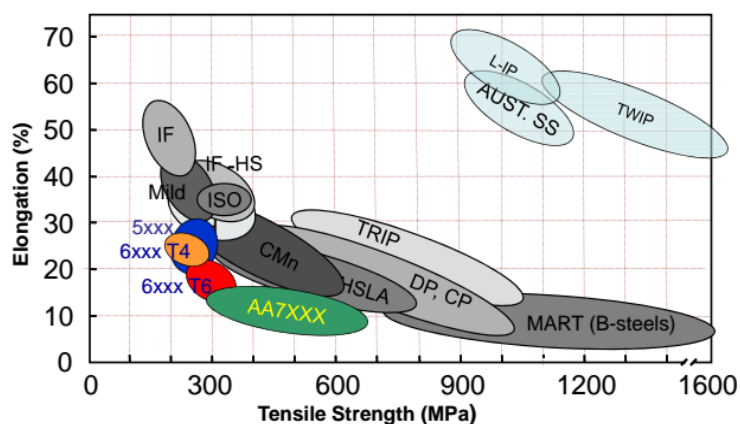
1. Bevezetés	3
2. Irodalmi áttekintés	6
2.1. A digitális képkorrelációs eljárások bemutatása.....	6
2.1.1. Bevezetés a DIC technológiába.....	6
2.1.2. A mérés elve	8
2.1.3. A mintázatok jellemzése és mérőszámai	9
2.1.4. Mintázat felviteli technológiák összehasonlítása	14
2.1.5. A mintázat számszerű minősítése és ellenőrzése	19
2.2. A lokális alakváltozások elemzése	21
2.2.1. A PLC effektus által okozott lokális alakváltozások.....	21
2.2.2. A diffúz és lokális kontrakció.....	22
2.3. Az intermetallikus fázisok jellemzése.....	30
2.3.1. Az intermetallikus fázisok hatása az alakíthatóságra	30
2.3.2. Az intermetallikus fázisok mennyiségét meghatározó tényezők	35
2.4. A szakirodalom kritikai elemzése.....	37
3. A kutatások célja és eszközei	39
3.1. Célkitűzések	39
3.2. Felhasznált berendezések és módszerek.....	40
4. Kutatómunka.....	43
4.1. A DIC mérésekhez használt minták előkészítésének vizsgálata.....	43
4.1.1. Vizsgálati módszer	43
4.1.2. A kísérletek során alkalmazott festékek és próbatest előkészítési módszerek	48
4.1.3. A DIC vizsgálatokhoz használt festékek vizsgálati eredményeinek elemzése.....	57
4.2. A DIC vizsgálatokhoz használt mintázatok kvantitatív elemzése	67
4.2.1. Vizsgálati módszer	67
4.2.2. Előzetes kísérletek	70
4.2.3. Új típusú képi jellemző vektor konstruálása	72
4.2.4. A DIC technikával értékelt képek hibaelemzése.....	74
4.3. A lokális alakváltozások vizsgálata	87

4.3.1. Az egyenletes alakváltozás tartományának elemzése.....	87
4.3.2. A diffúz és lokális kontrakció határának kutatása	93
4.3.3. Az összefüggések alkalmazása FLC felvételére	104
4.4. Az intermetallikus fázisok hatása az alakíthatóságra	111
4.4.1. Alakíthatósági vizsgálatok eredményei.....	111
4.4.2. A fázisok mennyiségét befolyásoló tényezők elemzése	115
5. Összefoglalás	124
6. Irodalomjegyzék.....	129

1. Bevezetés

A járműfejlesztés és gyártás meghatározó tendenciája a fogyasztás és a károsanyag kibocsátás csökkentése. Ennek számos eszköze van, közülük egyik legfontosabb a jármű tömegének optimalizálása a minimális tömeg és a törés elleni biztonság szempontjából. Az ilyen irányú törekvések vezettek el a karosszériaépítésben a nagyszilárdságú acéllemezek fokozott alkalmazásához, de az utóbbi évtizedben ennél erőteljesebb az alumíniumötvözetek részarányának növekedése. Ez azt eredményezte, hogy ma számos személygépkocsi karosszéria tisztán alumíniumötvözetekből készül.

A korszerű jármű karosszéria anyagok tulajdonságait összefoglalóan a közismert „banán-diagram” mutatja be, amely a szilárdság és alakíthatóság kapcsolatán keresztül szemlélteti a nagyszilárdságú lemezek alkalmazásának előnyeit és korlátait.



1.1. ábra. A szilárdság és nyúlás kapcsolata jármű karosszéria anyagokra [1]

A diagramból jól látható, hogy a mai járműépítésben nagy tömegben alkalmazott DP, CP és TRIP acélok alakíthatósága korlátozott, és ugyanez vonatkozik a nagyszilárdságú alumíniumötvözetekre is, a kedvező szilárdság kisebb alakíthatósággal párosul. Ezért a kutatások arra irányulnak, hogy egyrészt növeljék az alakíthatóságot, másrészt pedig az alakíthatóság minél pontosabb jellemzésével segítsék a tervezést az anyagban rejlő lehetőségek maximális kihasználására.

Dolgozatomban ezeket az elemzéseket elsősorban az alumínium ötvözeire fókuszálom. Közismert, hogy a jármű alváz és felépítmény egyes alkatrészeihez különféle ötvözet típusokat használnak. Elterjedt a nemesíthető AlMgSi lemezek (6xxx sorozat), az 5xxx alumínium-magnézium ötvözetek, valamint újabban a vassal ötvözött

7xxx sorozatú szerkezeti elemek alkalmazása. Saját vizsgálataim középpontjában az alumínium-magnézium ötvözetek állnak, mivel ezek a szilárdságuk és jó alakíthatóságuk miatt előnyösen használhatók lennének a karosszériaépítésben, viszont a magnézium jelenléte miatt fellépő Portevin-Le Chatelier (PLC) effektus okozta felületi hibák alkalmazásukat elsősorban a belső panelekre korlátozzák. Ezeknél az ötvözeteknél jelentkező PLC effektus a szakítódiagramon jellegzetes erőingadozást és a próbatest felületén inhomogén alakváltozási nyomokat okoz. Ezeket a jelenségeket a lemezek szakítóvizsgálata során fedezték fel, de kiderült, hogy az alkatrészek gyártásában is megjelennek felületi mintázatok formájában. Ez a magyarázata annak, hogy az AlMg ötvözetek dekoratív külső burkolatokhoz nem használhatók.

További jellegzetessége az AlMg ötvözeteknek az, hogy a szakítóvizsgálat során a maximális erő elérése után az acélokhoz képest sokkal rövidebb a kontrakciós szakaszuk és kisebb az erőcsökkenés mértéke, emiatt az alakító műveletek tervezésében fontos szerepet játszó diffúz és lokális kontrakció közötti határ pontos definiálása kiemelt fontosságú. E jelenség tanulmányozásával a szakítóvizsgálat és az alakítási határdiagramok felvétele során foglalkoztam.

Az elmondottakból következik, hogy mind a PLC effektus, mind pedig az alakíthatóság általános megítélése szempontjából kiemelt szerepe van az ötvözőknek. A PLC effektus egyértelműen a magnéziumnak tulajdonítható, a további ötvözők az irodalom szerint az intermetallikus fázisok révén fejtik ki hatásukat. Ezeknek a fázisoknak a mikroszerkezetben való jelenléte, elhelyezkedése döntően meghatározza az alakíthatóságot, ezért az intermetallikus fázisok megjelenését segítő ötvözők elemzésével is részletesen foglalkoztam.

A kísérleti vizsgálatokban kiemelt szerepe van a digitális képkorrelációs (DIC) technikáknak, mivel ezek segítségével határozható meg a lemez lokális alakváltozásai, és ez a módszer alkalmas az alakítási határdiagramok felvételére. Vizsgálataim során azt tapasztaltam, hogy az általánosan elfogadott módszerek is további részletes elemzést igényelnek a pontosság és az alkalmazott technikai megoldások vonatkozásában.

A vázlatosan bemutatott jelenségek elemzése érdekében három fő területet jelöltem meg részletes kutatásra az értekezésemben, ezek a következők:

- A DIC technikában alkalmazott előkészítési technikák, valamint a mintázatok morfológiai jellemzése, azok kapcsolata a nyúlásmérés pontosságával, ezáltal optimális mintázatok alkalmazásának lehetősége.
- Az alakítási inhomogenitások jellemzése DIC technikára alapozva, különös tekintettel a PLC effektusra, valamint a diffúz és lokális kontrakcióra.
- Az ötvözők és az intermetallikus fázisok jellemzése a vizsgált alumínium-magnézium ötvözetekben, azok hatása az alakíthatóságra.

2. Irodalmi áttekintés

A dolgozat fontos része a vonatkozó szakirodalom bemutatása és elemzése. Ebben a fejezetben az utóbbi években megjelent, a kutatási témához kapcsolódó nemzetközi és hazai szakirodalmat mutatom be. A szakirodalmakat a 3 fő kutatási irány mentén vizsgálom, DIC technológiák, PLC effektus és a diffúz és lokális kontrakció, valamint az intermetallikus fázisok hatása az alakíthatóságra.

2.1. A digitális képkorrelációs eljárások bemutatása

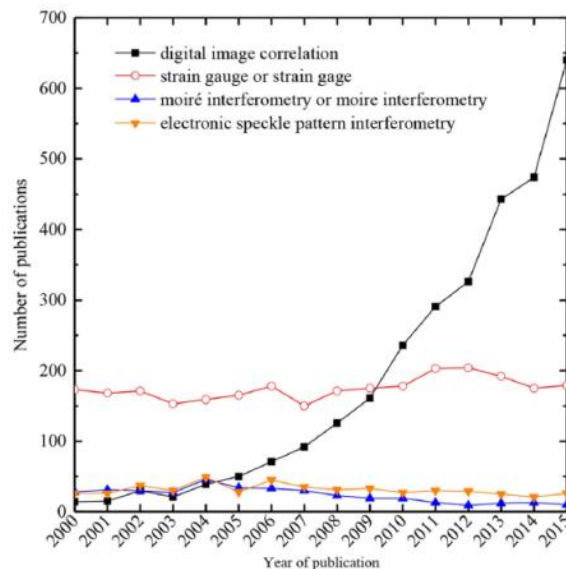
A kutatásaim és ezáltal a dolgozat egyik alapja a DIC technológia, így elsőként ezen technológia szakirodalmának ismertetésével kezdem a dolgozatomat. Munkám mindhárom fő tématerületében használtam a technológiát, ezért is tartom fontosnak a téma irodalmának tanulmányozását.

2.1.1. Bevezetés a DIC technológiába

Az alakváltozások, elmozdulások illetve a feszültségek mérésre többféle módszer ismert a szakirodalomból. A hagyományos mérési módszerek közé tartoznak többek között a nyúlásmérő bélyegek és induktív úradók. Ezen mérési módszerek sok előkészületet igényelnek illetve drága eszközök és műszerek használatát teszik szükségessé. A kutatásaim során alkalmazott digitális képkorrelációs eljárás (angolul Digital Image Correlation, továbbiakban DIC) ezzel szemben olyan érintés nélküli eljárás, amellyel hétköznapi eszközök használatával, utólagos eredmény feldolgozás mellett akár teljes elmozdulás- és nyúlásmérőt vizsgálhatunk a próbatest kamerával látható részein. Ezen mérésekhez nem szükséges előre ismerni a tönkremenetel helyét, hiszen a mérési eredmények a teljes próbatestre vonatkoznak, és feldolgozásuk utólag történik.

A digitális képkorrelációt, mint vizsgálati eljárást először a 80-as években fejlesztette ki egy kutatócsoport a dél-karolinai egyetemen, majd a következő három évtizedben folyamatos fejlődésen ment keresztül illetve széles körben terjedt el [2]. A rengeteg előnyének köszönhetően - mint a könnyű kísérleti beállítások, egyszerű implementáció, nagy ellenálló képesség a környezeti hatásokkal szemben, a variálhatóság és a széles körben állítható idő és térbeli felbontás - a DIC technika széles

körben elfogadottá vált, mint erős és rugalmas eszköze a különböző anyagok mozgás és alakváltozás mérésének. Napjainkban a kutatók előszeretettel választják ezt a technológiát, melyet a 2.1. ábrán látható diagram is jól szemléltet. Az ábra a Web of Science-en 2000 és 2015-ben megjelent publikációk számát mutatja, ahol jól kivehető a DIC technológia alkalmazásának dinamikus növekedése [3].



2.1. ábra. A DIC technika alkalmazásának növekedése a tudományos publikációkban [3]

Az alkalmazható mérettartományon túl további érdekesség, hogy a technológia nem csak a fémek vizsgálati területén jelenik meg, hanem napjainkra a polimer, kompozit vagy akár biológiai anyagok vizsgálatinál is alkalmazzák. A hagyományos próbatesteken túl a komplex alkatrészek, gépek vagy akár épületek részegységeinél vagy a biomechanikában és az orvostudományokban is teret nyert. [2-4]

A szakirodalom szerint a DIC technikával történő alak, elmozdulás vagy alakváltozás méréshez a következőkre van szükség:

- **mintázat készítése** – Ez a mintázat a vizsgálandó tárgyak, próbatestek felületére kerül és biztosítja a próbatest deformációjának láthatóvá tételét, tulajdonképpen egyfajta információhordozó szerepe van.
- **képek (fotók) készítése** – A mintázatról és ezáltal a próbatestről különböző állapotokban felvétel készül, amennyiben egy kamerával történik a rögzítés 2D DIC-ről beszélünk, két kamera esetében már sztereó DIC-ről vagy 3D DIC-ről beszélhetünk.

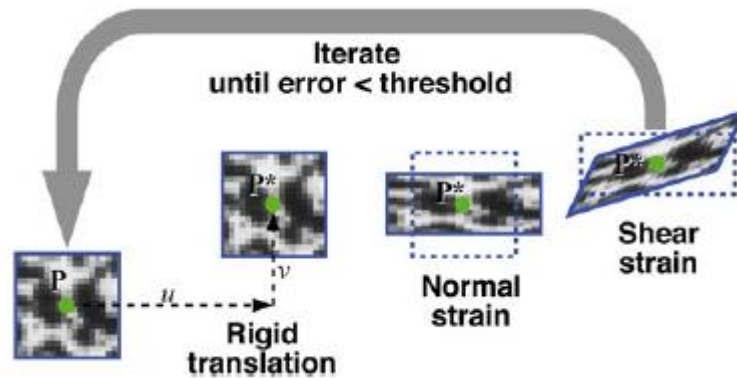
- **képek elemzése** – A rögzítés után a deformált képek összehasonlításra kerülnek egy referencia vagy a kezdeti képpel egy speciális kereszt korrelációs algoritmus segítségével, mely által kinyerhetők lesznek az elmozdulás és feszültség mezők [3]

A fentiekből, illetve több más kutatásból is következik, hogy a DIC mérések egyik elengedhetetlen feltétele a megfelelő mintázat (lehetőség szerint véletlenszerű), amely közvetíti a deformációs információkat, illetve nagymértékben befolyásolja a képek illesztésének és a méréseknek a pontosságát. A dinamikusan bővülő felhasználási területekhez illetve anyagokhoz, valamint mérettartományokhoz alkalmazható megfelelő minőségű mintázatok készítése illetve azok megfelelő színvonalú kiértékelése folyamatosan egyre nagyobb kihívást jelent a DIC szakembereknek.

2.1.2. A mérés elve

A mérés során a feladat az egyedi mintázattal bevont próbatestről készített képsorozat képeinek összehasonlítása, azonos pontok keresése-követése a képsorozat egészén át. Egy egyedülálló képpont keresése két kép között azonban nem vezethet eredményre, mivel egy adott pixel szín- és/vagy intenzitásértéke a referenciakép több képpontjának értékével is megegyezhet. Megoldást jelent, ha az adott képpont környezetében kijelölt kis terület (facet, sub-frame – a továbbiakban értékelő ablak) azonosítása történik a képek között. A keresett értékelő ablak általában négyzet alakú, ami a próbatest előkészítése során felvitt egyedi mintának köszönhetően a teljes képsorozaton keresztül egyértelműen beazonosítható [3, 5, 6].

Egy képpont körüli résznek egy másik képen való megkeresésére több módszer is létezik. A két legelterjedtebb a normalizált keresztkorreláció és a normalizált legkisebb négyzetek módszere. A kellő pontosság eléréséhez azonban figyelembe kell venni az értékelő ablakok deformációját is, melyhez általában valamilyen iterációs megoldást használnak. A legtöbb DIC-szoftver a Levenberg-Marquardt algoritmus valamilyen variációját alkalmazza a nemlineáris optimalizációhoz (2.2. ábra). [6]

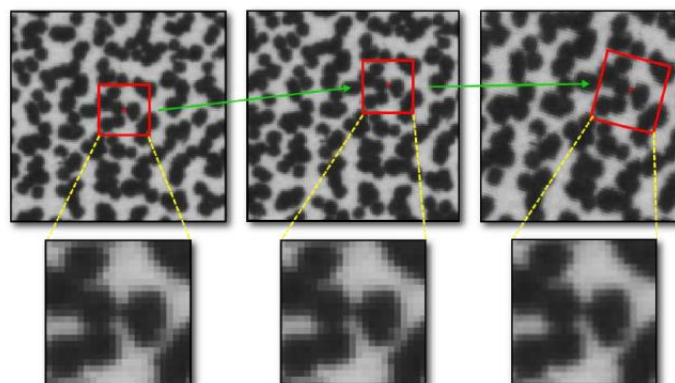


2.2. ábra. Az iteráció lépései [6]

2.1.3. A mintázatok jellemzése és mérőszámai

A digitális képkorrelációban az optimális mintázat használata az egyik legfontosabb tényező a mérési zaj csökkentésében és az eredmények pontosságának javításában. Az ideális véletlenszerű mintázat követelményeinek leírása és mintára történő alkalmazásának megértése megkönnyíti a DIC használatát [7].

A megfelelő minőségű mintázatra azért van szükség, mert a DIC során a kép egy kis területi egységét - értékelő ablakát - követjük nyomon, mialatt a minta deformálódik és ezt hasonlítjuk össze a referencia képpel, törekedve arra, hogy az értékelő ablak a mérés végéig a lehető legjobban illeszkedjen. Ezt a szürke szintek változásának és a képek közötti egyezésének folyamatos figyeléséből számítjuk. A jó mintázat lehetővé teszi a kép korreláció meghatározását nagy pontossággal és kis zajt okoz a mérésben (2.3. ábra). [5, 7]

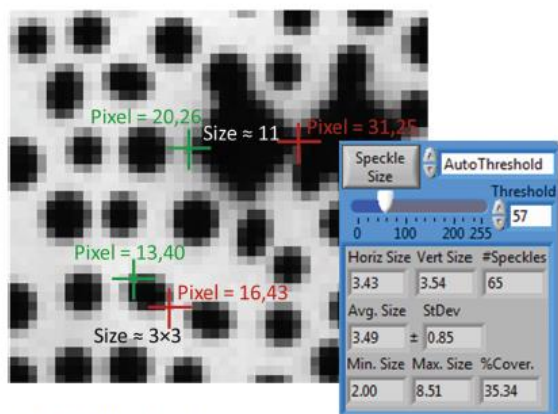


2.3. ábra. Az értékelő ablak deformációja a mérés során [7]

A foltok optimális méretét, eloszlását és a fedettség mértékét több tényező is

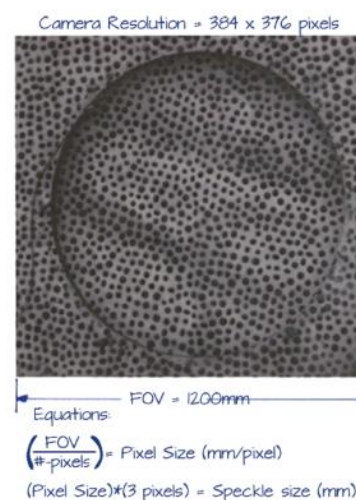
befolyásolja. A két fő meghatározó szempont a képkorreláció során alkalmazott értékelő ablak mérete és a kép felbontása. Az értékelő ablak mérete nem magától értetődő. Minél nagyobb egységgel keresünk a képek között, annál lassúbb lesz a keresés, ugyanakkor annál pontosabb mérési eredményeket produkál. Ha kisebb értékelő ablak segítségével vizsgálunk, a számítás sebessége jelentősen megnő, azonban vele együtt a hibás találatok valószínűsége is, hiszen minél kisebb a terület, annál kevésbé egyedi. Minél kisebb foltmérettel dolgozunk, annál kisebb értékelő ablakok alkalmazhatók, azonban nagyobb folt és ablak kombinációval is elérhető pontos mérés. Reu munkáiban [8-16, 24] részletesen olvasható a mintázatok paramétereinek kapcsolata és hatásuk a mérésekre, így ezen irodalmakkal is dolgoztam a kutatás során.

Az irodalom egybehangzóan megadja, hogy a **foltok méretét** (speckle size) a kép digitalizálás során alkalmazott kamera felbontás és a vizsgált terület kapcsolatából kell meghatározni. E két mennyiségből számítható a pixel mérete mm-ben, amelyből kiindulva az irodalom az optimális folt méretet 3-5 pixel között jelöli meg [16]. A publikációk a méretet nem csak az átlagos foltmérettel adják meg, hanem a legkisebb és legnagyobb folt méretére, illetve a foltok méret szerinti eloszlására is utalnak. Például Crammond és szerzőtársai [17] a foltok átlagát és szórását tekintik jellemzőnek, de emellett a foltok gyakoriság sűrűségfüggvényét is elemzik. Példaként a 2.4. ábra egy képelemző szoftver által ellenőrzött mintázatot mutat be [17].



“Eye-ball” Speckle size analysis and comparisons to autocorrelation and particle analysis.

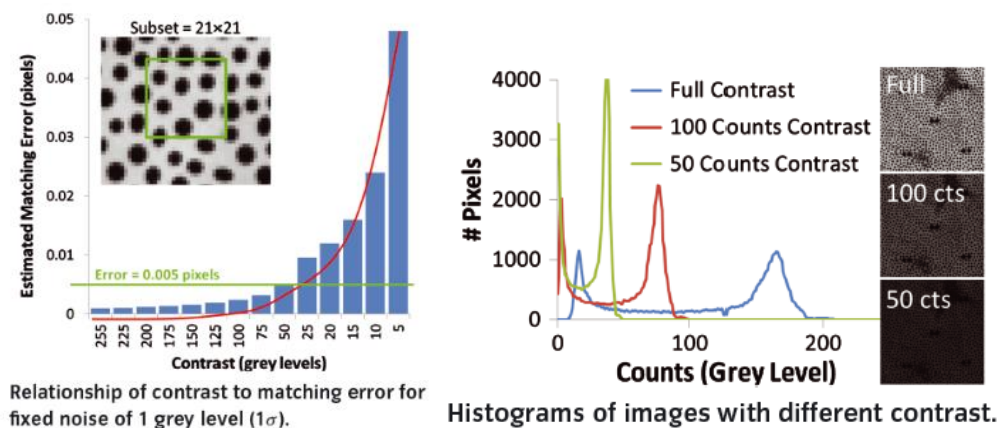
2.4. ábra. A foltméret szerepe [16]



2.5. ábra. Pixel méret meghatározása [8]

A 2.4. ábrán jól látható, hogy a foltok vízszintes és függőleges irányú mérete, a foltok száma, valamint az átlagos, minimális, maximális mérete és szórása is adott. Az adatok homogén, anizotrópiát nem mutató, kis szórású mintázatra utalnak. A kiemelt foltok területe 13,4 és 20,26 pixel között változik, amely a 3x3 illetve 5x5-ös pixelek terület értékei közé esnek. Egy másik irodalom [8] szerinti mintázat látható a 2.5. ábrán, amely a pixel méret meghatározását is mutatja. A képen definiálva van a kamera felbontás (384x376), valamint a látómező (FOV) 1200 mm-ben. Ebből a pixel méret $1200/384=3,125$ mm, tehát a minimális folt átmérő 9,375 mm lenne, ami elég furcsa eredmény, a szerzők valószínű a látómező megadásában nagyságrendi hibát követtek el. Ettől függetlenül az ábra jól mutatja a számítás menetét. [8, 16]

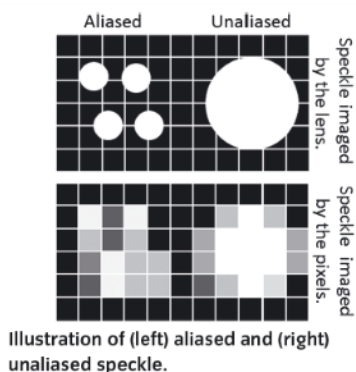
A **kontraszt** (contrast) meghatározása szintén fontos tényező a leképezésnél. Fekete alapon fehér, vagy fehér alapon fekete foltokkal megfelelő kontraszt érhető el, ami segíti az azonosítást.



2.6. ábra. A kontraszt hatása [15]

Bármely mintázatos kép esetén növelni kell a kontrasztot és csökkenteni kell a zajt. A legjobb módszer erre a jó festék és megfelelő megvilágítás. A kísérleti szakemberek számára még fontosabb hogy érezzék, mennyi kontraszt elég vagy éppen túl sok vagy kevés. Ennek egyszerű elsajátítására a szakirodalom a 2D-s vizsgálatokat ajánlja gyakorlásul [15].

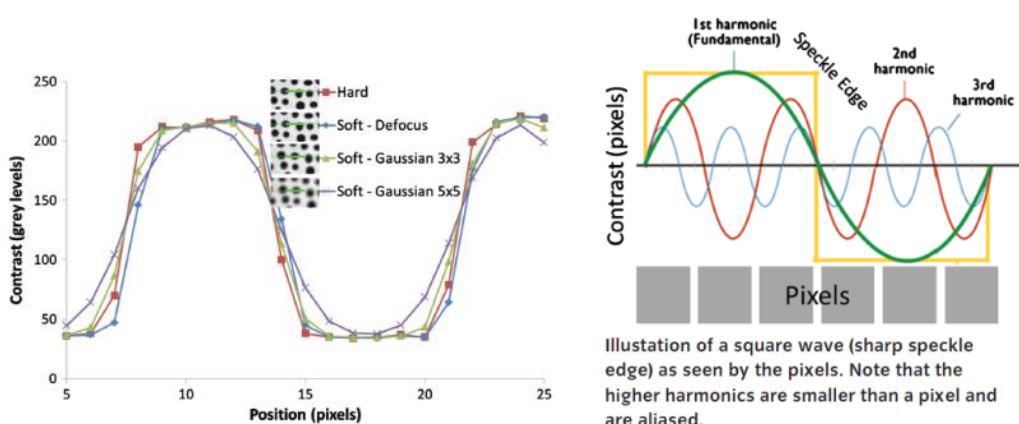
Az **átfedés vagy fedettség** (aliasing) szintén fontos jellemzője a képnek. Az átfedett foltokat minden áron el kell kerülni. Bármilyen átfedett pont a mintázat zaját növeli, ami veszélyezteti a mérés pontosságát [8].



2.7. ábra. Átfedés értelmezése [8]

Ezt gyakran nagyon nehéz megvalósítani a spray-el történő festés esetén, mivel optimalizálni kell egy viszonylag szűk tartományban a foltok méretét is. A jelenséget a 2.7. ábra szemlélteti.

Az **élek élessége** (kontraszt gradiens) meghatározása szempontjából a gyakorlat azt mutatja, hogy mindig az a jobb, ha optimalizáljuk a kontrasztot, a foltok méretét és az eloszlás mértékét a foltok élének élessége árán. Ez azért van, mert a hagyományos mintázati eljárásoknál gyakran éles határok alakulnak ki a minták élén, de ezt a spray technológiákkal nehéz kivitelezni. Ha erre törekszünk, akkor gyakran előfordul, hogy a foltok elveszítik a kontrasztjukat, mert arra figyelünk, hogy a megfelelő méret és él kialakítást érjük el, de közben nagyon sok lesz a szürke a foltok között így romlik a kontraszt. Különböző él detektáló megoldásokat és azok eredményét mutatja a 2.8. ábra. [10]

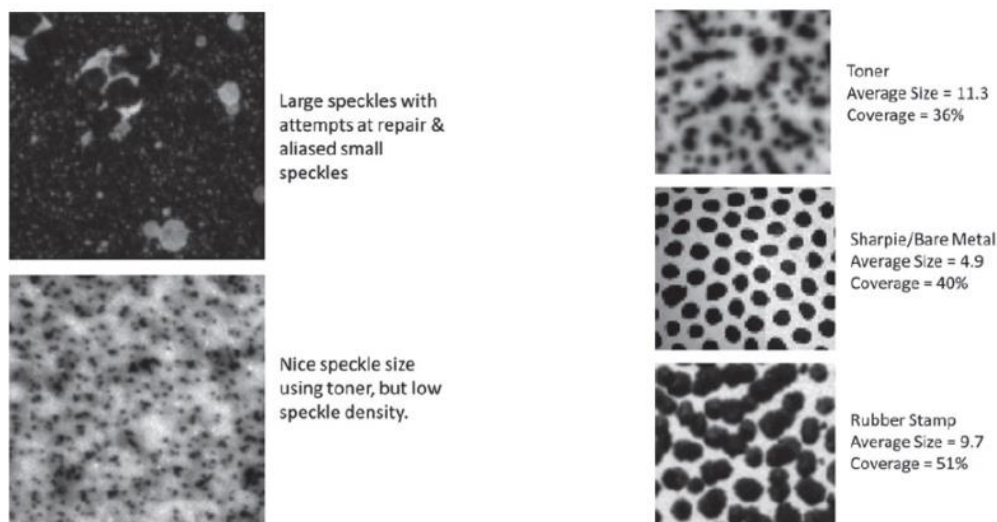


2.8. ábra. A élek élességének a hatása [10]

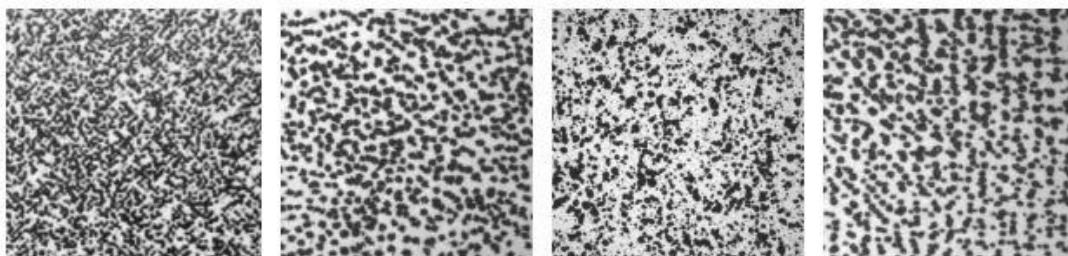
Törekedni kell a megfelelő egyensúly megtalálására a paraméterek között. Ezért

az él élességet fel lehet áldozni a másik három paraméter optimalizálására, mivel az éleket különböző szűrési módszerekkel mindig el lehet különíteni.

A **foltok sűrűsége és a véletlenszerűség** (density) szintén alapvető követelmény. Ugyan nehéz annyira egységes mintát készíteni, mely hibás találatot okozna, azonban érdemes minél véletlenszerűbbre alakítani a mintázatot. Ideális esetben azonos méretű, véletlenszerűen változtatott helyzetű fekete-fehér foltok lennének a legkedvezőbbek. A nyomtatott mintákkal ez könnyen megvalósítható, spray használatakor azonban sokkal nehezebb. A spray-festékekkel kapcsolatos probléma az "over-spray", ahol egy finom köd takarja el a vizsgálandó területet, a foltok közötti részeket, amely veszélyezteti a kontrasztot és valószínűleg átfedett foltokat hoz létre. Törekedni kell arra, hogy a foltok közötti távolság legalább 3 pixel méretű legyen, vagy nagyobb. [9]



2.9. ábra. Jellegetes mintázatok és jellemzőik [9]

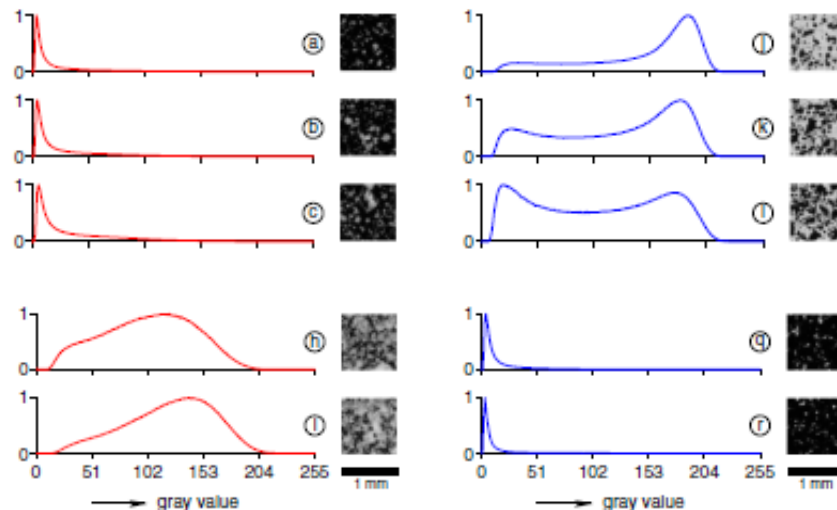


2.10. ábra. Különféle sűrűségű és elrendezésű mintázatok [7]

A 2.9. és 2.10. ábrán lévő képek támpontot adnak a kedvező foltméret és kontraszt

megítéléséhez.

Természetesen a vizsgálatokat az is befolyásolja, hogy fekete vagy fehér alpra készítjük a foltos mintázatot, de a gyakorlatban a fehér alap és a fekete folt terjedt el jobban. A 2.11. ábra ezek jellegzetes kontraszt-görbéit mutatja a képenként [18].



2.11. ábra. Kontrasztjellemzők a szürkeségi szint függvényében
(részlet az eredeti képből) [18]

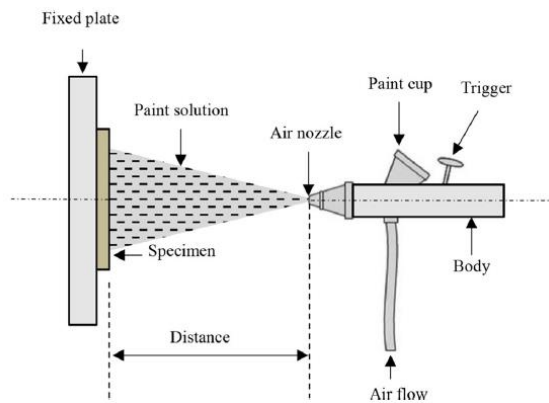
2.1.4. Mintázat felviteli technológiák összehasonlítása

A DIC technikák mintázatát a szakirodalomban látható módon többféle eljárással is el lehet készíteni. Ebben a fejezetben ismertetem a lehetséges alkalmazási módokat.

Festékszórás

A mintázatok készítéséhez legkönnyebb és legegyszerűbb módszer a festékszórás (spray). Ebben az esetben a próbatestre egy fehér alapréteget kell fújni, melyre aztán a matt fekete szórt foltos mintázat kerül (az, hogy fekete alapon fehér, vagy fordítva, a DIC szempontjából mindegy, a lényeg a kontraszt). A foltok felvitelére szintén több módszer létezik. Nagyobb próbatestek esetén hasznos, és a legtöbb kísérlet alatt is gyorsan alkalmazható technikának bizonyult a következő: a próbatestet lefektetjük, majd a festékszóró gombját alig lenyomva felvisszük rá a mintát. A palackból lassan kiszökő hajtógáz ekkor nem tudja teljesen diszpergálni a festékanyagot, így a próbatestre ideális méretű cseppek esnek rá. A másik gyakori eljárás az AirBush pisztollyal történő mintázat készítés, ahol jobban szabályozható a fúvóka átmérő illetve

a nyomás, ezáltal egy sokkal finomabb mintázat érhető el, valamint a beállított értékekkel jobban reprodukálhatóvá válnak az eredmények (2.12. ábra) [3, 5].



2.12. ábra. Festékszóró pisztoly elvi felépítése [3]

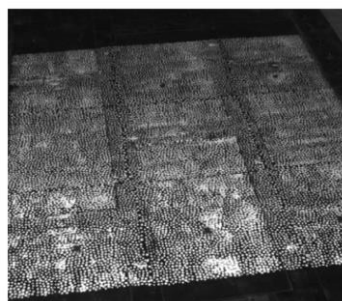
Kisebb próbatestek esetén könnyen elérhető megoldás, hogy a festéket egy merev sörtére fújva, majd ezt a próbatest fölé tartva, ujjunkat a sörtén végig húzva helyezzük fel a mintát. Ezzel a módszerrel jól kontrollálható pettyek mérete és eloszlása.

Toner módszer

A nagyon kicsi próbatestek illetve rendkívül finom mintázatok esetén alkalmazható a toner por. Ehhez a mintázat készítési eljáráshoz a mintát fehér alapréteggel fújják le, majd erre a felületre szórják a port.

Stencilezés

Nagyméretű próbatestekhez a stencilezés hasonlóan jó mintázatot eredményezhet, mint a festékszóróval fújt esetben. Az elektrolites stencilezés azonban nagyobb szakértelmet kíván illetve nem minden anyagon alkalmazható.



2.13. ábra. Stencilezett mintázat [19]

Nyomtatás

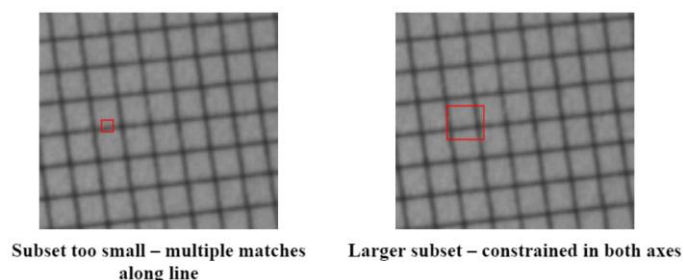
Nyomtatással közepes vagy nagyméretű termékeket ajánlott előkészíteni. A mintázatot lézeres vagy tintasugaras nyomtatóval is a felületre lehet vinni.

Tinta

A festékfilccel történő mintázat készítés is egy lehetséges megoldás. Ezzel a technikával elég nagy deformációk is mérhetőek, de nagyon időigényes a felvitele. Használhatók közvetlenül a felületen is, de a kontraszt növelése érdekében itt is érdemes felhordani egy fehér alapréteget.

Rácsháló

A rácshálós mintázatot bizonyos megkötések mellett lehet alkalmazni, a szakirodalom szerint egy szükségszerű, mintsem optimális megoldás. A pettymintától eltérően nem egy véletlenszerű minta biztosítja az összehasonlítás lehetőségét, hanem a raszteres kialakításnál a pontok előre adottak (metszéspontok). A képeken a pontokat nem az egyedi mintákat keresve követjük, hanem a rácsháló egyes metszéspontjait azonosítjuk. Ebből adódik a módszer hibája is mivel előfordulhat, hogy olyan tökéletes kialakítású a raszter, hogy összetéveszhető lesz egy metszéspont egy másik metszésponttal. A filc egyenetlenségeiből, illetve a vizsgálandó felület inhomogenitásából kifolyólag azonban jellemzően elég egyediek a területek a folyamatos követéshez. A kereső ablak megválasztásakor is törekedni kell arra, hogy legalább két metszéspont essen bele [19].



2.14. ábra. Rácsháló detektálásának problémái [19]

Vetítés

Alakmérésekhez a mintázat lehet egy projektor által is a vizsgálandó felületre vetítve. Ebben az esetben a megvilágítás kritikus, úgy kell beállítani, hogy magas

legyen a kép kontrasztja. Ezzel az eljárással a mintázat nem mozog együtt az alakzattal, így csak alakzat mérése használható, deformációs vizsgálatokra nem.

Meglévő mintázat, textúra

Néhány anyag, mint például a fa erezete, saját mintázattal rendelkezik, amit, ha a mintázat paraméterei megfelelőek lehet használni a DIC mérésekhez. Ha a vizsgálandó anyag egy jellemző textúrával rendelkezik, akkor is alkalmazható, de a megvilágítás eltérő árnyékolást okozhat a textúrákon, ami a kétkamerás méréseket jelentősen megnehezíti, így nem is gyakori.

WTP

Egy nemrég kifejlesztett módszer a minta felvitelére a víz-transzfer nyomtatás (angolul water transfer printing, WTP). Lényege, hogy a festés egy vízben oldódó fólia segítségével történik. A fólia feloldódik a vízben, a festék mintázata a víz felületén marad, majd ezt követően mártják bele a próbatestet. Előnye, hogy így számítógép segítségével rajzolható és optimalizálható a foltminta, viszont eszközigényes eljárás. Az így kapott minta jól tapad a felületre, és nagyobb nyúlásokat is elvisel [19]

A mintázatok elkészítésének különböző lehetőségei

Általánosan elmondható mindegyik mintázatról illetve technikáról hogy a következő szempontoknak kell megfelelniük:

- A foltoknak jó kontraszttal kell rendelkeznie, valamit lehetőség szerint a foltok melletti területeken ne legyen festék elmosódás, ezáltal a csökkenthető a képek zajszintje.
- Az egyik legfontosabb szempont a foltok mérete, a legtöbb irodalom is ezt emeli ki. Általánosságban igaz, hogy a foltok minimális mérete 3-5 pixel kell, hogy legyen, ugyanis az ennél kisebb foltok nem lesznek észlelve és szürke képet eredményeznek, ami rontja a kontrasztosságot.
- A keresőablak mérete döntő fontosságú a DIC technikában, hiszen ez az egyik legnagyobb hibaforrás is egyben. Méretének kellően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy legalább 3 foltot tartalmazzon. Méretének növelésével javul a korrelációs probléma megoldása, mivel javul a szürke szint eloszlása. Sajnos azonban ezzel a méret növeléssel romlik a térbeli felbontás illetve a pontosság. Ezekből

következik, hogy a foltok nem lehetnek szükségtelenül nagyok mert az a térbeli felbontás a mélységélesség elvesztéséhez vezet.

- További szempont, hogy lehetőleg méretben a foltok ne szórjanak nagyon, mert a kis méretű foltokkal kis méretű kereső ablak használható, amivel javul az elmozdulás mérések pontossága, de a nagyobb foltokhoz már nagyobb keresőre van szükség, ahol ez a pontosság már romlik. [20]

Az optimális foltméret meghatározása bonyolult feladat és függ a felhasználási területtől is. Az irodalomban olvasható tanulmányok illetve kísérletek igazolták, hogy a megfelelően festett foltok alkalmazása növeli a nyúlásmérések pontosságát, különösen ha a nyúlás mértéke meghaladja a 10%-ot, szemben az egyéb porszórási vagy akár nyomtatott technikákkal szemben. Továbbá több irodalom is bemutatja, hogy a spray flakonból történő festés esetén nehezebben kontrolálható a foltok mérete és eloszlása, ezzel szemben az AirBrush technika jobban beállítható és szabályozható.

A különféle technológiák és kivitelezési módszerek ismertetésén túl fontos tisztázni néhány alapvető dolgot a festékekről. A festékek fő összetevői a pigmentek, melyek a festék színét adják, a kötő-, hígító- és speciális anyagok. A festék lehet vízbázisú vagy olaj alapú. A vízbázisú festékeknél általában a száradás és a kikeményedés kevesebb időt vesz igénybe, mint az olaj alapú festékek esetében. Kedvelt festéktípus még az akrill. Az akril festék pigmentekből és műanyagrészcskékből álló festékemulzió. A részecskék kötőanyaga modifikált akrilgyanta. E festékek előnye, hogy testesen lehet felvinni szinte minden felületre. Rendkívül gyorsan, általában 2-3 óra alatt térhálósodnak, továbbá a mai akril festékek már vízzel is hígíthatók. A DIC technikában az irodalmi adatok illetve saját tapasztalatok alapján a következő tulajdonságú festéket kell alkalmazni [3, 19]:

- matt fényű – nem szabad becsillognia a mérés során
- rugalmas – követnie kell a próbatest alakváltozását
- több mint 24 óra után keményedjen csak ki teljesen
- könnyen szórható – lehetőség szerint ne kelljen hígítani mivel az a színeképet is rontja
- mélyfekete szín – jó és megfelelő minőségű pigmentet tartalmazzon
- vízbázisú – a beltéri alkalmazások esetén ez kedvezőbb

A felsorolásból jól látszik, hogy ezek gyakran egymásnak ellentmondó szempontok, így nehéz megtalálni a megfelelő festéket a megfelelő feladathoz, ráadásul a festékek összetétele országonként változhat az eltérő szabályozások miatt.

Festési paraméterek:

A szakirodalom többféle szempont szerint is osztályozza egy festési kísérlet paramétereit, fontos hogy ezek a paraméterek csak az AirBush esetében állíthatók be megfelelően.

- hígítási arány
- légáramlás vagy fúvókanyitás/méret
- szórási távolság
- üzemi nyomás

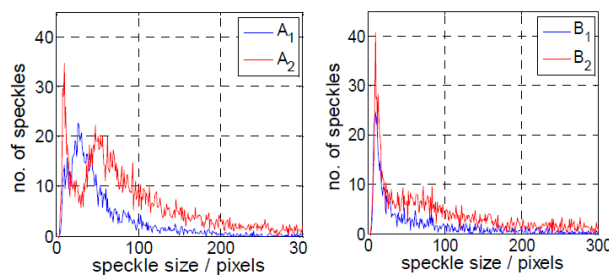
2.1.5. A mintázat számszerű minősítése és ellenőrzése

A mintázat készítés lépéseit és a legkedvezőbb mintázatok kialakításának módszereit az irodalom részletesen elemzi. Sokat idézett alapmű a Lecomte és szerzőtársai által készített kutatás [5], amely a mintázat és a mérés pontosságának kérdéseit tárgyalja. Itt jelenik meg a méret szerinti eloszlás hangsúlyozása, amelyet a szerzők a foltméretek eloszlásfüggvényének bevezetésével jellemeznek. Lényegében ezt a logikát követi a [17] publikáció, amely a sűrűségfüggvény, valamint a foltok átlagának és szórásának megadásával minősíti a mintázatokat. A [21] értekezés miniatűr, pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelésekhez készített mintázatot mutat be, amelyekről a szerzők megállapítják, hogy az 50%-os lefedettség tűnik a legkedvezőbbnek. További értékes hozzájárulást tartalmaz a témához a [22] irodalom.

Sok szerző foglalkozik a technikai részletekkel is. Lionello [20] mutat be egy nagyon hatékony stratégiát a mintakészítés teljes folyamatára. Külön kiemelhetők Reu 2012 és 2016 között megjelent munkái [8-16, 24], amelyek részletesen tárgyalják az előkészítés, valamint a technikai megvalósítás fázisait.

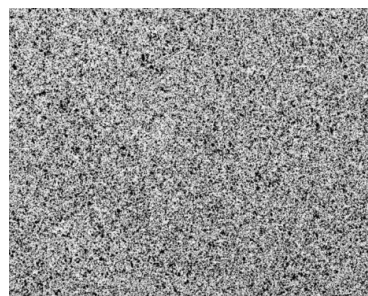
A mintázatok számszerű értékelésében két szemlélet jelenik meg. Egyik logika a mintázat morfológiai paramétereit alapján minősíti a képeket, míg a kísérleti vonulat tényleges, ismert alakváltozások és a DIC technikával értékelt nyúlások közötti eltérések (hibák) alapján értékeli a mintázatot. Az első logika szerinti legtöbbet idézett

mutató az átlagos intenzitás gradiens [23], amely a pontonkénti intenzitás gradiens vektorok négyzetes összegzésével számítható. További hasonló összefüggések a tématerület összefoglaló műveiben található [4, 22]. A kísérleti ellenőrzésen alapuló módszerek lényege az, hogy különböző mintázatokat hoznak létre rendszerint sík lemezeken, és azok elmozdulásával [4], vagy szakítóvizsgálattal deformált próbatestek makroszkopikus alakváltozásának mérésével állítják elő a referencia alakváltozás mezőt, amelyet a DIC technika eredményeivel hasonlítanak össze. Például a [17] publikációban a próbatestet 0,1%-os lépésekben 1% alakváltozásig deformálták, és az így kapott mérnöki nyúlást hasonlították össze a mintázatból értékelt nyúlásokkal. Az értékelés eredménye figyelemre méltó, ugyanis a foltok sűrűségfüggvényéből az következik, hogy a csúcs 10-50 pixel foltméret között van, jellemzően 25 pixel a legkedvezőbbnek ítélt mintázatok esetében. Ez többszöröse az irodalom [8] által ajánlott 3-5 pixel méretnek. Ugyanakkor a hisztogramokból az is látszik, hogy a spray technika sok apró foltot generál, a néhány pixeles foltok aránya 40% körüli.



2.15. ábra. AirBrush és spray módszerrel készült mintázatok hisztogramjai [17]

A definiált alakváltozásokkal végzett összehasonlítás azt mutatja, hogy legkisebb hiba az olyan mintázatok esetében keletkezett, ahol a sűrűségfüggvény néhány pixeltől 100 pixelig egyenletesen csökken le minimális gyakoriságra. Ahol ez az esés ennél meredekebb, ott nagyobb hibák jelentkeztek a DIC értékelésben.



2.16. ábra. Mintázat etalon, A GOM Aramis 5M kalibráló képe

A vázolt bizonytalanságok miatt az egyik meghatározó ipari szereplő, a GOM GmbH (www.gom.com) mintázat sorozatot ajánl a GOM Aramis felhasználóknak, amely a vizsgálandó objektum mérete szerint, illetve a kameracsaládokhoz igazodva három etalon képet tartalmaz, mérettartományoktól függően. A saját mérésekhez a 20-300 mm látómező tartományhoz (MV100) rendelt mintázat tekinthető mértékadónak, ezt a 2.16. ábra mutatja.

Az etalon és az elkészült mintázat összehasonlítása teljesen szubjektív, a képernyőn megjelenített minta és a próbatest mintázatának egybevetésén alapul. Emellett a GOM értékelő szoftvere mérés előtt egy nem közölt algoritmus alapján minősíti a mintázatot, és annak eredménye alapján engedélyezi a vizsgálat folytatását.

2.2. A lokális alakváltozások elemzése

A DIC technológia alkalmazásával végzett szakító vizsgálatok során jelentkezett a PLC effektus úgy, mint az a szakirodalomban is olvasható. Ezért ebben a fejezetben ezen jelenség, illetve a kutatásaim egyik fő irányát adó diffúz és lokális kontrakció határának ismertetését, illetve mérés technikai lehetőségeinek szakirodalmi háttérét mutatom be.

2.2.1. A PLC effektus által okozott lokális alakváltozások

A Portevin-Le-Chatelier (PLC) effektus a jelenséget felismerő kutatók nevéől ismert [25], oka a dinamikus alakítási öregedés (DSA), amely az alumínium mátrixban oldott magnézium atomok diszlokációkat blokkoló hatásának tulajdonítható. Ahogy szakítóvizsgálat során növekszik a feszültség, a diszlokációk leszakadnak az akadályról, amely ugrásszerű nyúlás növekedést és a feszültség csökkenését okozza [26-29]. Makroszkopikus szinten a nyúlás lokalizáció keskeny sávok formájában jelenik meg, amelyek intenzív nyírófeszültséggel párosulnak [30]. Ezek a deformációs sávok okozzák a lemez felületén is jelentkező nyomokat, melyek miatt az AlMg lemezek csak belső panelekhez használhatók [31].

A szakítódigramon tapasztalt feszültséglengések mellett a lokális alakváltozások is jól jellemzik a PLC effektust, amely DIC technikával mutatható ki [28,30-37]. A nyúlások megjelenítésére a DIC technika skálázott színes ábrákat, valamint digitalizált nyúlásértékeket is ad. Ezek segítségével a PLC sávok nyúlása, kiterjedése és mozgási

sebessége is kiértékelhető. Ugyanakkor az irodalomból az is megállapítható, hogy ezen fogalmak értelmezése és számszerű jellemzése nem egyértelmű. Például a PLC sáv nyúlása (ϵ_{PLC}) a [28] irodalom szerint a nyúlás növekménnyel azonos, a [30] irodalom pedig úgy definiálja, mint a környezet nyúlása és a maximális nyúlás különbsége. Egyes szerzők a zéró nyúlástól számítják a PLC nyúlást [34-37], emiatt a közölt értékekben is különbségek mutatkoznak. Hasonlóan a sávok szélességét is vagy a nyúlás emelkedés talppontján, vagy fél magasságban határozzák meg [37].

Ezek a bizonytalanságok is indokolják, hogy a korszerű mérés technikára támaszkodva ezeket a definíciókat egységes formába hozzam, és úgy értékeljem a saját mérési eredményeket.

2.2.2. A diffúz és lokális kontrakció

A diffúz és lokális kontrakció határának ismerete, valamint a határon mért alakváltozás nagysága a lemezek alakíthatósága szempontjából kiemelt fontosságú, ugyanis a gyakorlati alakító műveletek számítógépes tervezésekor az alakítás határát a lokális kontrakció bekövetkezésénél jelölik ki. A mindennapi gyakorlatban használatos alakíthatósági diagramok is a lokális kontrakció összetartozó értékeit mutatják az ϵ_1 - ϵ_2 síkon, ezek meghatározása lényegében ugyanarra a feladatra vezethető vissza, mint szakítóvizsgálat esetében.

A vázlatosan bemutatott jelenségek elemzésével az irodalom sokrétűen foglalkozik. A kontrakció jelenségének felismerése egyidős az első szakítóvizsgálat kidolgozásával, így Considère már 1885-ben megadta a folyamat értelmezését [38]. A kontrakció megjelenésének magyarázata a szakítóvizsgálatnál az, hogy az egyenletes alakváltozás határának elérésekor az anyag felkeményedése már nem képes kompenzálni a keresztmetszet csökkenését, ezért az erő növekedése megáll. Ezt az állapotot a $dF=0$ feltétel fejezi ki, ahol F a tengelyirányú erőt jelenti. Ebből a feltételből következik, hogy

$$\frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1} = \sigma_1 \quad (1)$$

azaz a feszültség alakváltozás szerinti deriváltja megegyezik a feszültséggel, ahol σ_1 a húzófeszültség. Ettől a ponttól indul meg a diffúz kontrakció, amely az instabilitás tartományának kezdete. Képlékeny anyagoknál hengeres próbatest esetében kialakul

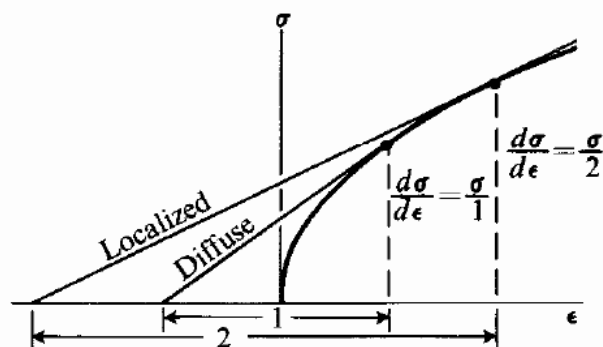
egy kontrakciós zóna, amelynek hossza közelítően a próbatest átmérőjének felel meg. A továbbiakban a húzó igénybevétel hatására a kontrahált átmérő egyre csökken és a folyamatos felkeményedés mellett bekövetkezik a törés, melynek eredményeként a tört keresztmetszetek csésze illetve csonka kúp (cup and cone) formát mutatnak.

A lemezek szakításakor ez a folyamat másként játszódik le. A mechanikai instabilitás eredményeként itt is megindul a diffúz kontrakció, amely a lemez viszonylag nagy tartományára terjed ki és a szélesség minimális csökkenésével jár. Ez a folyamat azonban heterogén alakváltozásba fordul át és erőteljes lokális alakváltozás alakul ki egy viszonylag keskeny sávban, amely megközelítően 55°-os szöget zár be a próbatest tengelyével. Ebben a sávban a szélesség irányú alakváltozás elhanyagolható, viszont erőteljes vastagságcsökkenés jelentkezik, amely töréshez vezet.

Hasonló instabilitási feltétel írható fel a diffúz kontrakció végét, a lokális kontrakció fellépését jellemző esetre is [38], ennek alakját a (2) egyenlet mutatja.

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \frac{\sigma_1}{2} \quad (2)$$

Viszonylag egyszerűen igazolható, hogy az (1) és (2) egyenlet szerinti feltételből meghatározható a diffúz kontrakció kezdete és vége, ha a folyási görbe az ismert Hollomon-Ludwik féle $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ formában adott, ahogy ez a Considère kritérium alapján Hill klasszikus művében [39] és számos hivatkozásban megtalálható [40,41]. E szerint a diffúz kontrakció kezdete az egyenletes nyúlás határán az $\varepsilon_D = n$ összefüggéssel adható meg. A lokális kontrakció fellépése pedig az $\varepsilon_L = 2n$ képlettel írható le. Ezt szemléletesen mutatja a 2.17. ábra.



2.17. ábra. Diffúz és lokális kontrakció bekövetkezésének szemléltetése [39]

A bemutatott összefüggéseket elsősorban lágyacélokra dolgozták ki, de a diffúz kontrakció kezdetét jelző $\varepsilon_D = n$ képlet közelítően más anyagokra is érvényes, ahogy ezt számos publikáció alátámasztja, például egyes alumíniumötvözetekre a [42] illetve nagyszilárdságú acéllemezekre a [43] irodalom.

A jelen vizsgálat tárgyát képező AlMg ötvözetekre viszont a (1) és (2) képletek korlátozottan érvényesek, mivel egyrészt a folyási görbéjük nem írható le pontosan a $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ formulával, másrészt az egyenletes nyúlás határán túl a kontrakciós szakasz viszonylag rövid, a töréshez tartozó alakváltozás mindössze 20...30%-kal több az egyenletes nyúlásnál, tehát nem is értelmezhető az $\varepsilon_L = 2n$ határ a lokális kontrakció kezdetére. A [41] irodalom szerzői hivatkoznak a továbbfejlesztett Hill kritériumra, mely szerint az instabilitási határ az általánosított

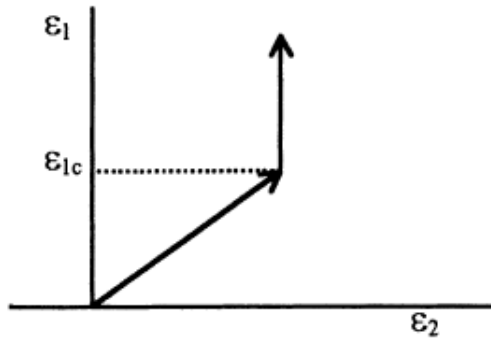
$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{Z} \quad (3)$$

összefüggéssel írható le, ahol a Z a folyási függvényből származtatva adható meg a diffúz és lokális kontrakcióra. A Hollomon-Ludwik közelítés korlátozott érvényességét más anyagmodellek bevezetésével küszöbölik ki, például a Voce-képlettel. Ennek egyik ismert alakja a $\sigma = B - (B - A) \cdot e^{-m\varepsilon}$ összefüggés, melyet a (3) egyenletbe helyettesítve adódik a határalakváltozás:

$$\varepsilon_L = \frac{1}{m} \ln[(B - A) \cdot (Zm + 1)/B] \quad (4)$$

Hasonlóan levezethető, hogy a Hollomon-Ludwik összefüggés használatával az $\varepsilon_L = Zn$ képlet vonatkozik a lokális kontrakció bekövetkezésére. A korábbi elméleteket foglalja össze és fejleszti tovább a [44] irodalom, mely az alapvető feltételezéseket a következőkben rögzíti:

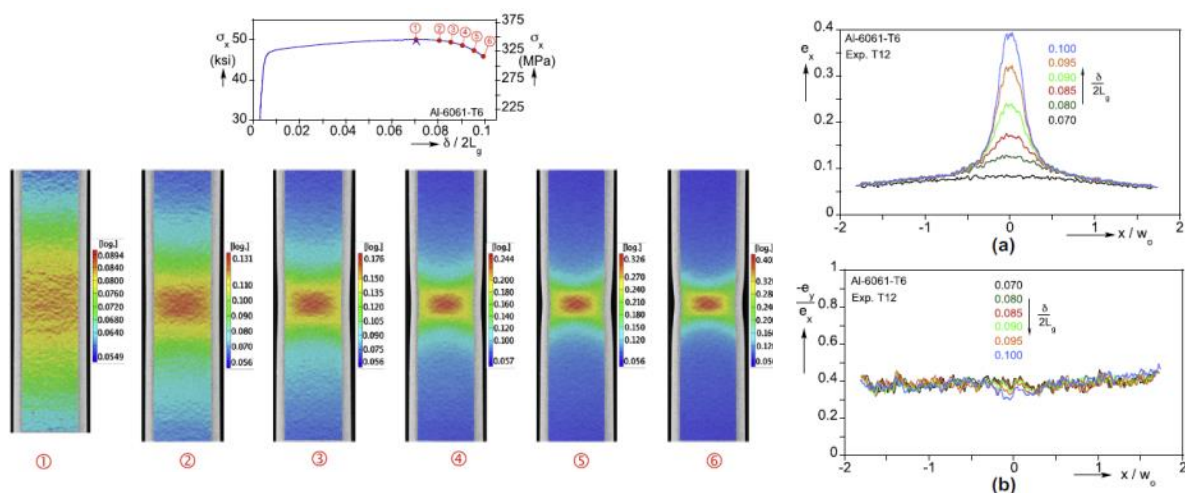
- A lokális kontrakció az erő instabilitáshoz kapcsolódik, azaz $dF = 0$.
- Elméletileg és kísérletileg igazolható, hogy a lokális kontrakció csak sík alakváltozási állapotban következik be. Ez azt jelenti, hogy az alakváltozás történetben egy ugrás jelentkezik a térbelitől a sík alakváltozási állapotba való átmenettel, ahol $d\varepsilon_2 = 0$ (2.18. ábra).
- Az ugrás után az alakváltozási út a $j = 0$ egyenlettel írható le, ahol $j = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$



2.18. ábra. Alakváltozási út váltása sík alakváltozásra [44]

Ezekkel a feltételezésekkel nem csupán a szakítóvizsgálat során bekövetkező diffúz és lokális alakváltozás határa írható le, hanem a [44] irodalomban ezek kiterjesztése is megtalálható a teljes alakíthatósági határgörbére az alakváltozási út (j) és a keményedési kitevő (n) függvényében.

Az itt bemutatott és az irodalomban található további modellek fontos információkat szolgáltatnak a lemezek alakításakor tapasztalható diffúz és lokális kontrakció értelmezéséhez, melyeket jól kiegészítenek a digitális optikai módszerekkel nyert eredmények. Ezekkel ugyanis közvetlenül megfigyelhetők a próbatesteken kialakuló lokális alakváltozások, így a mért mechanikai jellemzők és a képi információk között is kapcsolatok teremthetők. A legtöbb publikáció végeelem analízissel is alátámasztja a tapasztalt lokális alakváltozási folyamatokat.



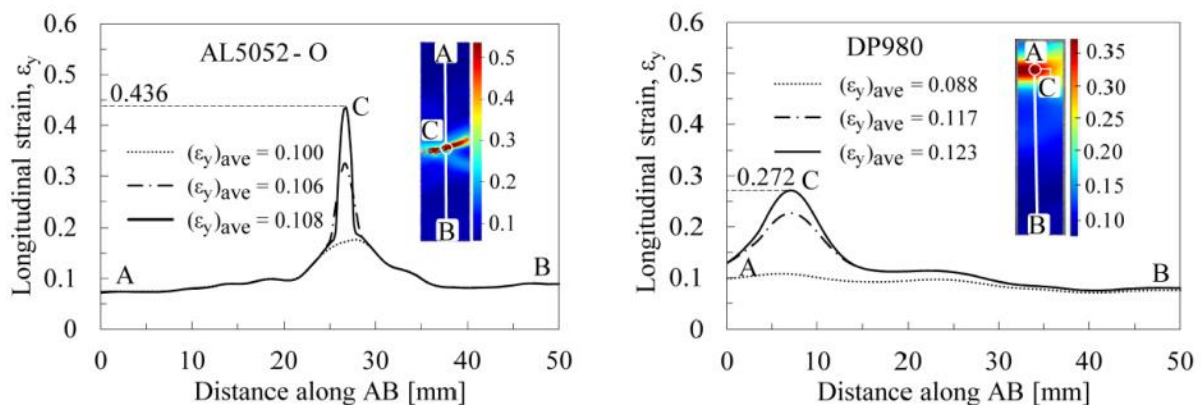
2.19. ábra. Diffúz és lokális kontrakció DIC felvételei [47]

A [45] publikáció egy lágyacélhoz hasonló fiktív anyagot alkalmaz ($E=200$ GPa, $\nu=0,3$) és ezt modellezi végeelem számításokkal. A modell szerint a lokális kontrakció

a lemez tengelyére merőleges intenzív nyúlási zóna formájában jelentkezik, amely lencse alakú és nem éri el a lemez szélét a szakadás előtti pillanatban.

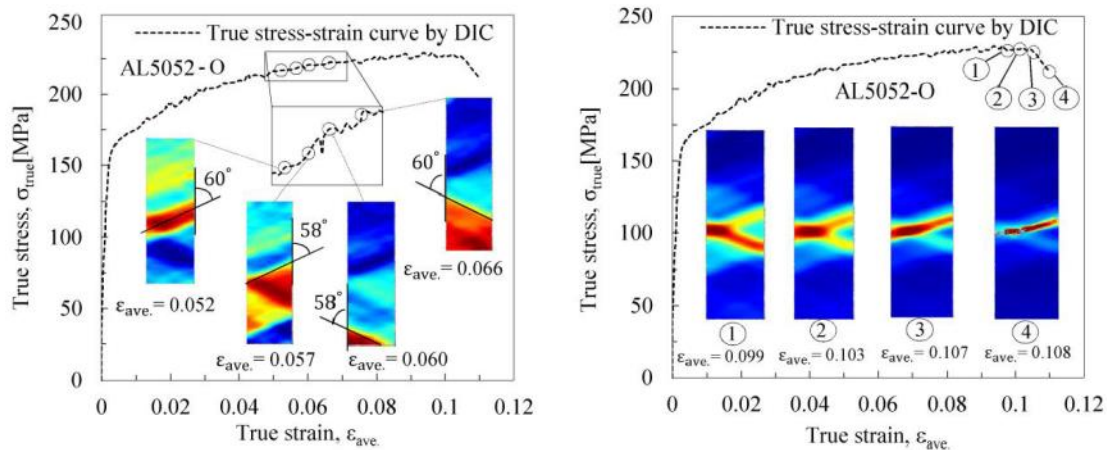
A [46] és [47] publikáció már konkrét lokális alakváltozási képeket közöl, ahogy ezt a 2.19. ábra mutatja. Az ábra bal oldala szemlélteti a DIC felvételeket és azok helyét a szakítódiagramon. A szerzők értékelése szerint a 2 és 3 képek a nyúlás növekvő mértékű diffúz koncentrációját mutatják a próbatest középső szakaszán, és ez a koncentráció lokalizációba megy át a 4-6 képeken. A 2.19. ábra jobb oldalán az Al-6061-T6 lemez alakváltozási görbéi láthatók a lemez hossz tengelye irányában felvéve a bal oldali képen azonosítható pontokra. Megállapítható, hogy az ϵ_x főnyúlás a jellegzetes lokalizációs folyamatot mutatja, a két főnyúlás hányadosa pedig közel állandó 0,4 körüli érték. A szerzők nem foglalkoznak a diffúz és lokális kontrakció határának kijelölésével, de nagyon szemléletesen bemutatják magát a folyamatot.

A szakadás előtti pillanatban felvett alakváltozás térképet és a hosszirányú metszeten mért tengelyirányú nyúlás profilt mutat a 2.20. ábra AA5052-O jelű alumíniumötvözetre és DP980 típusú acéllemezre [48]. A 2.19. ábrával ellentétben ennél az alumíniumötvözetnél már megjelenik a jellegzetes, a tengellyel közelítően 55°-ot bezáró intenzív alakváltozási sáv, melynek maximális értéke 0,436 logaritmusos nyúlás. A nyúlás időbeli gyors növekedésére utal az, hogy 0,1 átlagnyúlásnál a maximum csak 0,17 volt, amely a 0,108 átlagnyúlás esetében elérte a szakadás előtt jelzett maximumot. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy a nagyszilárdságú acéllemez esetében a nyúlás profil sokkal szélesebb és laposabb, a maximum mindössze 0,272 volt.



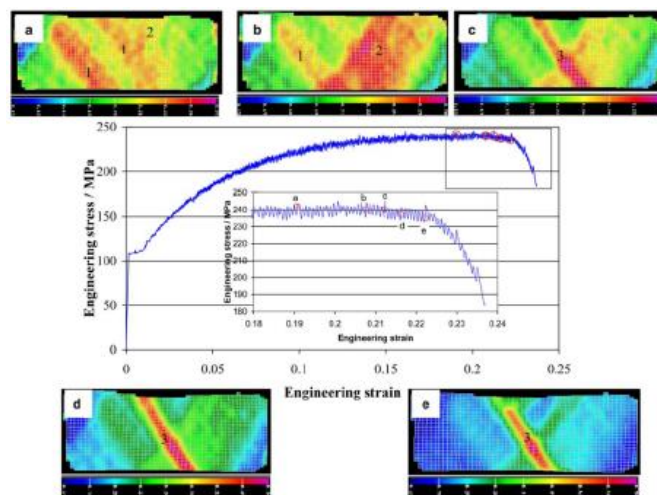
2.20. ábra. Lokális kontrakció megjelenése alumínium ötvözet és nagyszilárdságú acéllemez esetében [48]

A 2.21. ábrán jól látható az AlMg ötvözetekre jellemző PLC effektus az egyenletes nyúlás tartományában (bal oldali kép). A véletlenszerűen generálódó B-típusú sávok 58...60°-os szöget zárnak be a próbatest tengelyével. A jobb oldali képen látható a lokalizált kontrakció, mely több irodalom egybehangzó magyarázata szerint megelőzi a törést, és amely a nyírási sáv kialakulásával és további koncentrálásával jön létre. Ennek kritikus szerepe van a törés folyamatának kialakulásában.



2.21. ábra. PLC effektus és nyírási sáv kialakulása [48]

Hasonló képeket mutat be a [49] publikáció, melyek a 2.22. ábrán láthatók.

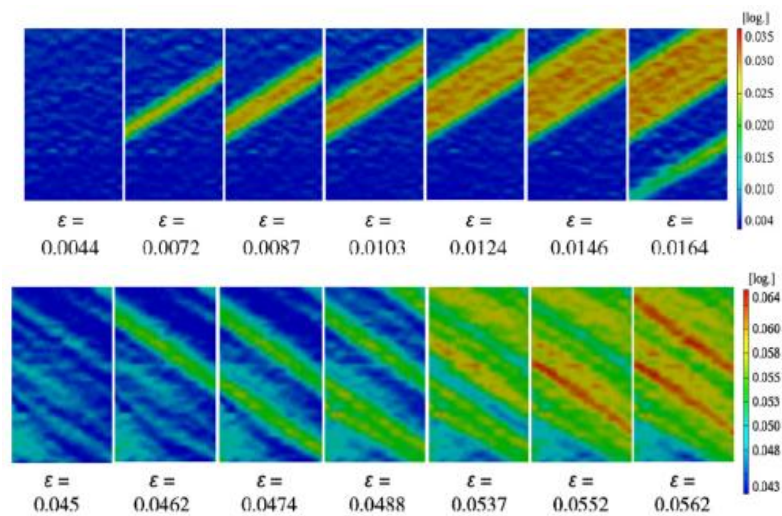


2.22. ábra. AA5754 lemez DIC felvételei [49]

A felső három kép (a, b, c) a diffúz kontrakciót szemlélteti, az alsó d és e képek pedig a nyírási sáv kialakulását. A szerzők megállapítása szerint a PLC effektus is fontos szerepet játszik a diffúz kontrakció megindulásában, és ha a PLC sávok interakcióba lépnek a nyírási sávokkal, akkor erősítik a lokális kontrakciót. Ezért lehetséges, hogy

az AlMg ötvözeteknek kisebb a kontrakciós nyúlása, mint a többi alumíniumötvözeté. A szerzők megerősítik azt a megállapítást is, hogy ezeknél az ötvözeteknél üregképződés és növekedés alig jelentkezik a nyírási sávban, és még nagy nyúlásoknál sincs erőteljes belső anyagkárosodás.

Az [50] irodalom mind a PLC-effektus, mind a nyírási sávok bemutatásával igazolja a DIC-technika alkalmazhatóságát a szakításnál tapasztalható jelenségek megfigyelésére az AA5754 ötvözetnél.



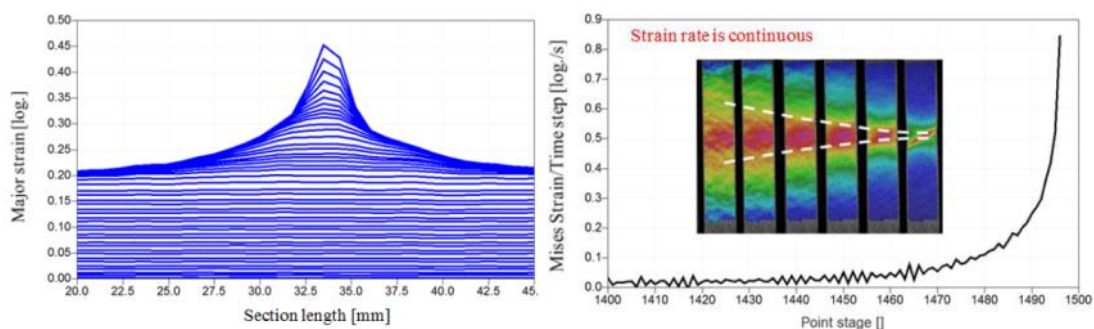
2.23. ábra. B-típusú PLC-sávok [50]

A 2.23. ábra felső képsora az alakváltozás kezdeti szakaszában mutatja be egy PLC-sáv kialakulását és szélesedését (előzetes alakítás 0,15; $T=223\text{ °K}$; nyúlássebesség $6 \cdot 10^{-4}\text{ s}^{-1}$), az alsó képsor pedig a kissé nagyobb átlagnyúlásnál szemlélteti a keletkező PLC-sávokat ($T=298\text{ °K}$; nyúlássebesség $6 \cdot 10^{-4}\text{ s}^{-1}$). Ez utóbbi képen jól láthatók a B-típusú PLC sávok jellegzetességei, tehát az alakváltozási sávok véletlenszerű helyeken keletkeznek és csak kevéssé terjednek. Több sáv is megfigyelhető egyidejűleg a próbatest hossza mentén, melyek $55\text{...}60^\circ$ -os szöget zárnak be a tengellyel és a sávok egy idő után eltűnnek, majd újak keletkeznek. További fontos megállapítások vonatkoznak a törést megelőző nyírási sávokra. A DIC felvételek azt mutatják, hogy az intenzív nyírási sáv, vagyis a lokális kontrakció kialakulása után a próbatest további részein a nyúlás már alig növekszik, az alakváltozás csak a sávra koncentrálódik. Ezt támasztják alá a töretről készült pásztázó elektronmikroszkópos képek is, azaz sekély, megnyúlt gödrök láthatók azokon. Mindezek a megfigyelések alátámasztják a [49] irodalom megállapítását, hogy a nyírás

lokalizáció lényeges szerepet játszik a törésben.

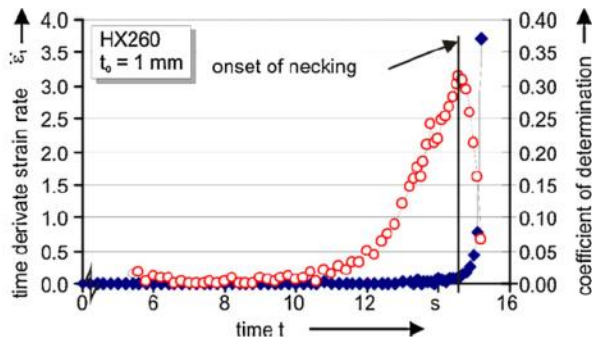
Az eddig bemutatott példák a szakítóvizsgálathoz kapcsolódva szemléltették a diffúz és lokális kontrakció jelenségét és azok határának kijelölését. Az alakíthatósági határdiagramok (FLD) felvételekor ugyanez a probléma jelentkezik, mivel a görbe pontjai a diffúz alakváltozásból a lokális alakváltozásba való átmenetet mutatják, tehát a lokális alakváltozás megindulásának egzakt meghatározása kulcsfontosságú az egész vizsgálat szempontjából. Erre kínál megoldást az ISO 12004-2-2009 szabvány, mely lényegében a szakadást megelőző kép nyúláseloszlásából határozza meg a lokális kontrakció kezdetéhez tartozó ϵ_1 és ϵ_2 értékeket. A szakirodalom ezt időtől független (time independent) megoldásnak nevezi, mivel a szakadáskori állapotból következtet vissza a lokális kontrakció megindulására. Ugyanakkor léteznek időtől függő (time dependent) értékelési módszerek is, melyek a diffúz és lokális kontrakció folyamatából, az ott mért nyúlások matematikai elemzéséből állapítják meg a határokat.

Erre jó példa az [50] irodalom, melynek szerzői a lokalizációt a Nakazima teszt körülményei között tanulmányozták, elsősorban annak időbeli változását vizsgálták. Ezt mutatja a 2.24. ábra, ahol jól látható az idő függvényében a nyúlás növekedése a hosszirányú metszeteken, valamint ezt a jelenséget kísérő DIC felvételeken. Az ábra jobb oldali képe szemlélteti az intenzív nyúlási sáv szűkülését és mutatja a nyúlássebesség alakulását is.

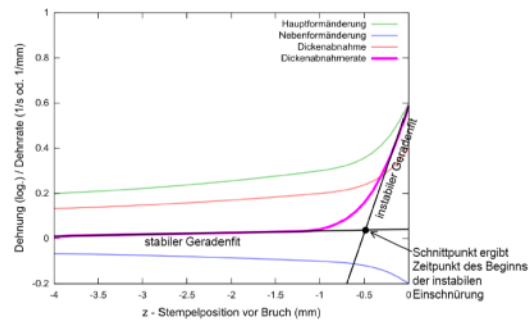


2.24. ábra. Nyúlás lokalizáció Nakazima próbatesten [50]

A bemutatottól eltérő, időfüggő értékelést javasol az [51] irodalom, melynek elvét a 2.25.a. ábra mutatja.



a) Merklein modell [51]



b) GOM értékelési módszer

2.25. ábra. Időtől függő módszerek a lokális kontrakció bekövetkezésének meghatározására [51]

A képen a nyúlássebesség deriváltja (a nyúlás idő szerinti második deriváltja) látható a kontrakciós zónában, valamint a determinációs együttható. Ahol a sebesség deriváltjának intenzív növekedése kezdődik, ott jelenik meg a lokális kontrakció, amelyet karakterisztikusan jellemez a determinációs együttható maximuma is. A 2.25.b. ábra a GOM GmbH által javasolt megoldást mutatja, amely a kontrakciós zóna vastagságcsökkenésének deriváltja segítségével határozza meg a lokalizáció kezdetét a görbe emelkedő szakaszához húzott érintő segítségével. Nyilván hasonló módszerek a szakítás során felvett nyúlás-idő függvények esetére is alkalmazhatók.

2.3. Az intermetallikus fázisok jellemzése

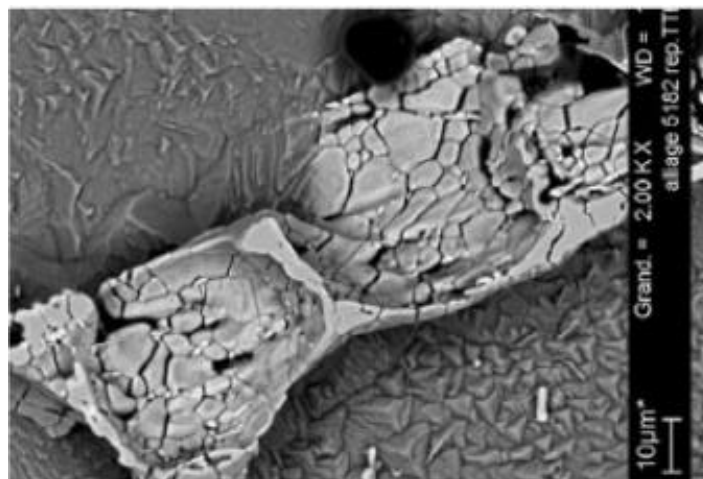
A szakirodalmi áttekintés harmadik fő részében az intermetallikus fázisok alakíthatóságára gyakorolt hatását ismertetem. Ahogy az korábban is olvasható volt a magnézium és PLC effektus összefüggésin túl a további ötvözők az irodalom szerint az intermetallikus fázisok révén fejtik ki hatásukat. Ezeknek a fázisoknak jelenléte, elhelyezkedése döntően meghatározza az alakíthatóságot, ezért az intermetallikus fázisok megjelenését segítő ötvözők elemzésével is foglalkoztam.

2.3.1. Az intermetallikus fázisok hatása az alakíthatóságra

Az alumíniumlemezek szilárdságát és alakíthatóságát jelentős mértékben befolyásolja az alapmátrixban nem oldható intermetallikus fázisok mennyisége, alakja és eloszlása. Különösen jellemző ez a 3xxx és 5xxx sorozatú ötvözetekre, melyek mindig tartalmaznak ilyen fázisokat képző elemeket, például vasat, mangánt és szilíciumot. Az említett ötvözetek közül kiemelt jelentőségű az AA3104 jelű lemez, mely néhány tized mm vastagságban különféle csészék és dobozok egyik alapanyaga,

valamint a jármű karosszériák belső paneljeihez használt, mélyhúzással és nyújtva húzással alakított AA5754 és AA5182 jelű alumínium-magnézium ötvözetek.

Az intermetallikus fázisok az öntés során keletkeznek és részben a megszilárdulás folyamán, részben a tuskó homogenizáló izzítása közben különböző átalakulásokon mennek át. A meleghengerlés, majd a végleges vastagságra történő hideghengerlés alatt a dendrites szerkezet összetöredezik és a végtermékben különböző formájú rideg fázisként jelenik meg. Az öntés és azt követő hőkezelés során végbemenő folyamatokat az [52] és [53] irodalom részletesen tárgyalja az 5xxx sorozatú ötvözetekre. A legfontosabb második fázisok az Al_3Fe , Al_6Mn , $Al_x(Fe, Mn)$, $Al_x(Fe, Mn)_ySi_z$, ahol az x , y , z indexek arra utalnak, hogy a diffúziós izzítás során a fázisok összetétele is változik. Nagyobb Mg koncentrációnál a legfontosabb az Al_6Mn fázis, melyben a Mn-t helyettesítheti a Fe, így alakul ki a nagyon gyakori a $\beta-Al_6(Fe, Mn)$ fázis. Alacsonyabb Mg-koncentrációnál, vagy 560-580 C°-on végzett izzítás hatására Si kapcsolódik a β -fázishoz, létrehozva a négy elem által alkotott $\alpha-Al_x(Fe, Mn)_ySi_z$ fázist, melynek tipikus példája az $\alpha-Al_6(Fe, Mn)_3Si_2$ összetétel. Végül kialakulhat az AlMgSi ötvözetek jellegzetes fázisa, az Mg_2Si is. Az öntés után látható dendrites szerkezet rendkívül változatos alakú. A síkmetszetekről ismert jellegzetes képeknél sokkal informatívabbak az oldásos feltárással készült térbeli ábrázolások, melyek inkább leveles szerkezetet mutatnak, ahogy az [53] irodalom alapján a 2.26. ábra szemlélteti.



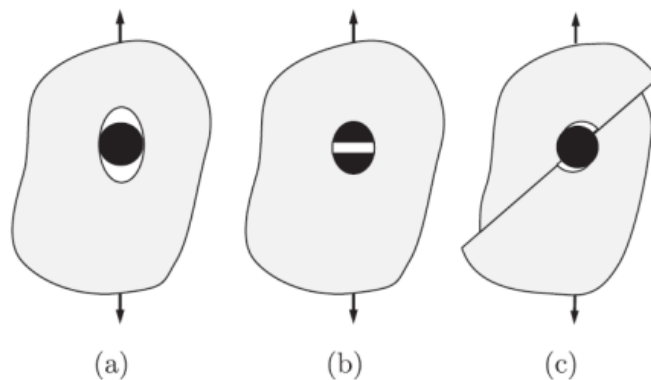
2.26. ábra. Intermetallikus részecskék 3D képe homogenizáló izzítás és 10% hideghengerlés után [53]

Ezek a szerkezetek a meleghengerléskor az alakítás irányába rendeződnek és

összetöredeznek, így hidegen hengerelt állapotban a közel gömbszerűtől a nyújtott téglalap alakzatokig minden forma látható, a 0,5-1 μm átmérőjű gömbök pedig a szekunder kiválás során keletkezett Mg_2Si jelenlétére utalnak.

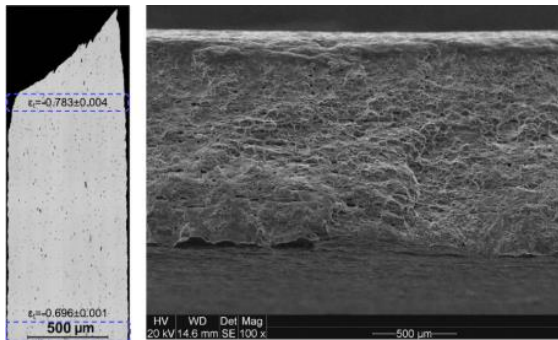
További, a bemutatott fázisok 5xxx ötvözetekben való megjelenésével foglalkoznak az [54-57] irodalmak. Hasonló részletességgel mutatják be az AA3xxx jelű ötvözetek intermetallikus fázisait és azok átalakulását a [59-62] publikációk, különös tekintettel az AA3104 lemezre. Ebben az ötvözetben lényegében ugyanezek a fázisok találhatóak, mint az AlMg ötvözetekben.

A szakirodalomban általánosan elfogadott, hogy a törés a rideg második fázist tartalmazó képlékeny anyagokban a második fázisú részecskék körül meglévő vagy kialakuló üregek képződésével és terjedésével vagy a részecskék törésével kezdődik, majd ezek a repedések növekedve egymással összekötődnek és így eredményeznek makroszkópikus törést. A részecskék körül kialakuló üregek képződését és a törés folyamatát szemléltetik a [63,64] irodalmak. A 2.27.a) ábra a részecske körül kialakuló olyan üreget mutat, melynél a részecske elválik a mátrixtól, a b) ábra a részecske rideg törésével létrejövő üregképződést szemlélteti húzásra, a c) ábra pedig a nyíró igénybevétel hatására kialakuló viszonyokat tartalmazza.

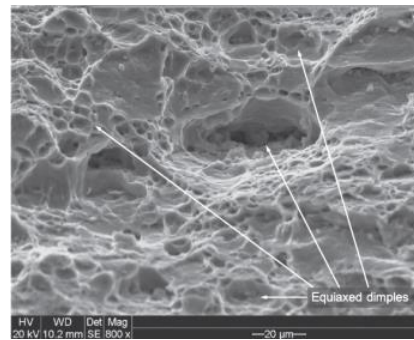


2.27. ábra. Üreg képződés folyamata [63]

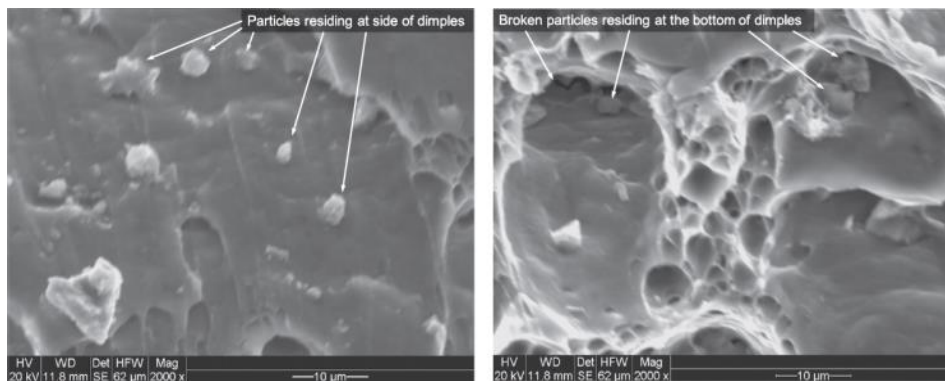
A [64] cikkben a szerzők AA5182-es ötvözet törését vizsgálták és pásztázó, valamint elektronmikroszkópos felvételekkel igazolták az intermetallikus részecskék szerepét a törés folyamatában.



a) A töret makroszkópikus képe



b) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel



c) Részecskék elhelyezkedése az üregekben

2.28. ábra. AA5182-O lemez töretfelülete [64]

A 2.28. ábra olyan töretet mutat, amely a Marciniak teszt ekvi-biaxiális alakítása során keletkezett. Az a) képen látható az egész keresztmetszetre kiterjedő töret és a csiszolat, a b) jelű pásztázó elektronmikroszkópos felvétel pedig a kagyló alakú mélyedéseket (gödrök, „dimples”), valamint a mélyedések aljában lévő intermetallikus fázis közelítően 5-10 μm méretű részecskéit mutatja. Ez is igazolja, hogy a törés az említett részecskékből indul ki. További részleteket tartalmaz a c) ábra, amelynek a bal oldali képén láthatók a kagyló alakú üregek oldalán elhelyezkedő kis gömb alakú részecskék, ezek a magnéziumszilicid fázisok, a jobb oldali pásztázó elektronmikroszkópos felvételen pedig Al(Mn,Fe) típusú részecskék láthatók. A gödröket elválasztó alapanyag szívós töretet mutat. Az optikai mikroszkópos metszeti és az elektronmikroszkópos képeken az is jól látszik, hogy a téglatest alakú részecskék hengerlés irányú oldalán a metszetben háromszögűnek látszó üregek vannak, amelyek a hideghengerlés során keletkeztek. Ezek az üregek is fontos kiinduló helyei a törésnek.

A törési folyamat és az intermetallikus részecske jellemzők további kapcsolatát

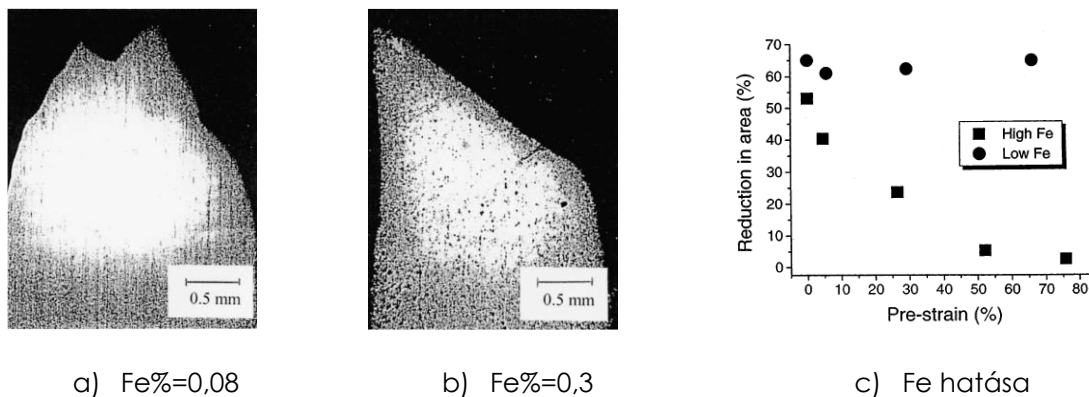
elemzi a [65] irodalom. Nyilvánvaló, hogy az intermetallikus fázisok mennyiségén kívül azok elhelyezkedése is befolyásolja az alakíthatóságot. A [66] publikációban Hu és szerzőtársai különböző modell eloszlásokat generálva végelelemes számításokkal igazolták, hogy például az egyenletesen eloszlalt részecskék hatása nem olyan kedvezőtlen az alakíthatóságra, mintha sávosan lennének jelen a mátrixban. Figyelemreméltó Sidor és szerzőtársainak elemzése [67], akik végelelemes számításokkal igazolták, hogy az intermetallikus részecskék környezetében hengerlés során erősen heterogén alakváltozás mező alakul ki, amelynek értéke sokkal nagyobb, mint a környezet átlagos alakváltozása. Ez részben növeli az üregképződési hajlamot, részben pedig specifikus texturát hoz létre a részecske által befolyásolt deformációs zónában az újrakristályosodás során. Mindezek kombinációja anizotrópiát és gyengébb alakíthatóságot okozhat.

A kutatásokból a [64] publikáció szerzői az alábbi következtetéseket vonták le:

- A vizsgált AA5182-O lemezben minden körülmények között képlékeny törés megy végbe.
- Kisebb feszültségeken az üregképződés alapvető oka a nagy méretű Al(FeMn) típusú intermetallikus részecskék jelenléte, bár a kis Mg₂Si részecskék is hozzájárulnak a törésmegakadásnak, elsősorban a részecske és a mátrix közötti kötés megszűnésével. Ez a jelenség elsősorban ott figyelhető meg, ahol az Al(FeMn) típusú és Mg₂Si részecskék közel vannak egymáshoz.
- Az ekvi-biaxiális alakítású Marciniak-próbatetek korlátozott alakváltozást mutattak az egyenletes nyúlás határától a törésig és több üreg volt megfigyelhető a repedéshez közeli területeken, mint az egyenletes alakváltozás zónájában.
- Ha az alakítás során nagy nyomófeszültségek is fellépnek, azaz a feszültségállapot mutató negatív irányba tolódik el, akkor a végső törésmegakadás később következik be.
- Végkövetkeztetésként megállapítható a kísérletekből, hogy az AA5182 lemez akkor alakítható biztonságosan, ha a képződött üregek százalékos aránya 0,5% alatt marad, viszont ha meghaladja a 0,6...0,8%-ot, akkor már fennáll a korai törés veszélye.

2.3.2. Az intermetallikus fázisok mennyiségét meghatározó tényezők

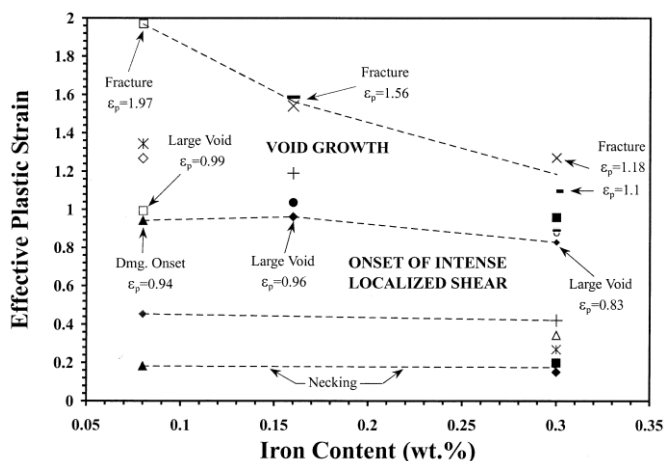
A vizsgált alumíniumötvözetekben megtalálható intermetallikus fázisokkal kapcsolatban fontos ismerni azt is, hogy milyen tényezők befolyásolják a fázisok mennyiségét. Az előbbieken bemutatott fázisok összetétele azt mutatta, hogy ebben a legfontosabb szerepe a vasnak mint szennyezőnek lehet, de a szilícium és egyéb elemek hatása sem elhanyagolható. A [68-71] irodalmak elsősorban a Fe változását elemzik 0,08% és 0,3% összetétel határok között AA5754 ötvözet esetében.



2.29. ábra. A Fe tartalom hatása a töretre és alakíthatóságra [70]

A 2.29. ábra Sarkar és szerzőtársai kutatásait mutatja be [70], akik a jelzett két Fe tartalmú AA5754 ötvözetet vizsgálták hajlító és szakítóvizsgálattal. Példaként az ábra bal oldalán a kétféle töret összehasonlítása látható, a kis vastartalmú ötvözet erőteljes befűződést, kontrakciót mutat, ezzel szemben a nagyobb Fe tartalom jellegzetes nyírásos törést eredményezett, melynél minimális kontrakció mutatkozott. A szerzők vizsgálták az előzetes alakítás hatását is az alakíthatóságra, ezt mutatja a 2.29.c. ábra. Látható, hogy a szakadáskor mérhető kontrakció mértékét a kis vastartalmú ötvözet esetében az előzetes alakítás nem befolyásolta, maradt a viszonylag magas 60...70%-os érték. Ezzel szemben a nagyobb vastartalmú ötvözet kontrakciója erőteljesen csökkent az előzetes alakítás hatására, tehát ennek alakváltozási tartalékai sokkal kisebbek voltak. Ugyanezeket a megállapításokat igazolták a hajlító vizsgálatok is.

Rendkívül informatív a Spencer és szerzőtársai által publikált két cikk [68,69] amelyek egyenes keresztmetszetű és bemetszett szakító próbatestek segítségével mutatták ki a Fe-tartalom hatását.

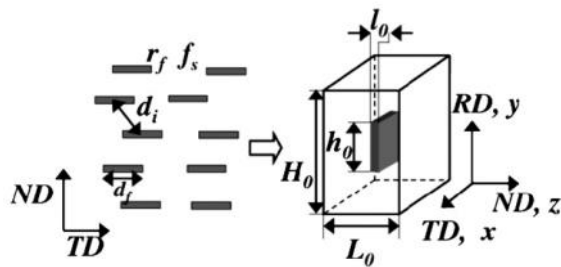


2.30. ábra. A Fe tartalom hatása a szakadási jellemzőkre [68]

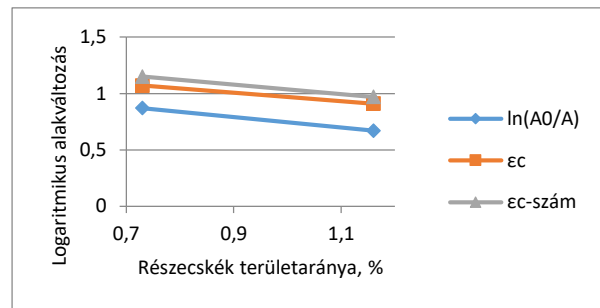
Az ábrából jól látható, hogy a vas növekedése az ötvözetben a diffúz kontrakció (necking) megindulására alig van hatással (0,2% nyúlás). Az intenzív lokalizált nyírás a 0,4-0,8 maradó alakváltozás tartományában indul meg, és még ennek felső határa sem mutat erős függést a Fe tartalomtól. Jelentős változás az üregképződés fázisában van, a kis vastartalmú ötvözetben hatszor kisebb az intermetallikus fázis térfogataránya, mint a 0,3% Fe tartalomnál, ezért előbbi esetben a maradó alakváltozás a 2 értéket is eléri, amely a vastartalom növekedésével 1,2-re csökken. Bemetszett próbatest szakításakor a jelenségek hasonlóak ahhoz, ami a 2.30. ábrán látható, de a háromtengelyű feszültségek jelenléte miatt a törésig elviselt alakváltozások lényegesen kisebbek, induló értékben 2 helyett csak 1,4-et mutatnak. Ez is jelzi, hogy a feszültségi állapot milyen jelentős hatást gyakorol a törési alakváltozásra.

A bemutatott példák egyértelműen igazolják, hogy a Fe tartalom növekedésével nő az intermetallikus fázisok térfogataránya és jelentősen csökken a törési nyúlás. Ugyanakkor a diffúz kontrakció határa alig változik és a lokális kontrakció megindulásakor mért képlékeny alakváltozás is csak kevéssé csökken. Ezzel szemben a gyártási tapasztalatok azt mutatják, hogy a Fe tartalom, és ezzel arányban az intermetallikus fázisok mennyiségének növekedése a selejtarányt lényegesen növeli. Például a [69] irodalom szerzői azt állapították meg, hogy a kedvező gyárthatósági határ 0,7% részecske térfogatarány, és 1% feletti aránynál már erőteljes romlás jelentkezik.

A 2.31. ábra szemlélteti azt a végeelem modellt [70], amely a részecskék feltételezett elrendezéséből konstruál egy cellát a közepén elhelyezkedő Al(Fe,Mn) második fázissal. A modell számításokból adódó törésig elviselt ϵ_c -szám nyúlást, valamint a kísérletekből kapott átlagos és lokális alakváltozást a publikáció adataiból szerkesztett 2.29.b. ábra tartalmazza. Látható, hogy a részecskék területarányának növekedésével egyértelműen csökkennek az alakíthatósági jellemzők.



a) végelem modell geometria [70]



b) részecske arány hatása az alakíthatóságra

2.31. ábra. Részecske modell és számítási eredmények [70]

2.4. A szakirodalom kritikai elemzése

A teljes szakirodalmi áttekintés alapján az egyes részterületekre vonatkozó legfontosabb megállapításaim a következők:

Digitális képkorrelációs technikák:

A jelenleg rendelkezésre álló technikai adottságok lehetővé teszik, hogy a kutatásoknál és gyakorlati alakító műveleteknél fellépő lokális alakváltozásokat tökéletesen követni és számszerűen jellemezni lehessen.

A kutatásra való alkalmasság szempontjából meghatározó pontosságra vonatkozóan azonban kevés információ áll rendelkezésre. A hardver/szoftver rendszerek fekete dobozként kezelik az adatokat és szolgáltatják az eredményeket, így azok hitelesítése kiemelt fontosságú a mérések megbízhatósága szempontjából.

Lokális alakváltozások kutatása

A DIC technika fejlődése új távlatokat nyitott ezen jelenségek kutatásában, mert lehetővé tette az alakváltozás folyamatának közvetlen megfigyelését térben és időben.

Ezeket a technikákat felhasználva lehetőség nyílik a lokális alakváltozások számszerű jellemzésére és az így kapott paramétereknek az alakíthatósággal való kapcsolatának meghatározására. Ezért szükséges az irodalomban sokféle módon definiált fogalmak egységesítésére és azok segítségével a technológiai folyamatok tervezésében is használható új információk szerzésére.

Intermetallikus fázisok a vizsgált alumínium ötvözetekben

Az intermetallikus fázisok szerepe az irodalom egybehangzó megállapításai szerint meghatározó a képlékeny alakíthatóság szempontjából, ezért ennek vizsgálata kiemelt fontosságú.

Az irodalomban található számszerűen is meghatározott összefüggések az alakíthatóság és az intermetallikus fázisarány között, de ezek nem kellően alátámasztottak és nem vihetők át közvetlenül az általam vizsgált alumínium-magnézium ötvözetek körére.

További hiányossága az ide vonatkozó ismereteknek, hogy az intermetallikus fázisok mennyiségét és eloszlását befolyásoló tényezők számszerű hatása nem ismert, ezért a minőség javítása érdekében szükséges fejlesztések megvalósításához nem nyújtanak kellő információt.

3. A kutatások célja és eszközei

3.1. Célkitűzések

A szakirodalom tanulmányozása alapján megállapítható, hogy a kiválasztott kutatási területeken számos értékes publikáció foglalkozik a saját kutatásaim tárgyát képező jelenségekkel, azonban ahogy a korábbiakban rámutattam, mindegyik területen található olyan bizonytalanságok, melyeket további elemzés során célszerű pontosítani és tovább fejleszteni. A járműipari anyagfejlesztés célja az alumínium-magnézium ötvözetek területén egyértelműen az alakíthatóság javítása, mivel ez az egyetlen tulajdonság, amely az alumínium alkalmazását korlátozza a karosszériaépítésben. Ugyanakkor a kis sűrűség és a viszonylag kedvező szilárdság olyan előnyöket jelent, amelyeket feltétlenül ki kell használni.

Ezek indokolják, hogy elsősorban az alakíthatóságot befolyásoló tényezőkre fókuszáljak, melyek részben az alakváltozási folyamat jobb megértését, részben a befolyásoló tényezők hatásának pontosítását szolgálják.

Ezért elemzem részletesen a helyi alakváltozások keletkezésének és terjedésének törvényszerűségeit, mivel ezek nem csupán a vizsgálatokban, hanem az alkatrészek gyártása során is megjelennek, alakítási sávokat és helyi elvékonyodásokat okozva a lemezekben. A lokális alakváltozások jellemzése és kapcsolata az alakíthatósággal kiemelt szerepet kap a vizsgálataimban. Ezt kiterjesztem az egyenletes alakváltozás tartományára és a kontrakciós zónára egyaránt.

Az alumínium-magnézium ötvözetek további sajátossága, hogy az intermetallikus fázisok meghatározóak az alakíthatóság szempontjából. Felismertem, hogy ezek kvantitatív mikroszkópiai mérőszámai az általánosan használt mechanikai tulajdonságoknál sokkal szorosabb kapcsolatba hozhatók az alakíthatósággal. Ugyanakkor az intermetallikus fázisok keletkezését és mennyiségét meghatározó ötvözők is fontos szerepet kapnak a kutatásaimban. Az irodalom utal a vas mint szennyező szerepére, de sem annak kvantitatív jellemzése, sem a többi ötvöző hatása nincs kellőképpen felderítve, ezért szerepel annak részletes vizsgálata a programban.

Mindezen vizsgálatok során kulcsszerepe van a digitális képkorrelációs

technikáknak. Habár a tanszéken a szakmában általánosan elfogadott, legkorszerűbb berendezés áll rendelkezésre, ennek ellenére a vizsgálat során használt mintázatok jellemzése és azok hatása a kiértékelés pontosságára sem a gyártó cég útmutatásai, sem az irodalmi eredmények alapján nem tekinthető megoldottnak. Ezért kutatásaimban ezzel a témával is foglalkozom.

A kutatási eredmények ismertetése során első helyen a vizsgálótechnikai kérdéseket elemzem, mivel ezek szerephez jutnak mind a lokális alakváltozások vizsgálatánál, mind pedig az intermetallikus fázisok kvantitatív jellemzésénél. Ezután tárgyalom a másik két szakmai részt az említett sorrendben.

3.2. Felhasznált berendezések és módszerek

Ezen alfejezet bemutatja az értekezés elkészítése során felhasznált azon berendezéseket és módszereket, melyeket a kutatómunka fejezetben alkalmazni fogok.

- Optikai mikroszkóp: Zeiss Axio Imager M1, AxioVision 4.8 szoftverrel, 2,5x-es optikával,



3.1. ábra. Zeiss Axio Imager mikroszkóp a mintázatok mérése közben

- Pásztázó elektronmikroszkóp: Hitachi 3400 magas és alacsony vákuumú elektronmikroszkóp,
- Kémiai összetétel vizsgáló: WAS Foundry Master kémiai összetétel vizsgáló berendezés,
- Szakítógép: Instron 5582, 10kN és 100kN-os erőmérő cellákkal, Bluehill2-es szoftverrel,

- DIC kamerarendszer: GOM Aramis 5M, 800mm-es állítható állvánnyal, GOM Aramis szoftverrel,



3.2. ábra. GOM Aramis 5M az Instron szakítógéppel

- Lemezvizsgáló berendezés: Erichsen lemezvizsgáló berendezés, 30kN-os, GOM Aramis fogadó rendszerrel,



3.3. ábra. Lemezvizsgáló berendezés

- Mérőmikroszkóp: Zeiss optikai hosszmérőmikroszkóp, 1 μ m-es leolvasási pontossággal,



3.4. ábra. Hosszmérőmikroszkóp

- Szakító vizsgálati módszerek: MSZ EN ISO 6892-1:2016 szabványnak megfelelően készültek el a vizsgált próbatestek 20mm szélességben 80mm-es jeltávhoz,
- Alakítás határdiagram felvételi módszerek: ISO 12004-2:2008 szabványnak megfelelően készültek el a vizsgált próbatestek illetve a vizsgálatok.
- Rácsvágásos festékvizsgálathoz alkalmazott szabvány: MSZ EN ISO 2409:2013 - Festékek és lakkok. Rácsvágásos vizsgálat (ISO 2409:2013) - Paints and varnishes. Cross-cut test (ISO 2409:2013)
- Festékek vizsgálataihoz használt eszközök: Elcometer 107 rácsvágó készülék, Elcometer B112 nedves rétegvastagság mérő



3.5. ábra. Rácsvágó készlet és nedves rétegvastagságmérő

- AirBrush pisztoly: Iwata HP-SB Plus pisztoly állítható fúvókával, olajmentes kompresszorral



3.6. ábra. AirBrush pisztoly

4. Kutatómunka

A szakirodalom áttekintése után a dolgozat készítése során végzett kutató munkát és vizsgálatokat ismertetem a már a bevezetőbe is vázolt módon. A kutatásaim a következő három fő területre tértek ki:

- A DIC technikában alkalmazott alapozó festési technikák kísérleti vizsgálata és a mintázatok morfológiai jellemzése, azok kapcsolata a nyúlásmérés pontosságával, ezáltal optimális mintázatok alkalmazásának lehetősége.
- Az alakítási inhomogenitások jellemzése DIC technikára alapozva, különös tekintettel a PLC effektusra, valamint a diffúz és lokális kontrakcióra.
- Az ötvözők és az intermetallikus fázisok jellemzése a vizsgált alumínium-magnézium ötvözetekben, azok hatása az alakíthatóságra.

A fejezetben bemutatom az elvégzett vizsgálatokat, a vizsgálatok eredményeit illetve azok kiértékelését, elemzését.

4.1.A DIC mérésekhez használt minták előkészítésének vizsgálata.

A DIC vizsgálatok elengedhetetlen előkészítő része a megfelelő mintázat elkészítése. A mintázat azonban nem az egyetlen fontos dolog. A lemez és a mintázat között a csillogás, a reflexió elkerülése érdekében egy alapozó matt festékréteget alkalmaznak. Ez a réteg legalább annyira fontos, mint a megfelelő mintázat, hiszen ennek a rétegnek a feladata az alakváltozás közvetítése. A szakirodalom sokat foglalkozik a mintázatokkal, de az alaprétegről már nem esik annyi szó, ezért tartottam fontosnak ezen téma vizsgálatát is az értekezésben.

4.1.1. Vizsgálati módszer

Az irodalmi áttekintésből egyértelműen látható, hogy bár a mintázatok jellemzésére nincs kialakult egységes módszer, de ezen túl még kevesebb szó esik a festék és a vizsgált alkatrész vagy próbatest kapcsolatáról. Ugyanakkor egyetértés van abban, hogy az alakváltozást a festék közvetíti a kamerák felé, így a megfelelő kapcsolat elengedhetetlen. Ezért célul tűztem ki, hogy megtaláljam az optimális alapozó réteget az általam vizsgálni kívánt próbatestekhez.

Az alapozó réteg felvitele nem minden esetben szükséges, csak akkor kell alkalmazni, ha a vizsgálandó termék felülete hajlamos a csillogásra, reflexióra, vagy ha nagyon mély fekete színe van, esetleg átlátszó. Az értekezésemben vizsgált AlMg3 lemezek esetében szükséges az alapozó réteg, mert ezek ebbe a kategóriába tartoznak reflexiós tulajdonságaik miatt. Az alapozó réteg további előnye, hogy növeli a kontrasztot a mintázatok „széleinél”.

A gyakorlati tapasztalataimból, illetve a szakirodalomból is kiolvasható [8-17], hogy a legfontosabb követelmény a festékekkel szemben, hogy jól tapadjanak a felülethez és közvetítsék az alakváltozást, de ugyanakkor kellően rugalmasok is legyenek, hogy a nagyobb nyúlásokat is mérhetővé tegyék. Fontos továbbá, hogy ne keményedjenek ki túl hamar, de viszonylag kis idő kelljen a száradásukhoz, hogy a mérések előkészítése nem emésszen fel sok időt. A festékek tapadásának minősítésére több szabvány is létezik, kutató munkám során először ezen szabványokat vettem sorra.

Releváns minősítő szabványok:

- MSZ EN ISO 1519:2011 - Festékek és lakkok. Hajlítási vizsgálat (henger alakú túske) (ISO 1519:2011) - Paints and varnishes. Bend test (cylindrical mandrel) (ISO 1519:2011)
- MSZ EN ISO 1520:2007 - Festékek és lakkok. Mélyhúzási vizsgálat (ISO 1520:2006) - Paints and varnishes. Cupping test (ISO 1520:2006)
- MSZ EN ISO 2409:2013 - Festékek és lakkok. Rácsvágásos vizsgálat (ISO 2409:2013) - Paints and varnishes. Cross-cut test (ISO 2409:2013)
- MSZ EN ISO 9117-5:2013 - Festékek és lakkok. Száradási vizsgálatok. 5. rész: Módosított Bandow–Wolff-teszt (ISO 9117-5:2012) - Paints and varnishes. Drying tests. Part 5: Modified Bandow. Wolff test (ISO 9117-5:2012)
- MSZ EN ISO 9117-6:2013 - Festékek és lakkok. Száradási vizsgálatok. 6. rész: Fogásbiztossági teszt (ISO 9117-6:2012) - Paints and varnishes. Drying tests. Part 6: Print-free test (ISO 9117-6:2012)

A saját vizsgálataim során ezeket a szabványos vizsgálatokat használtam, vagy

ezeket a vizsgálatokat módosítottam. A szabványban leírt vizsgálatoktól néhol el kellett térni, mivel a szabványok csak azt vizsgálják, hogy a festék megfelelően tapad-e a felülethez, de a mi esetünkben a rugalmasságnak is meg kell maradni az alakváltozás közvetítéshez, ahol eltértem a szabványos vizsgálatától ott részletesebben kifejtem a vizsgálat menetét.

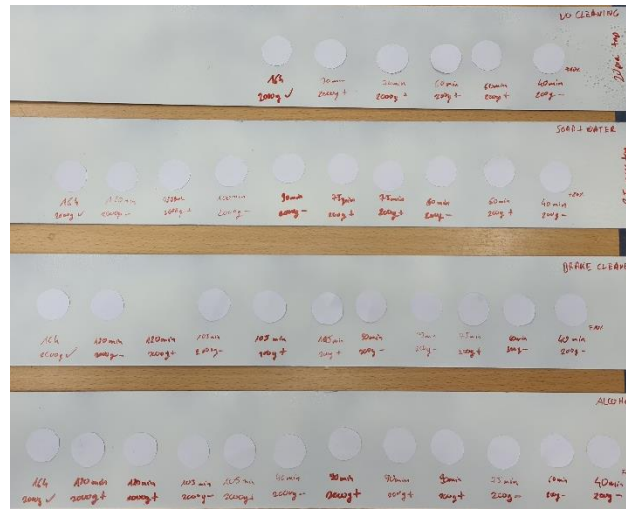
Tapintási és fogásbiztos száradási vizsgálatok

A festékek vizsgálatát két részre bontottam. Az első vizsgálati csoportba a tapintási és fogásbiztos száradási vizsgálatok tartoznak. Itt azt vizsgáltam, hogy a festékek 60 perc alatt fogásbiztosra száradnak-e. Ez azért fontos, mert a gyakorlatban ennyi idő elteltével sem kezelhető próbatest már sok nehézséget jelent. Fontos megjegyezni, hogy ez az idő nem azonos a száradási idővel, a teljes száradás elérése, ahogy az irodalmakból [8-17] is látható volt, nem cél. A fogásbiztosság után a technológiai próbákkal vizsgáltam, hogy mely festékek alkalmazhatók a mérések elvégzéséhez, azaz meddig használhatóak, mikor érik el a „túlszáradt” állapotot, illetve az általam kitűzött kezdeti 24 órás időablakon belül ez bekövetkezik-e.

A tapintás vizsgálat során 10, 20, 30 és 60 perc elteltével vizsgálom a mintákat több helyen is tiszta, szabad kézzel tapogatva a festett felületeket. A vizsgálat eredmény OK/NOK minősítésű, 0 osztályzatot kap, ha még fog vagy ragad a felület, 1-es besorolást, ha már tapintásra nem érzékeny a felület. Fontos megjegyezni, hogy ez nem egy szabványos minősítő vizsgálat, de a gyakorlati tapasztalatok alapján fontosnak tartottam ezen paraméter meghatározást is.

A fogásbiztos száradás vizsgálat tulajdonképpen egy módosított Bandow-Wolff vizsgálat. A vizsgálat során egy 26 mm átmérőjű papír korongot helyezek a felületre, amit egy 22 mm átmérőjű 5 mm vastag gumikorong követ. A mérés két lépcsőben történik és szintén OK/NOK minősítésű. A festés követő 30 és 60 percnél először 200 g majd 500 g súly kerül a papírlappal és a gumikoronggal együtt a festett felületre. 60 másodperc elteltével 30 mm-ről az asztalra ütögetem a mintát. Ha a papír leesik 1-es ha nem akkor 0 minősítést kap. A sikeres teszthez a 200 g és 500 g súllyal is 1-es minősítést kell kapnia a festéknek (4.1 ábra). Ilyen esetben a minták már biztonsággal mozgathatók, és elvégezhetőek rajtuk a további előkészítő műveletek. A leírásból is látszik, hogy eltértem a Bandow-Wolff vizsgálatától, de erre a felhasználási területre a

festéknek nem kell teljesíteni a 2 kg vagy a 20 kg súlyú tesztet, mivel azok már a teljesen szárad állapotra, illetve nehezebb súlyú alkatrészek egymásra rakhatóságára vonatkoznak. Ezt előkészítő teszt kísérletekkel is megvizsgáltam.



4.1 ábra. Bandow-Wolff előkísérletek próbatestjei

Technológiai próbák

A második vizsgálati csoportba a technológiai próbákat soroltam. Itt készültek a rácsvágásos vizsgálatok, a hajlítási próbák és az Erichsen vizsgálatok. Ebben a részben azt vizsgáltam, hogy a festék megfelelően tapad-e a felülethez, illetve az alakításokat repedés vagy leválás nélkül viseli-e el, azaz képes az alakváltozás közvetítésére.

MSZ EN ISO 2409:2013 szerinti szabványos rácsvágásos tesztet végeztem 1 mm vágásközökkel és a megfelelő celofán ragasztócsíkkal. A vizsgálatok eredményeit a szabványban található besorolási osztályok alapján határoztam meg. A minősítő táblázatot a 4.2 ábra mutatja. A vizsgálatot a festés követő 0,5; 1; 3; 12; 24 órában ismételt meg.

Besorolás	Példák	Besorolás	Példák	Besorolás	Példák
0		2		4	
1		3		5	rosszabb mint a 4.

4.2 ábra. A rácsvágásos vizsgálat besorolási osztályai

MSZ EN ISO 1520:2007 szerinti szabványos mélyhúzási vizsgálatot végeztem az

Erichsen féle hidraulikus mélyhúzó gépen. A szabványtól eltérően egy egyedi besorolást adtam az eredményeknek, mely a következő volt:

- 1 A húzás után a szakadás mentén a festék nem válik el a lemeztől
- 2 A húzás után a szakadás mentén lepattogások és kismértékű repedezés figyelhető meg
- 3 A húzás után a szakadás mentén vagy bárhol a festék elválik a lemeztől, nincs tapadás vagy kapcsolat

Erre azért volt szükség mert a festék leválás csak nehezen volt felismerhető, a mintákat 10x-es nagyítás mellett vizsgáltam és ezzel a besorolással jobban el tudtam különíteni a különböző eredményeket.

A továbbiakban MSZ EN ISO 1519:2011 szerinti szabványos hajlító próbát végeztem a próbatesteken. A szabványtól eltérően csak a 10 mm-es hajlító hengerrel végeztem a méréseket és a hajlítás előtt egy bevágást tettem a festékre, ami párhuzamos volt a hajlítás tengelyével. Erre azért volt szükség, mert a próba eredetileg teljesen száradt festékekere vonatozott, viszont a még képlékeny festékeknel a repedés nem jelent meg, ami elrejtette a festékleválásokat. A bevágással a hajlítás során is látható volt, hogy tapad-e a festék vagy sem. Az eredmények értékeléséhez itt is egyedi besorolást alkalmaztam:

- 1 A hajlítás után a vágás mentén a festék nem válik el a lemeztől
- 2 A hajlítás után a vágás mentén lepattogzások és kis mértékű repedezés figyelhető meg
- 3 A hajlítás után a vágás mentén vagy bárhol a festék elválik a lemeztől, nincs tapadás vagy kapcsolat

A hajlító próba és a mélyhúzó vizsgálat esetében is 1, 3, 12, 24 óra elteltével vizsgáltam a mintákat.

A vizsgálati hőmérséklet és páratartalom (RH%) minden vizsgálat esetében 10°C – 20°C -40°C valamint 20RH% - 50RH% - 80RH% volt. A 20°C/50RH% párosítás a laborkörülményeknek megfelelő állapot. A többi 8 kombináció segítségével a festékek felhasználhatóságának hőmérséklet és páratartalom függőségét kívántam megvizsgálni. A vizsgálatokat az értekezésben is tesztelt AlMg3 alumínium lemezeken, valamint DX53-as acéllemezeken is elvégeztem

4.1.2. A kísérletek során alkalmazott festékek és próbatest előkészítési módszerek

A kísérletekhez a kereskedelmi forgalomban kapható kézi festékszórásra alkalmas spray kivitelű festékeket választottam. A festékek mindegyike matt RAL9010 fehér színű festék volt. A legtöbb irodalom és a gyártói előírások is a fehér matt festéket részesítik előnyben, így én is ezeket vizsgáltam.

Vizsgált festékek:

- A. Vízbázisú univerzális felhasználási célú lakk festék, matt fehér, RAL9010
- B. Oldószeres dekorációs célú, benzin álló lakk festék, matt fehér, RAL9010
- C. Oldószeres, száradásgyorsítót tartalmazó dekorációs lakk festék, matt fehér, RAL9010
- D. Univerzális akrilfesték, matt fehér, RAL9010
- E. Professzionális 800 °C-ig hőálló oldószeres festék, matt fehér, RAL9010

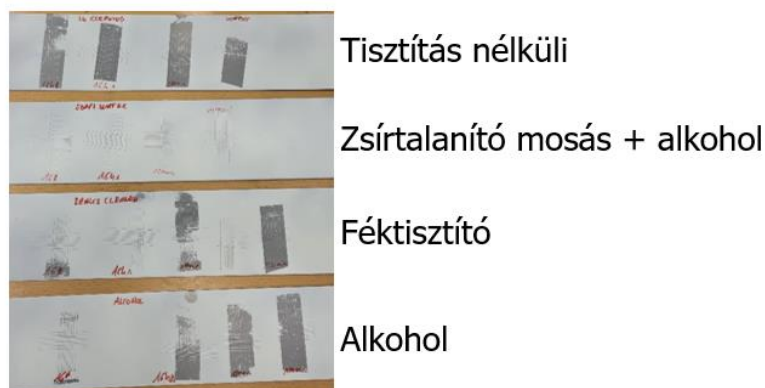
A későbbiekben ezeket a jelöléseket használom a festék teljes elnevezésének kiírása helyett.

A felületek előkészítése és festékvastagságok

A vizsgálatok első lépéseként megvizsgáltam, hogy milyen előkészítő lépéseket kell alkalmazni a megfelelő festéktapadás eléréséhez. A vizsgált lemezeket a következő módszerekkel tisztítottam meg:

- tisztítás nélküli, kontroll minta,
- zsírtalanító fürdő és izopropil-alkoholos áttörlés,
- féktisztító mosás,
- izopropil-alkoholos mosás.

A mintákat rácsvágásos vizsgálattal ellenőriztem 12, 16 és 24 óra elteltével. Egy jellemző mintát mutat a következő 4.3 ábra. A kísérletek egyértelműen kimutatták, hogy a zsírtalanító fürdős mosás izopropil-alkoholos áttörléssel hozza a legjobb eredményt. A többi módszer esetében gyakorlatilag nem is tudott a festék megtapadni a felületen. A mintaképhez hasonló eredményt adott mindegyik festék, így végül ezt az előkészítési módszert alkalmaztam a további vizsgálatokhoz.



4.3 ábra. Tisztítási próbák eredménye

Mindegyik festékekkel készültek próbafestések is, hogy meghatározható legyen az adott időegység alatt kifújt festék mennyisége. A teljes fedéshez elegendő volt 2-3 másodpercig festeni a mintákat, de tovább fújva vastagabb réteg is elérhető volt. A festett mintákon Elcometer nedves rétegvastagság mérő segítségével vastagság méréseket végeztem. A festési ajánlások alapján a nedves rétegvastagság 40-50%-ot zsugorodik száradáskor. A vastagság mérésre azért volt szükség, mert a rácsvágásos vizsgálat karcoló fejének kiválasztásakor fontos tudni a várható rétegvastagságot. A mérések eredményei a következők voltak (4.1 táblázat)

Nedves festékvastagságmérés								
Minta	Vékony rétegben fújva				Vastag rétegben fújva			
	Mérés 1. [μm]	Mérés 2. [μm]	Mérés 3. [μm]	Átlag [μm]	Mérés 1. [μm]	Mérés 2. [μm]	Mérés 3. [μm]	Átlag [μm]
A	25	75	50	50	100	125	75	100
B	50	75	50	58	75	100	100	92
C	75	100	75	83	100	125	125	117
D	50	75	125	83	150	100	125	125
E	75	75	100	83	100	75	100	92

4.1 táblázat. Vastagság mérés eredményei

A mérési eredményekből látszik, hogy az A és a B minta festhető vékonyabb rétegben, míg a D és C vastagabb réteget ad. A réteg zsugorodása várhatóan 60 μm alatt lesz, így a rácsvágásos vizsgálatnál az 1 mm-es osztású fej lesz használható.

Száradási vizsgálatok

A száradási vizsgálatok keretein belül tapintási és fogásbiztos száradási

vizsgálatokat végeztem a festékekkel AlMg3 és DX53 mintalemezeken. Elsőként a tapintás vizsgálat eredményeit ismertetem.

A méréseket a vizsgálati módszereknél megadott hőmérséklet és páratartalom kombinációkon végeztem el 10, 20, 30 és 60 percenként mérve. A már nem tapadó minta 1-es a még foltot hagyó vagy „ragadó” minta 0 minősítést kapott. A mérések során már megfigyeltem, hogy több jellemzőt is egyszerre kell vizsgálnom, ami egy bonyolultabb kiértékeléshez vezethet.

A minél pontosabb, átfogóbb és átláthatóbb minősítés érdekében a gyakorlatban már alkalmazott súlyozásos rangsoroló módszert alkalmaztam. Kezdetben minden egyes vizsgálati paraméter azonos súlyzó tényezőt kapott. Három vizsgálati hőmérséklet (T [°C]) (10, 20, 40 °C) 1/3 azaz 0,33333 értéket, a három páratartalom (P [RH%]) (20, 50, 80 RH%) 1/3 azaz 0,33333 értéket, míg a száradási idő (SZ [min]) (10, 20, 30, 60 min) 1/4 azaz 0,25 értéket kapott. Ezek összege adja a szorzótényezőket, ami jelen esetben 0,92. A könnyebb átláthatóság érdekében ezen adatokat táblázatosan is összefoglaltam. A többi vizsgálatnál is ezt a megközelítési módszert alkalmaztam az értekezés során.

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [min]	Súlytényező
10	0,33	20	0,33	10	0,25
20	0,33	50	0,33	20	0,25
40	0,33	80	0,33	30	0,25
	1		1	60	0,25
					1
Esetek száma	36				

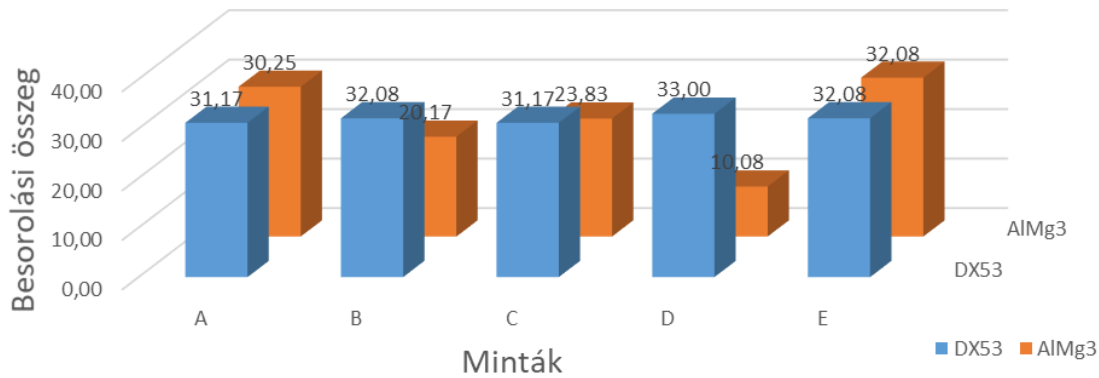
4.2 táblázat. A súlytényezőket összefoglaló táblázat

A mérési eredményeket mind a 36 esetről ezzel az értékkel szoroztam meg, melynek eredményét a következő 4.3 táblázat mutatja, ami tartalmazza a DX53 és az AlMg3 lemezeken végzett méréseket is.

Eredmények - Tapintás vizsgálat															
DX53							AlMg3								
T [°C]	P [RH%]	SZ [min]	A	B	C	D	E	T [°C]	P [RH%]	SZ [min]	A	B	C	D	E
10	20	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	20	10	0,92	0,00	0,00	0,00	0,92
10	50	10	0,92	0,92	0,00	0,92	0,00	10	50	10	0,92	0,00	0,00	0,00	0,92
10	80	10	0,00	0,92	0,00	0,92	0,92	10	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	20	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	20	20	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
10	50	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	50	20	0,92	0,00	0,00	0,00	0,92
10	80	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	80	20	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
10	20	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	20	30	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
10	50	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	50	30	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
10	80	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	80	30	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
10	20	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	20	60	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
10	50	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	50	60	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
10	80	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	10	80	60	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
20	20	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	20	10	0,92	0,00	0,00	0,00	0,92
20	50	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	50	10	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
20	80	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92
20	20	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	20	20	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
20	50	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	50	20	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
20	80	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	80	20	0,92	0,00	0,00	0,00	0,92
20	20	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	20	30	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
20	50	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	50	30	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
20	80	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	80	30	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
20	20	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	20	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
20	50	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	50	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
20	80	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	20	80	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	20	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	20	10	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
40	50	10	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	50	10	0,92	0,92	0,00	0,92	0,92
40	80	10	0,00	0,00	0,92	0,92	0,92	40	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92
40	20	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	20	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	50	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	50	20	0,92	0,92	0,00	0,92	0,92
40	80	20	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	80	20	0,92	0,00	0,92	0,00	0,92
40	20	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	20	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	50	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	50	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	80	30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	80	30	0,92	0,92	0,92	0,00	0,92
40	20	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	20	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	50	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	50	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
40	80	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	40	80	60	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Összegezve			31,17	32,08	31,17	33,00	32,08	Összegezve			30,25	20,17	23,83	10,08	32,08

4.3 táblázat. A tapintás vizsgálat eredményei súlyozatlan esetben

Mintánként elvégeztem az eredmények összesítését, ahol a nagyobb érték a jobb eredményeket mutatja. Az a táblázatból is jól látható, hogy az eredmények az acél minta esetében eléggé együtt futnak, míg az alumínium esetében már nagyobb eltérések mutatkoznak a festékek között. Az így kapott eredményeket diagramon is ábrázoltam, ezt mutatja a 4.4 ábra.



4.4 ábra. A tapintás vizsgálat eredményei

A diagramról jól leolvasható, hogy az acél esetében mindegyik festék jól teljesített, míg az alumínium lemezeknél az A, E és C minta volt az első három sorrendje. Az eredmények kiértékelése után módosítottam a súly arányokat. Az értekezésben és gyakorlati alkalmazások során is a 20°C és 50RH% páratartalom a leggyakoribb így ezeket a tartományokat nagyobb súllyal vettem figyelembe. A mérések során a 10 illetve 20 perces száradási időnek nincs akkora jelentősége, inkább 30 perctől illetve jó ha 60 perc elteltével már szárazok a minták. Ezen szempontoknak megfelelően módosítottam a súlytényezőket, ezt mutatja a 4.4 táblázat.

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [min]	Súlytényező
10	0,25	20	0,30	10	0,1
20	0,50	50	0,50	20	0,1
40	0,25	80	0,20	30	0,5
	1		1	60	0,3
Esetek száma	36				1

4.4 táblázat. A tapintás vizsgálat módosított súlytényezői

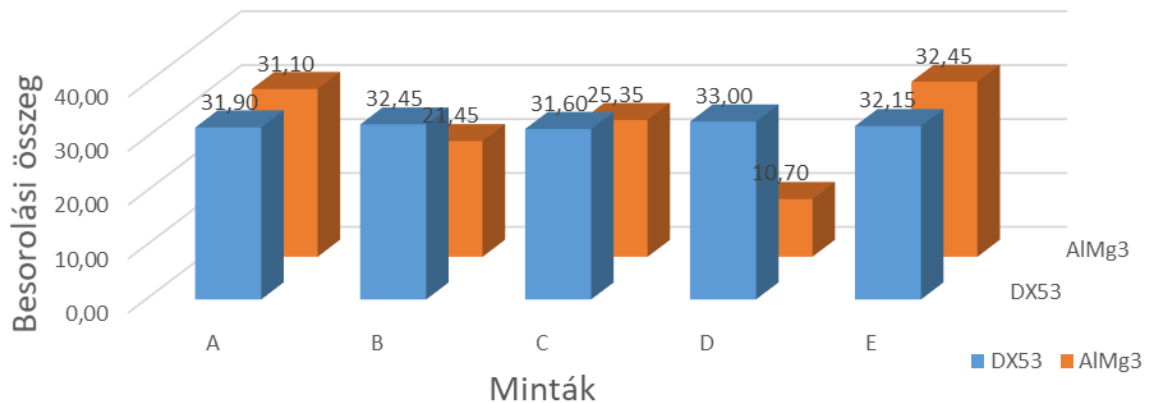
A következő táblázatban (4.5 táblázat) láthatóak a súlyozást követő eredmények, az összegekkel együtt.

Eredmények - Tapintás vizsgálat															
DX53								AlMg3							
T [°C]	P [RH%]	SZ [min]	A	B	C	D	E	T [°C]	P [RH%]	SZ [min]	A	B	C	D	E
10	20	10	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	10	20	10	0,65	0,00	0,00	0,00	0,65
10	50	10	0,85	0,85	0,00	0,85	0,00	10	50	10	0,85	0,00	0,00	0,00	0,85
10	80	10	0,00	0,55	0,00	0,55	0,55	10	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	20	20	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	10	20	20	0,65	0,00	0,65	0,00	0,65
10	50	20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	10	50	20	0,85	0,00	0,00	0,00	0,85
10	80	20	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	10	80	20	0,55	0,55	0,55	0,00	0,55
10	20	30	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	10	20	30	1,05	1,05	1,05	0,00	1,05
10	50	30	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	10	50	30	1,25	0,00	1,25	0,00	1,25
10	80	30	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	10	80	30	0,95	0,95	0,95	0,00	0,95
10	20	60	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	10	20	60	0,85	0,85	0,85	0,00	0,85
10	50	60	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	10	50	60	1,05	0,00	1,05	0,00	1,05
10	80	60	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	10	80	60	0,75	0,75	0,75	0,00	0,75
20	20	10	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	20	20	10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,90
20	50	10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	20	50	10	1,10	1,10	1,10	0,00	1,10
20	80	10	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	20	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
20	20	20	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	20	20	20	0,90	0,00	0,90	0,00	0,90
20	50	20	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	20	50	20	1,10	1,10	1,10	0,00	1,10
20	80	20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	20	80	20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,80
20	20	30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	20	20	30	1,30	1,30	1,30	0,00	1,30
20	50	30	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	20	50	30	1,50	1,50	1,50	0,00	1,50
20	80	30	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	20	80	30	1,20	0,00	1,20	0,00	1,20
20	20	60	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	20	20	60	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
20	50	60	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	20	50	60	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
20	80	60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	20	80	60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
40	20	10	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	40	20	10	0,65	0,65	0,65	0,00	0,65
40	50	10	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	40	50	10	0,85	0,85	0,00	0,85	0,85
40	80	10	0,00	0,00	0,55	0,55	0,55	40	80	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
40	20	20	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	40	20	20	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
40	50	20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	40	50	20	0,85	0,85	0,00	0,85	0,85
40	80	20	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	40	80	20	0,55	0,00	0,55	0,00	0,55
40	20	30	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	40	20	30	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
40	50	30	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	40	50	30	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
40	80	30	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	40	80	30	0,95	0,95	0,95	0,00	0,95
40	20	60	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	40	20	60	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
40	50	60	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	40	50	60	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
40	80	60	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	40	80	60	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Összegezve			31,90	32,45	31,60	33,00	32,15	Összegezve			31,10	21,45	25,35	10,70	32,45

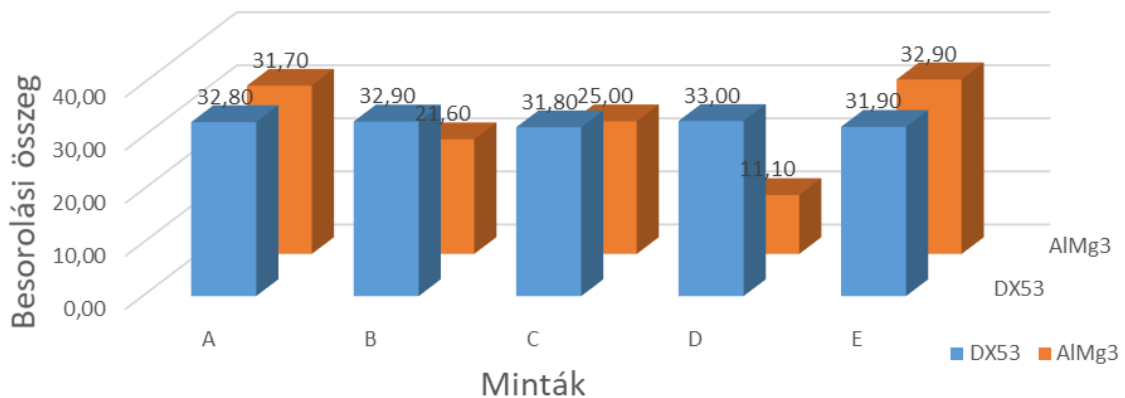
4.5 táblázat. A tapintás vizsgálat eredményei súlyozott esetben

Az eredményeket szintén egy diagramban foglaltam össze, amit a 4.5 ábra mutat. A súlyozás már jobban figyelembe veszi a gyakorlatban várható körülményeket, de az eredményekben jelentős változás nem mutatkozik. A tapintás vizsgálatok zárásaként megvizsgáltam az eredményeket úgy is, hogy csak a 20°C és 50 RH% páratartalom mérési eredményeket vettem figyelembe, de az eredmény itt sem tért el az előző

eredményektől, ez látható a 4.6 ábrán.



4.5 ábra. A tapintás vizsgálat eredményei a súlyozást követően



4.6 ábra. A tapintás vizsgálat eredményei a súlyozást követően csak a 20°C/50RH% állapotra

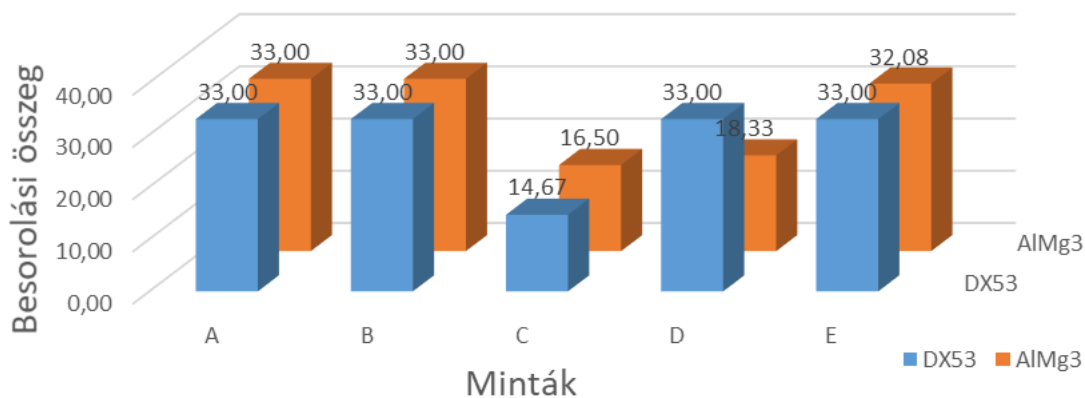
A tapintás vizsgálatok eredményeiből megállapítottam, hogy az A és E festékek a legkedvezőbbek. A további vizsgálatok bemutatásakor a számítások részletes táblázatait már nem ismertetem, csak a súlytényezőket tartalmazó összefoglaló táblázatokat, valamint a kiértékelő diagramokat. Ezek segítségével mutatom be az eredményeket.

A fogásbiztos száradás vizsgálatoknál a vizsgálati módszerek részben ismerttettem megfelelően 30 és 60 percenként végeztem el a mérést 200 g és 500 g tömegek segítségével. A méréseket követő eredmények első lépésben történő kiértékelésekor a vizsgálati paraméterek súlytényezői, hasonlóan az előző esethez, azonos mértékűek voltak, ezt mutatja a következő 4.6 táblázat is.

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő / súly SZ/S [min/g]	Súlytényező
10	0,33	20	0,33	30min/200g	0,25
20	0,33	50	0,33	30min/500g	0,25
40	0,33	80	0,33	60min/200g	0,25
	1		1	60min/500g	0,25
					1
Esetek száma	36				

4.6 táblázat. A súlytényezőket összefoglaló táblázat

A mérési eredmények némileg itt eltérnek a tapintás vizsgálatoknál tapasztaltaktól, az eredmények a 4.7 ábrán láthatóak. Az A, B, E minták hasonlóan jól teljesítettek mindkét anyag esetében, a C és D minta azonban nem érte el a kívánt eredményt. Feltételezhető, hogy a tapintásra száraz minták súlyterhelésre még nem tekinthetőek száraznak, ami a gyakorlati munkát megnehezíti. A két vizsgálat közül így véleményem szerint ez a vizsgálat jobban használható a minták megítélésében.

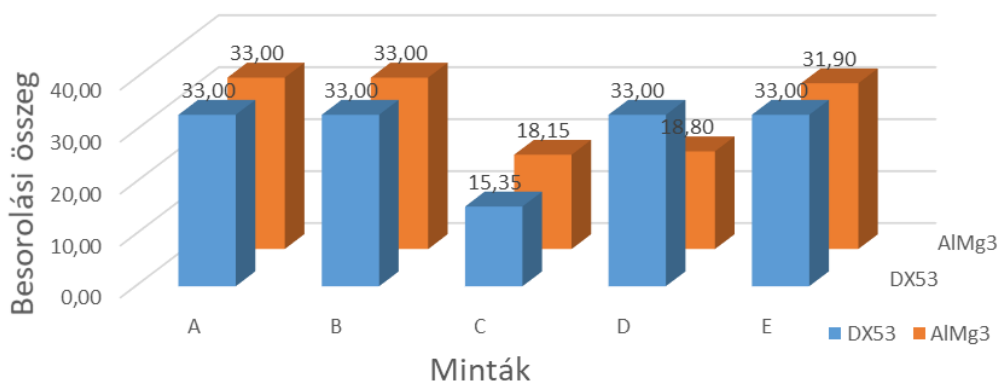


4.7 ábra. A fogásbiztos száradás vizsgálat eredményei

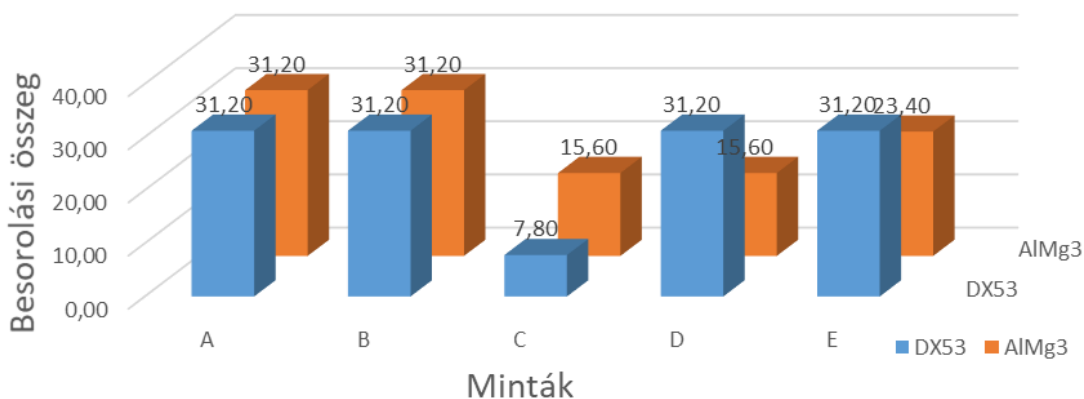
A súlytényezőket hasonlóan módosítottam, mint a tapintás vizsgálatoknál, azonban a mérés jellegéből itt az 500 g-ot elviselő mintáknak van szerepe, így azokat jobban kiemeltem az elemzéskor, a súlytényezőök megválasztásakor (4.7 táblázat). Az eredményeket a 4.8 ábra mutatja, a kitüntetett 20°C és 50RH% páratartalmú állapot eredményeit pedig a 4.9 ábra.

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő / súly SZ/S [min/g]	Súlytényező
10	0,25	20	0,30	30min/200g	0
20	0,50	50	0,50	30min/500g	0,5
40	0,25	80	0,20	60min/200g	0
	1		1	60min/500g	0,5
Esetek száma	36				1

4.7 táblázat. A fogásbiztos száradás vizsgálat módosított súlytényezői



4.8 ábra. A fogásbiztos száradás vizsgálat eredményei a súlyozást követően (összes minta)



4.9 ábra. A fogásbiztos száradás vizsgálat eredményei a súlyozást követően csak a 20°C/50RH% állapotra

Az eredményekből továbbra is jól kivehető, hogy az A, B és E minták eredményei megfelelőek, azok száradnak meg fogásbiztosan a festést követő 60 percig. Megállapítható tehát, hogy a zsírtalanító és alkoholos mosást követően az AIMg3 és DX53 lemezek az A, B és E festékminták használhatók a további munkafázisokhoz, mint például a mintázat felvitele vagy a próbatetek mozgatása.

4.1.3.A DIC vizsgálatokhoz használt festékek vizsgálati eredményeinek elemzése

Ebben a fejezetben első sorban a festékek alakváltozással szembeni viselkedésüket vizsgáltam a rácsvágásos vizsgálat, hajlító próba és Erichsen vizsgálatok segítségével. Az eredményeket az előző fejezetben bemutatott módszer és gondolatmenet alapján ismertetem.

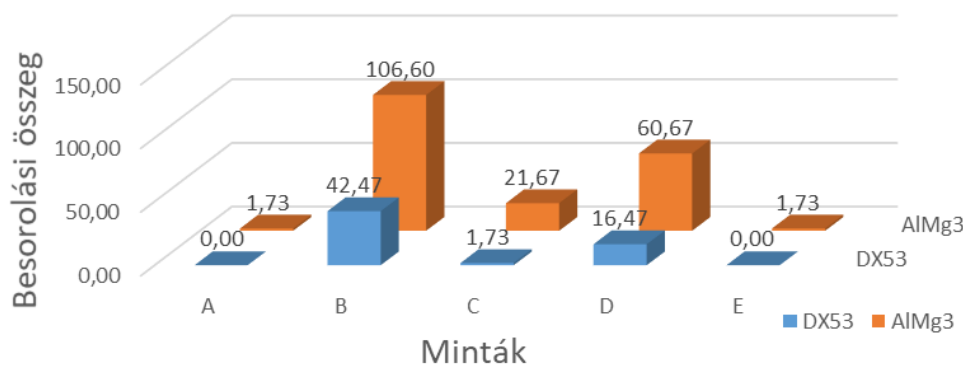
Technológiai vizsgálatok

A technológiai vizsgálatok közül elsőként a szabványos rácsvágásos vizsgálat készült el. A vizsgálatot a korábban már ismertetett hőmérsékleti és páratartalom viszonyok mellett 0,5, 1, 3, 12, 24 órával a festést követően végeztem el. A vágásokhoz az 1 mm osztású fejet használtam. A mintákat a szabványban megadott módon értékeltem ki, ahol 0 a legjobb 5 a legrosszabb eredmény. A kezdeti súlytényezőket a korábbiakhoz hasonlóan adtam meg (4.8 táblázat).

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,33	20	0,33	0,5	0,20
20	0,33	50	0,33	1	0,20
40	0,33	80	0,33	3	0,20
	1		1	12	0,20
				24	0,20
					1,00
Esetek száma	45				

4.8 táblázat. A rácsvágásos vizsgálat kezdeti paraméterei

A mérési eredményeket diagramos formában ismertetem, ami a 4.10 ábrán látható. Fontos ismét megjegyezni, hogy technológiai próbák esetében a minősítés meg van fordítva, azaz a kisebb elért eredmény a jobb eredmény.

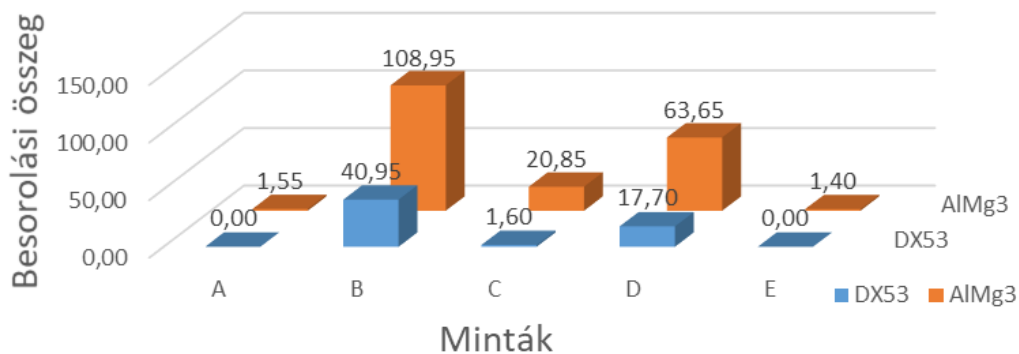


4.10 ábra. A rácsvágásos vizsgálat eredményei

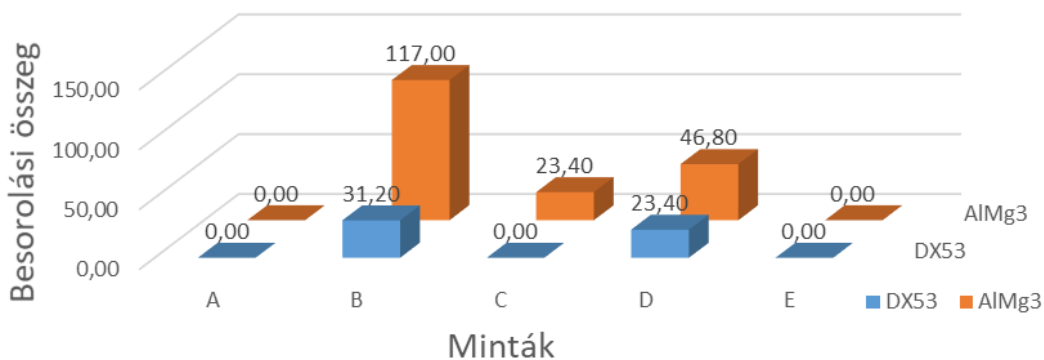
Az eredményekből egyértelműen leolvasható, hogy az A, C és E minták kedvezőek. A súlyozást itt hasonló képpen állítottam, mint a fogásbiztos száradás tesztnél. A különbség, hogy gyakorlati szempontok szerint a 3 és 12 óra értékek kapnak nagyobb arányt, hiszen a mérés technikai gyakorlatban festett és előkészített mintákat célszerű mihamarabb megvizsgálni (4.9 táblázat és 4.11 ábra). Természetesen itt is elkészült a csak 20°C és 50 RH% értékeket figyelembe vevő beállítás is (4.12 ábra).

Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,25	20	0,30	0,5	0,10
20	0,50	50	0,50	1	0,20
40	0,25	80	0,20	3	0,25
	1		1	12	0,25
				24	0,20
					1,00
Esetek száma	45				

4.9 táblázat. A rácsvágásos vizsgálat módosított paramétereit



4.11 ábra. A rácsvágásos vizsgálat súlyozott eredményei (összes minta)



4.12 ábra. A rácsvágásos vizsgálat súlyozott eredményei csak 20°C és 50RH% figyelembe véve

Az eredmények itt is tovább erősítik, hogy az A, C és E minták alkalmasak a vizsgálatokhoz, de AlMg3 esetében megfigyelhető, hogy inkább csak az A, E festék. A páratartalom és a hőmérséklet adatokat megvizsgálva az 50% minden esetben kedvező, de alumínium esetében a 80% kedvezőbb, mint a 20%. A 24 órás száradási idő már mindenhol jó eredményeket adott, de az A és E minta esetében a 3 és 12 óra is.

A hajlító próbák szintén a vizsgálati paraméterek részben tárgyalt módon készültek el. A méréseket 1, 3, 12 és 24 órával a festést követően készítettem el. A 0,5 órás intervallumnak itt nem volt szerepe, hiszen volt olyan festék és paraméter kombináció, ahol csak 60 perc után volt fogásbiztos száradás. A vizsgálatok kiértékelésénél az 1-es a legjobb míg a 3-as legrosszabb minősítést jelenti. A vizsgálatokat itt is a kezdeti egyenlő súlyozású paraméterek (4.10 táblázat) mellett készítettem el majd ezt követően súlyoztam (4.11 táblázat), ahol hasonló szempontokat alkalmaztam, mint a korábban.

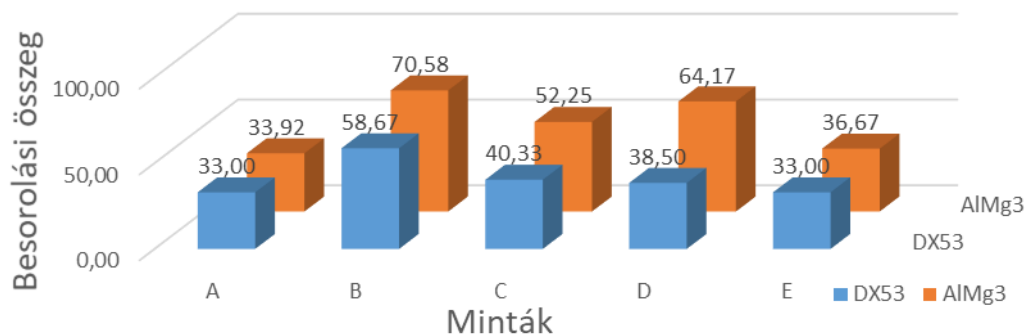
Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,33	20	0,33	1	0,25
20	0,33	50	0,33	3	0,25
40	0,33	80	0,33	12	0,25
	1		1	24	0,25
					1,00
Esetek száma	36				

4.10 táblázat. A hajlító próba kezdeti paraméterei

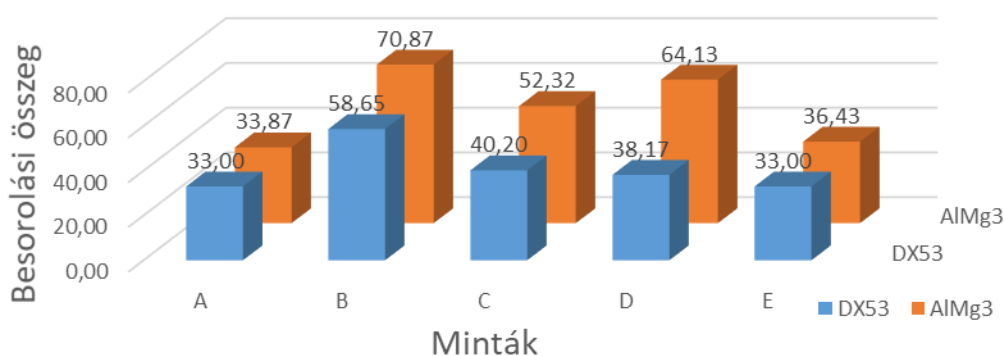
Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,25	20	0,30	1	0,2
20	0,50	50	0,50	3	0,3
40	0,25	80	0,20	12	0,3
	1		1	24	0,2
					1
Esetek száma	36				

4.11 táblázat. A hajlító próba súlyozott paraméterei

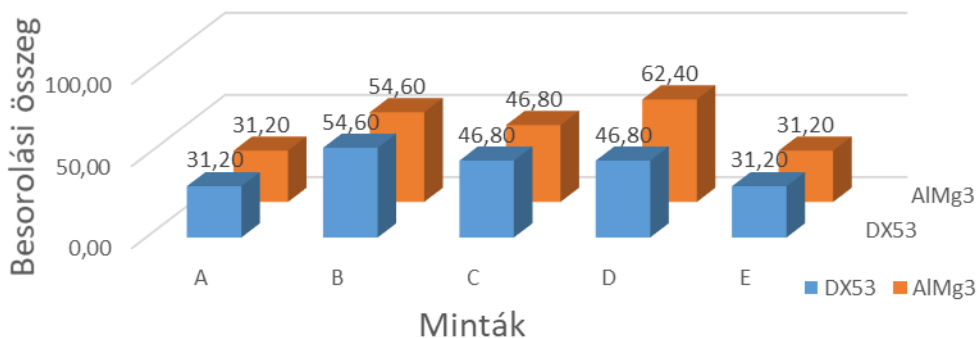
Az eredményeket szintén diagramok segítségével mutatom be (4.13 és 4.14 ábra), valamint megvizsgálom a csak 20%C és 50RH% beállítást is (4.15 ábra).



4.13 ábra. A hajlító próba eredményei

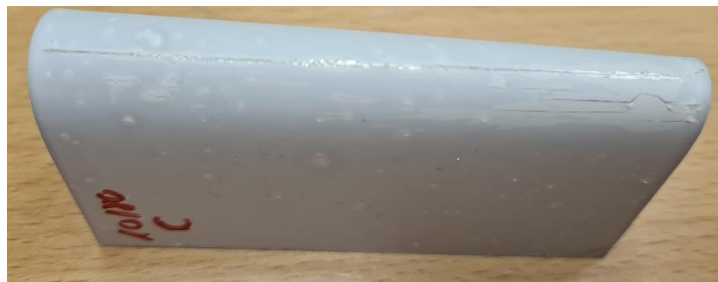
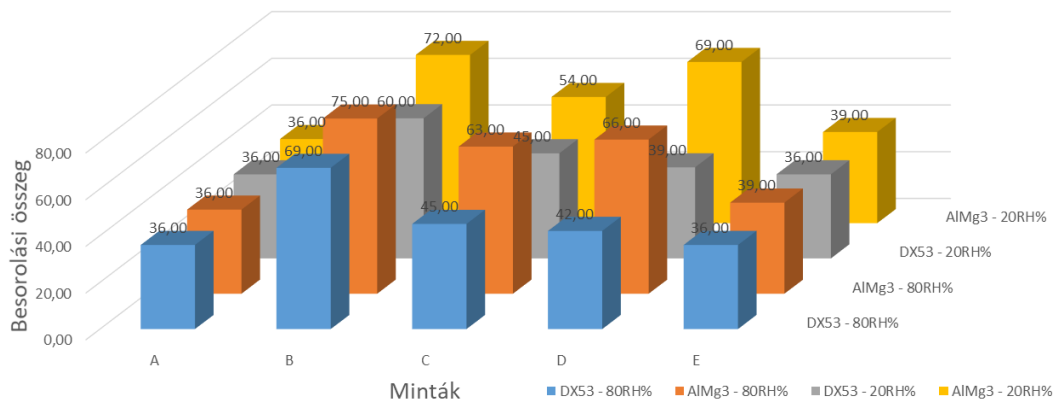


4.14 ábra. A hajlító próba súlyozott eredményei (összes minta)



4.15 ábra. A hajlító próba súlyozott eredményei csak 20°C és 50RH% figyelembe véve

A hajlító próba eredményeinek tanulmányozása során megfigyelhető, hogy az A és E festék az acél és az alumínium esetében is jó alkalmazható, melyektől már elmarad a C és D minta az acél, és C az alumínium esetében.



4.16 ábra. Hajlító próba eredménye - szélsőséges állapotok és hibás hajlítás képe az el- és levált festékekkel

A fenti diagramon (4.16 ábra) azt vizsgáltam, hogy a magas illetve az alacsony páratartalom milyen hatással van az eredményekre. Megfigyelhető hogy a magas páratartalom a B minták esetében mindkét anyagnál rontja az eredményeket, az A és E minták esetében viszont nincs jelentős hatása. Acél esetében a D minta romlik magas páratartalom, a C mintára nincs hatással. Alumínium esetében érdekesség, hogy a D minta javul a magasabb páratartalom esetében a C minta viszont romlik. A vizsgálataim főként az AlMg3 mintákról szólnak, így megállapítható hogy a páratartalmat javasolt az 50RH% közelében tartani, mert ott összeségében jobbak az eredmények. Fontos még egyszer kiemelni, hogy az értékeknél az alacsonyabb eredmény a jobb. A száradási idő hatása itt is hasonló, mint a rácsvágásos mintáknál.

Az eddig elvégzett vizsgálatokból látszik, hogy az eredmények a jól követik egymást, vannak kiugró értékek a szélsőséges páratartalmaknál, de ez az összesítésben nem mutatkozik meg annyira, valamint a gyakorlatban nincs is akkora valószínűsége. Az Erichsen próbát ezeket is figyelembe véve már csak 50RH% páratartalom mellett végeztem el mind a három hőmérsékleten, valamint a festést követően 1, 3, 12 és 24 órában ismételve (4.12 táblázat). Itt is elvégeztem súlyozást (4.13 táblázat), valamint megvizsgáltam külön a kitüntetett állapotot.

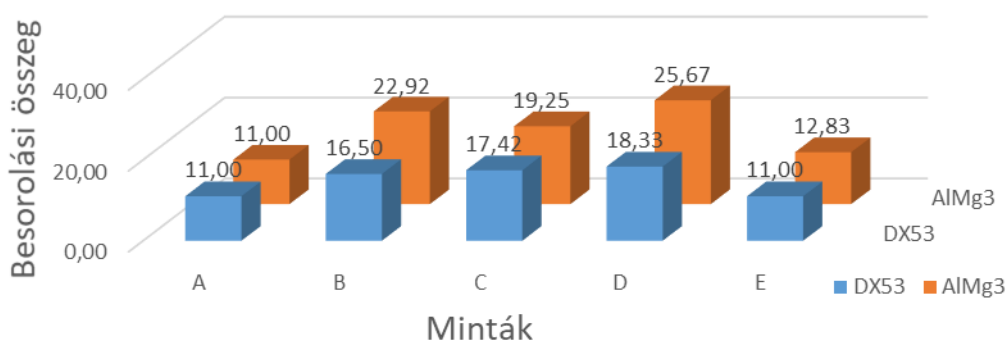
Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,33	20	-	1	0,25
20	0,33	50	1,00	3	0,25
40	0,33	80	-	12	0,25
	1		1	24	0,25
					1,00
Esetek száma	12				

4.12 táblázat. Erichsen próba paramétere

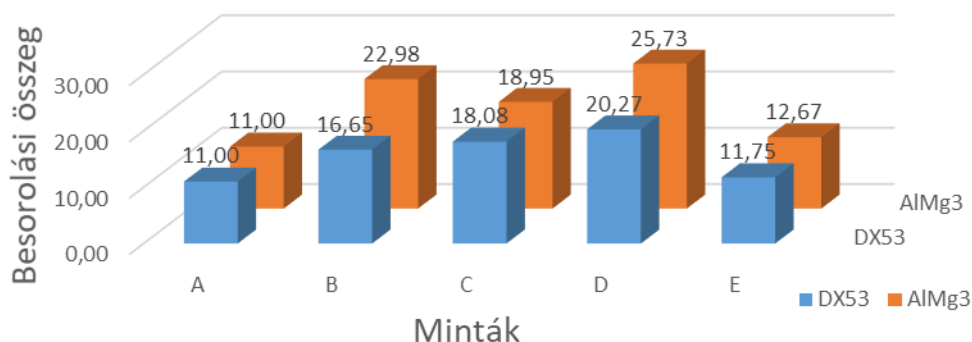
Hőmérséklet T [°C]	Súlytényező	Páratartalom P [RH%]	Súlytényező	Száradási idő SZ [óra]	Súlytényező
10	0,25	20	-	1	0,20
20	0,50	50	1,00	3	0,30
40	0,25	80	-	12	0,30
	1		1	24	0,20
					1,00
Esetek száma	12				

4.13 táblázat. Erichsen próba módosított paramétere

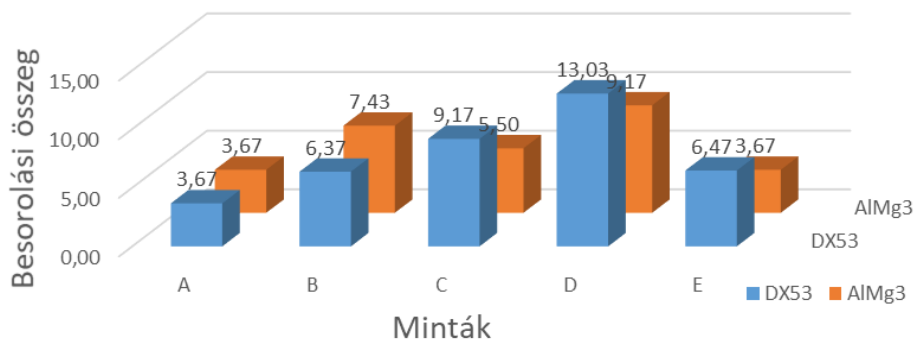
Az eredményeket itt is összefoglaló diagramokon ismertetem (4.17, 4.18 és 4.19 ábrák), majd ez követően értékeltem azokat.



4.17 ábra. Az Erichsen próba eredményei

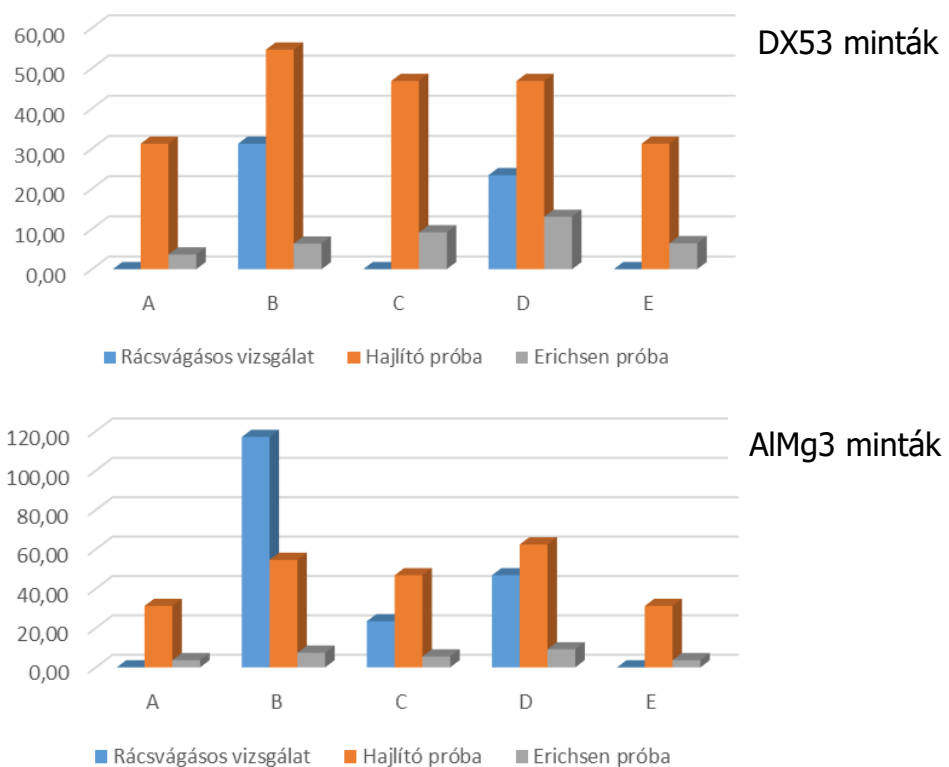


4.18 ábra. Erichsen próba súlyozott eredményei (összes minta)



4.19 ábra. Erichsen próba súlyozott eredményei csak 20°C és 50RH% figyelembe véve

Az Erichsen próbák eredményeit megvizsgálva jól látható, hogy DX53 és AlMg3 lemez esetében az A és E festékminták viselkedtek jól. A 20°C-os állapotnál az is megfigyelhető, hogy inkább csak az A festék kedvező az acélhoz, az alumínium esetében nincs változás, itt az A és E egyenértékű. Érdekes megállapítás, hogy alacsony hőmérsékleten történő szárítás mellett az acél esetében javul a festékek minősítése, míg magasabb hőmérsékleten romlik, alumíniumnál pont fordítva viselkednek a festékek, de ezeknél az eseteknél is az A és E festék tűnik ki. Fontos hogy a technológiai próbákat együtt kell vizsgálni ezért összehasonlító vizsgálatot is végeztem mindhárom vizsgálatról 20°C 50RH% paraméterek mellett. Az eredmények a következő ábrákon láthatóak (4.20 ábra).



4.20 ábra. Összehasonlító ábrák

Az összehasonlításból is jól látható, hogy ezen elemzés szerint is az A és E minták a legkedvezőbbek.

A fekete színű festékek vizsgálata a mintázatok készítéséhez

A fehér színű alapozó réteg festékén túl fontosnak tartottam a mintázatokhoz használni kívánt festékek vizsgálatát is. A festékekkel a száradási vizsgálaton túl csak az alakíthatósági vizsgálatnak van jelentősége, mivel itt nem összefüggő felület kerül festésre, hanem egy nagyon vékony rétegű folt mintázat. A méréseket az alapozó festék vizsgálatánál alkalmazott hőmérsékleteken és páratartalom értékeken végeztem el.

A kísérletekben a foltok elkészítéséhez a következő 6 típusú festék alkalmazásának lehetőségét vizsgáltam meg.

1. Vízbázisú magas minőségű lakk spray, matt fekete, RAL9005
2. Grafitpor alapú grafit spray, matt fekete, RAL9005
3. Akrillakk akrilspray, matt fekete, RAL9005
4. ZománCFesték, matt selyemfényű fekete, RAL9005
5. Elasztikus gumifesték, matt selyemfényű fekete, RAL9005
6. Vízbázisú zománCFesték, matt fekete, RAL9005

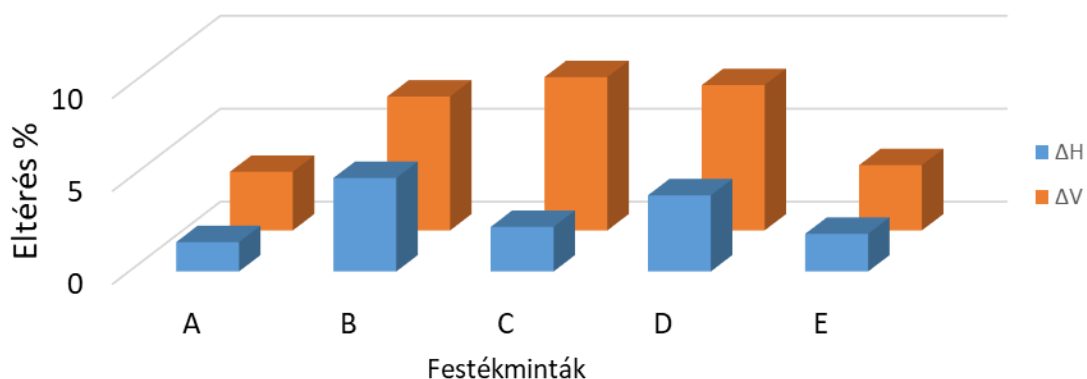
A következőkben az elnevezések helyett a festékek sorszámaival fogok hivatkozni. A festés mind a 6 festékanyaggal elkészült AirBrush illetve kézi szórású spray technológiával. Az elkészült mintázatok a Zeiss Axio Imager M1 optikai mikroszkópon illetve a GOM Aramis 5M hardverrendszer kameráin keresztül kerültek ellenőrzésre illetve elemzésre. A mikroszkópos, valamint Aramis rendszeren keresztüli vizsgálatok során jól látható volt, hogy a 3, 4 festéktípus nem alkalmas a vizsgálathoz, mivel rendkívül csillog. A GOM rendszerben több lehetőség van a fény megfelelő beállítására, de egyetlen beállításánál sem volt jó az eredmény. A csillogó felület nehezen vagy egyáltalán nem mérhető, és a mérési folyamatot negatív irányban befolyásolja. A 6-os festék kontrasztja sem volt megfelelő, a vizsgálatok során inkább szürke színt mutatott, mint sem feketét. Ezt valószínűsíthetően a nem megfelelő minőségű pigmentek okozhatják, mivel teljes felületet fújva már fekete hatás volt tapasztalható. Az irodalmi adatok is alátámasztják, hogy a kontraszt illetve a reflexió milyen rossz hatással van a DIC mérésekre, így a 3,4,6 mintát kizártam a további vizsgálatokból. Az 5 típusú

elasztikus gumi festék gyakorlatilag alkalmatlan volt AirBrush technológiával történő felhordásra. Több festési paramétert is kipróbálva sem lehetett értelmezhető mintázatot készíteni a folyamatos eltömődések és megfolyások miatt. Ezen tapasztalatok alapján az 5. számú festék sem kerül további használatra.

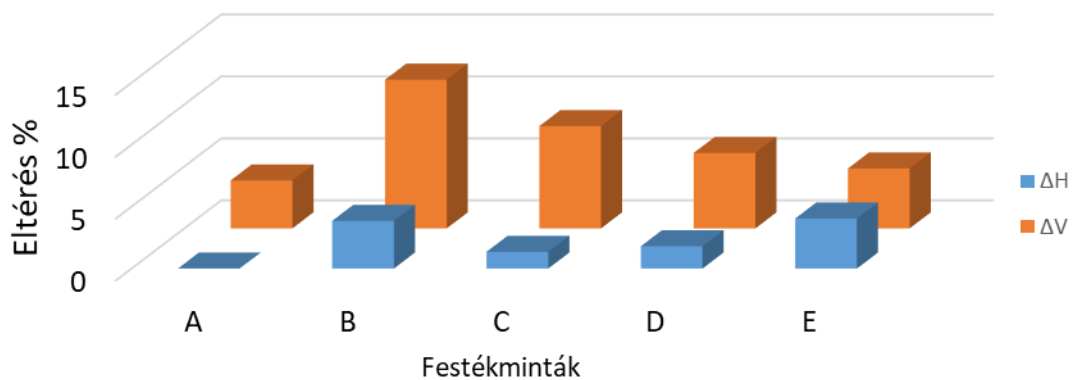
Az 1, 2 festékanyagok jól alkalmazhatóak és a tükröződésük is megfelelő. Mind a mikroszkópos mind a GOM Aramis 5M-el végzett mérések alapján jó kontraszttal és festési képpel rendelkeztek. Negatívum csak a 2. grafitpor alapú festék esetén volt tapasztalható. A grafit por miatt a minták 24 órán túl is nyomot hagytak és elkenődtek, ami megnehezíti a mérési gyakorlatban a használatukat. Mindezen megállapításokat figyelembe véve a további vizsgálatok az 1. számú festékekkel készültek, a 4.2 fejezetben is ezt a festéket használtam a mintázatok elemzéséhez.

A mérési eredmények ellenőrzése Erichsen vizsgálattal és GOM Aramis rendszerrel

A mérési eredmények ellenőrzésére egy validációs Erichsen vizsgálatot is végeztem 20°C és 50RH% páratartalom mellett. A méréseket GOM Aramis 5M hardver-szoftver rendszerrel regisztráltam. A vizsgálatok közben az Erichsen vizsgálógép segítségével mértem a repedés megjelenésekor a magasságot (bélyegút, H) valamint a mérést követően mérőórás vastagsgmérővel a tetőponton mérhető lemezvastagságot (V). Ezeket az eredményeket a GOM Aramis rendszerből is kinyertem és meghatároztam a %-os eltéréseket (ΔH illetve ΔV). A DX53 lemez mérési eredményei a 4.21 ábrán, míg az AlMg3 anyagé a 4.22 ábrán láthatóak.



4.21 ábra. DX53, $T=20^{\circ}\text{C}$; $\text{RH}\%=50$



4.22 ábra. AlMg3, T=20°C; RH%=50

A mérési eredményekből jó látható, hogy mind a magasság mind a vastagság mérések igazolják az A és E festék minták megfelelőségét. A validációs mérés rámutatott arra is, hogy az A festék a legkedvezőbb, mivel az E minta a vastagság mérésénél jobban elmarad, bár a hiba 4% alatt marad ott is.

Az előkészítéssel valamint az alapozó festékrétegek felvitelével kapcsolatos megállapítások:

- A különböző festési módszerek minősítésére a szabványos festés minősítési eljárásokon és a festés viselkedését jellemző technológiai próbákon alapuló komplex minősítő eljárást dolgoztam ki. A festés minősítésére a tapintás vizsgálatot, fogásbiztos száradás vizsgálatot és rácsvágásos vizsgálatot alkalmaztam. A festett felület technológiai alkalmasságát hajlító és Erichsen vizsgálatokkal értékeltem. Ezen kívül a kidolgozott öt festési mintát Erichsen vizsgálat során minősítettem úgy, hogy a GOM-Aramis technikával kapott magasság és csúcsponti lemezvastagság értékeket hossz mérési eredményekkel hasonlítottam össze.
- A festés minősítő eljárásokkal kapcsolatban megállapítottam, hogy a tapintás vizsgálat nem jellemzi szelektíven az egyes festési mintákat, viszont a fogásbiztos száradás és rácsvágásos vizsgálat jelentős különbségeket mutatott, legkedvezőbbnek az A és E festék bizonyult.
- A festés környezeti paramétereinek elemzése azt mutatta, hogy hőmérséklet szempontjából a 10 és 20°C a legkedvezőbb, száradási idő szerint legjobb a 24 órás, de a 3 és 12 órás száradás minősége is megfelelő.

Páratartalom szempontjából a minták nagy részénél az 50% és 20% a megfelelő, a 80%-os érték ezeknél kedvezőtlenebb. A minták összefoglaló értékelése azt mutatta, hogy ezen mutatók szerint az A festék a legkedvezőbb, ezt követi az E és C.

- A hajlító és Erichsen technológiai próba átlagos besorolási mérőszámai szerint az A és E festék a legkedvezőbb. Végül az Erichsen vizsgálathoz kapcsolt GOM-Aramis hitelesítő mérés hibaelemzése alapján is az A, E és C festékek adják a megfelelőségi sorrendet.
- A bemutatott vizsgálatokat párhuzamosan végeztem DX53 jelű mélyhúzó acéllemezen és AlMg3 jelű alumínium karosszéria lemezen. Megállapítottam, hogy az alumínium kedvezőtlenebb festhetősége miatt minden elemzett mutató rosszabb, mint az acéllemez esetében.

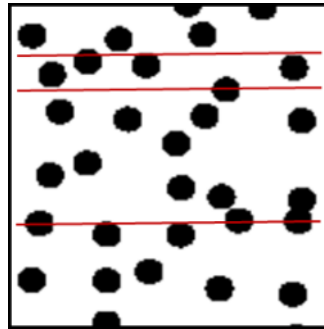
4.2. A DIC vizsgálatokhoz használt mintázatok kvantitatív elemzése

A DIC technológiák alkalmazásához, és így az általam is használt GOM Aramis rendszerhez elengedhetetlen a megfelelő mintázat elkészítése. A kutatásaim során a szakirodalomra és előkísérleteimre támaszkodva én nem a szabályos, hanem a véletlenszerű mintázatok vizsgálatával foglalkoztam. Ebben a fejezetben a kutató munkám ide vonatkozó részeit ismertetem.

4.2.1. Vizsgálati módszer

Az irodalmi áttekintésből egyértelműen látható, hogy a mintázatok jellemzésére nincs kialakult módszer, ezért célul tűztem ki egy új, az eddigieknél átfogóbb értékelés fejlesztését. Alapvető technikaként az ötvözetekben megtalálható izolált részecskék detektálására kidolgozott eljárást fogom használni a foltok jellemzésére, ezért a fogalomkört az ott elfogadott jelölések rendszerével tárgyalom. A kvantitatív mikroszkópia gazdag irodalmából a legfontosabbak műveket tartalmazza az irodalomjegyzék. Szaltikov [72] a műfaj klasszikusának számít, megállapításait sokat idézik, és a további művek elsősorban az ő eredményeire támaszkodnak. DeHoff és Rhines [73], valamint Underwood [74] munkássága emelhető még ki, de rendkívül értékes a Gácsi és szerzőtársai által készített összefoglaló mű [75], amely a 2001-ig

végbement fejlődést tárgyalja egyetemi tankönyv formájában. A továbbiakban bemutatott gondolatmenet ezeknek a műveknek a megállapításaira támaszkodik, de már a DIC technikában alkalmazott mintázathoz kapcsolódva értelmezi a fogalmakat.



4.22 ábra. DIC vizsgálathoz használt mintázat [76]

A 4.22. ábrán az [76] weblapról letölthető mintázat generáló programmal készült kép egy részlete látható. Legyen a piros vonalak hossza L_i , és a vonalak által metszett foltok száma N_i . A vonalak kellő sűrűséggel fedjék le a vizsgálandó képet. Az egységnyi vonalhosszra eső metszések száma az összes metszésnek és a teljes vonalhossznak a hányadosa, ahogy a (7) egyenlet mutatja.

$$N_L = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \left[\frac{1}{mm} \right] \quad (7)$$

A foltok által lefedett terület legyen A_f , a teljes vizsgált terület pedig A_t . Ekkor a foltok által lefedett területarányt a (8) egyenlet fejezi ki:

$$A_A = \frac{A_f}{A_t} [-] \quad (8)$$

Ezek ismeretében kifejezhető a foltok középpontja közötti átlagos távolság (σ), valamint a két folt közötti átlagos távolság (λ) a következő összefüggésekkel írható le:

$$\sigma = \frac{1}{N_L} \text{ és } \lambda = \frac{1-A_A}{N_L} [mm] \quad (9)$$

A vonalaknak a foltokba eső átlagos metszékhossza:

$$L_3 = \frac{A_A}{N_L} [mm] \quad (10)$$

Feltételezve, hogy a foltok alakja közelítően körnek tekinthető, a foltok átmérője a metszékhossz $4/\pi$ -szerese, azaz $D_{\text{átl}} = 1,273 \cdot L_3$. Ezekkel az összefüggésekkel lényegében a foltok összes kollektív jellemzője számítható.

Az összefüggésekben szereplő N_L és A_A mennyiségek a digitalizált képekből ismert technikákkal meghatározhatók. Első lépésben a képet binárisá kell alakítani megfelelő küszöbszint alkalmazásával, majd ezen a képen lehet a további elemzéseket végezni.

Saját munkámban erre a Réti [77] által kidolgozott ablak technikát alkalmaztam, melynek előnye, hogy egyszerűen értékelhető és nem igényel különleges számítástechnikai feltételeket. Néhány alkalmazási példát Czinege és Réti [78,79] publikációi mutatnak karbidsorokat tartalmazó acélokra. A módszer lényege az, hogy a bináris képen végig kell futtatni egy 2x2-es ablakot, melynek kockái 2 hatványaival vannak súlyozva, így rendre 1, 2, 4 és 8 értéket reprezentálnak. Az egyes ablakok konfigurációját és a hozzá kapcsolt jellemző számot a 4.14. táblázat mutatja.

0	1	2	3	4	5	6	7								
0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
8	9	10	11	12	13	14	15								
0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4.14. táblázat. 2x2-es ablak konfigurációk kódolása [77]

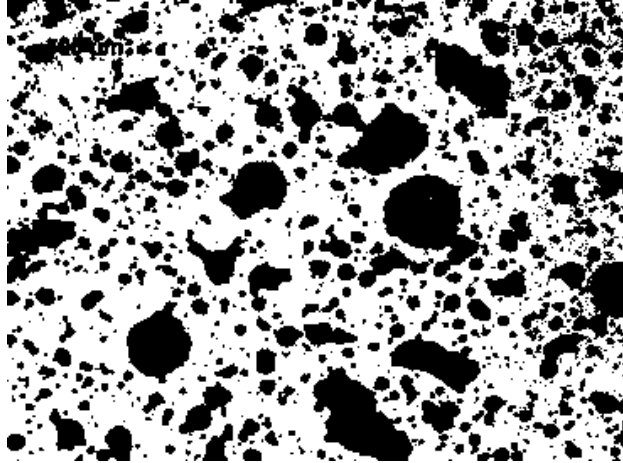
Az ablakot a teljes képmátrixon végigfuttatva összegezzük az egyes ablakok előfordulási száma. Réti [77] szóhasználatát követve ez a 16 elemű \vec{v} struktúra vektor önmagában is jellemzi a képet, de fő előnye, hogy az N_L metszésszámok és a fedett terület A_A aránya, valamint további kvantitatív képi jellemzők is számíthatók az egyes ablak konfigurációk kombinálásával. Például x , azaz sor irányban a 2+6+10+14 számú ablakok gyakorisági számának összege kiadja az összes 0->1 átmenet számát. Hasonlóan y , azaz oszlop irányban is meg lehet határozni a metszések számát a 4+6+12+14 ablakok gyakoriságának összegzésével. Ugyanez megoldható átlós irányban is, ezáltal jellemezni lehet a foltok esetleges anizotrópiáját, meg nem engedett orientációját a metszésszámok 0, 45, 90 és 135 fokos irányokban számított összehasonlításával. A metszésszámok összegét a teljes vizsgált hosszal elosztva adódik az egységnyi hosszra eső N_L metszésszám. Az említett N_L metszésszámon kívül a legfontosabb jellemző a foltokkal lefedett terület aránya, amelyet a megfelelő ablakok gyakoriságának az összegével lehet előállítani (1+3+5+7+9+11+13+15), ez adja az A_f területet, amelyet a teljes A_t területtel osztva adódik az A_A . A két mennyiség ismeretében a többi, a (9 és 10) egyenlettel definiált paraméter számítható.

További geometriai-topológiai jellemzőket tartalmaz a [77] publikáció. Réti

igazolja, hogy a struktúra vektor komponenseiből képzett 10 jellemző algebrailag független maximális rendszert alkot, ezért egy lehetséges \vec{U} képvektor komponenseinek tekinthetők. Ennek az \vec{U} vektornak az első komponense a fedettség (A_A), második és harmadik az x és y irányú N_L metszésszám. Fontos információt hordoznak a negyedik és ötödik komponensek, azaz a G_4 és G_8 jelű Euler számok, melyekből a képmezőn lévő összes részecske számára, és annak 1 mm^2 -re eső arányára lehet következtetni. A 4 és 8 index a szomszédosságra utal a bináris képen. Hatodik az Ω orientációs paraméter, további négy jellemző pedig a 0-45-90-135 fokok irányokba mutató orientációs mérőszám. Az ismertetett 10 paraméter alkalmas lehet alaplátmátrixban található izolált részecskék, jelen esetben a festékfoltok jellemzésére. Azonban a későbbiekben ismertetett vizsgálati eredményekből bizonyítható lesz, hogy amennyiben a minta homogén, nem irányfüggő, akkor az öt orientációs paraméter elhagyható. Továbbá ha a foltokat alkotó pixelek jellemzően nem a sarkokon érintkeznek, akkor a két Euler szám közül a G_4 fogja jellemezni a foltok számát.

4.2.2. Előzetes kísérletek

A bemutatott módszer értékeléséhez DIC vizsgálathoz előkészített szakító próbatesten végeztem vizsgálatokat. A spray-vel szórt mintázatot a 4.23. ábra mutatja. A próbatest felületéről 4 kép készült Zeiss Axio Imager A1 mikroszkópon 2,5-es objektív nagyításban 2584×1912 pixel felbontással, ahol 1 pixel mérete $2,136 \mu\text{m}$ volt a kép skálátényezője szerint. A képeket az Axio Vision 9 szoftverrel binárisá alakítva kéttónusú képek keletkeztek, melyek részben a szoftver saját értékelésű paramétereivel jellemezhetők, részben pedig jpg fájlá alakítva egy saját fejlesztésű Python program segítségével értékeltem és excelben jelenítettem meg. A táblázat munkalapjai tartalmazzák a bináris képet, az egyes képmátrix elemekhez tartozó ablak paramétereket, valamint azok összesítésével képezett 16 elemű struktúra vektort. Ebből a korábban ismertetett jellemzők a 7-10 egyenletekkel értékelhetők voltak. Ellenőrzésképpen az Axio Vision szoftverrel a következő paraméterek lettek meghatározva: a foltok száma (ΣN_p) és egyedi terület mérete (A_i), a lefedett terület (A_f) és összes terület (A_t) aránya (A_A), valamint a Feret átmérők, Feret hányad és a körszerűségi mutató.



4.23. ábra. Jellegzetes mintázat képe

A körszerúségi mutató ($4\pi \cdot \text{felület}/\text{kerület}^2$) az összes mintánál 0,8 felett, jellemzően 0,85 körüli érték volt. Ebből az következik, hogy a foltokra vonatkozó egyszerűsített összefüggések a körszerúség figyelembevételével levezethetők.

Ehhez a következő egyenletek használhatók fel:

$$\text{Átlagos átmérő:} \quad \bar{D} = \sqrt{\frac{4\bar{A}}{\pi}} \text{ [mm]} \quad (11)$$

$$\text{Metszésszám:} \quad N_L = \frac{4A_A}{\pi\bar{D}} \left[\frac{1}{\text{mm}} \right] \quad (12)$$

$$\text{Egységnyi felületen lévő foltok száma:} \quad N_p = \frac{\sum N_i}{A_t} \left[\frac{1}{\text{mm}^2} \right] \quad (13)$$

Megjegyzendő továbbá, hogy az ablak technikával végzett számítások egyértelműen kimutatták a mintázat irányoktól való függetlenségét, a négy irányú metszésszám közel azonos volt. Az is megállapítható volt, hogy a két Euler-szám közül a G_4 jól egyezik az Axio Vision szoftverrel értékelt folt számmal, tehát ez fogadható el az N_p mérőszámként. A mértékegységek kezelésével kapcsolatban az a szabály, hogy az ablaktechnikával értékelt előfordulási gyakoriságok pixellel arányosak, ezért a 16 elemű struktúra vektort a teljes ablak számmal normálni kell, ezáltal a különböző pixel felbontásban értékelt képek is összehasonlíthatók. A normált értékekkel számított gyakoriságokat a mm/pixel léptéktényezővel szorozva a távolságra jellemző eredmények mm-ben kaphatók.

Az így elvégzett értékelés eredményét 4 képre a 4.15. táblázat mutatja. Látható, hogy az eredmények a körszerűségi feltétel részbeni teljesítése és a bináris képpé való alakítás különbözősége ellenére is jó egyezést mutatnak, a hiba csak az N_L és a λ esetében haladja meg a 2%-ot. Ez igazolja az ablak technika alkalmazhatóságát a mintázatok értékelésére.

Zeiss Axio Vision					Ablak technika				
A_A [-]	D-átl- [mm]	N_L [1/mm]	N_p [1/mm ²]	λ , [mm]	A_A [-]	D-átl- [mm]	N_L [1/mm]	N_p [1/mm ²]	λ , [mm]
0,328	0,062	6,754	109,111	0,099	0,320	0,061	6,691	105,384	0,102
0,335	0,053	8,010	150,465	0,083	0,325	0,055	7,502	143,640	0,090
0,355	0,053	8,464	158,502	0,076	0,345	0,057	7,745	151,138	0,085
0,341	0,053	8,265	157,290	0,080	0,321	0,054	7,559	158,861	0,090
				Hiba%=	1,96	1,87	3,59	1,88	4,46

4.15. táblázat. Képi jellemzők összehasonlítása

4.2.3. Új típusú képi jellemző vektor konstruálása

Az új képi jellemzők meghatározásának első lépése a korábban bemutatott képvektor komponenseinek elemzése volt. A következő táblázat 28 eltérő mintázatot tartalmazó képből származtatott \vec{U} képvektorok komponenseinek korreláció mátrixát tartalmazza, valamint a belőlük származtatott λ és D értékeket. Ebből a változók közötti kapcsolatok kiértékelhetők és megállapítható, hogy a területarány (A_A) mutatja a legalacsonyabb korrelációs együtthatókat a többi változóval, emiatt ez függetlennek tekinthető. Az is belátható, hogy a Q és Y_i orientációs jellemzők között nagyon szoros kapcsolat van, így ezek nem hordoznak hasznos információt, tehát az új képvektor konstruálásakor figyelmen kívül hagyhatók. Hasonlóan elhagyható a G_8 is, mivel a G_4 reprezentálja a foltok számát.

Továbbá az N_{Lx} és N_{Ly} között is szoros a korreláció, ezért elegendő azok átlagát, vagy csak N_{Lx} -et figyelembe venni. Ugyanakkor a λ és \bar{D} mint származtatott paraméterek fontos képi jellemzőnek tekinthetők a fizikai jelentésük miatt, ugyanis ezek reprezentálják a foltok közötti távolságot és a foltok átlagos átmérőjét.

	A_A	N_{Lx}	N_{Ly}	$G8$	$G4$	Q	$Y45$	$Y135$	$Y225$	$Y315$	λ	D
A_A	1,000											
N_{Lx}	0,122	1,000										
N_{Ly}	0,117	0,997	1,000									
$G8$	-0,267	0,808	0,814	1,000								
$G4$	-0,200	0,877	0,881	0,988	1,000							
Q	0,181	0,785	0,775	0,467	0,580	1,000						
$Y45$	0,011	0,982	0,984	0,903	0,950	0,722	1,000					
$Y135$	0,009	0,981	0,984	0,904	0,951	0,725	1,000	1,000				
$Y225$	0,008	0,981	0,983	0,905	0,952	0,722	1,000	1,000	1,000			
$Y315$	0,005	0,980	0,983	0,905	0,952	0,723	1,000	1,000	1,000	1,000		
λ	-0,467	-0,720	-0,728	-0,576	-0,604	-0,396	-0,703	-0,703	-0,702	-0,702	1,000	
D	0,326	-0,753	-0,768	-0,792	-0,802	-0,429	-0,792	-0,795	-0,793	-0,796	0,636	1,000

4.16. táblázat. Réti féle képi jellemzők korrelációs mátrixa

A fentiek alapján a javasolt új \vec{K} képvektor komponensei a következők:

$$\vec{K} = (A_A, N_L, N_p, \bar{D}, \lambda) \quad (14)$$

Ez a képvektor önmagában jellemez egy mintázatot. Ugyanakkor a különböző technikákkal, azon belül különböző paraméterekkel készült képek is összehasonlíthatók a segítségével. Erre több módszer kínálkozik, közülük legegyszerűbb az Euklidesi távolságfüggvény, mellyel A és B kép közötti távolság a következő módon írható fel:

$$T(\vec{K}_A, \vec{K}_B) = \sqrt{(\vec{K}_A - \vec{K}_B)^T (\vec{K}_A - \vec{K}_B)} \quad (15)$$

Amennyiben több kép egymástól való távolságának összehasonlítása szükséges, akkor képezni kell minden képnek minden képtől való távolságát, és az így kapott mátrix lesz jellemző a különböző képhalmazokra. Ebből ki lehet keresni a közelebbi vagy távolabbi szomszédokat, melyek hasonlóak vagy kevésbé hasonlóak egymáshoz. Ennél lényegesen informatívabb módszer valamilyen lényegkiemelő algoritmus használata, például a főkomponens analízis. Ezzel a képek összehasonlítása kétdimenziós problémára vezethető vissza, és kevés információvesztés árán az első és második főkomponens függvényében ábrázolva az egyes képekhez tartozó pontokat a hasonlóság/különbözőség megítélhető. A számítás menete a következő:

- Az egyes képek \vec{V} struktúra vektorának előállítás a bináris képből
- A \vec{V} struktúra vektor komponenseinek normálása (osztás az összes vizsgáló ablak számmal)

- Ebből a vektorból a Réti-féle \vec{U} képvektor komponenseinek számítása
- Az \vec{U} képvektorból az öt elemű új \vec{K} képvektor komponenseinek számítása
- A vizsgálandó n darab kép $n \times 5$ -ös mátrixba rendezése, legyen ez az M mátrix
- Az M mátrix oszlopainak normálása (egy elemből kivonva az átlagot és osztva a szórással) annak érdekében, hogy 0 átlagú és 1 szórással oszlopok legyenek
- Az M mátrix kovariancia mátrixának képzése: $\text{kov}(M)$
- A kovariancia mátrix sajátértékeinek és sajátvektorainak meghatározása
- A sajátértékek sorba rendezése, a két legnagyobb sajátvektor kiválasztása és felírása sorvektorok formájában egy 2×5 -ös mátrixba
- A sajátvektorok mátrixának szorzása az $5 \times n$ típusú M^T transzponált mátrixszal
- Az így kapott $2 \times n$ elemű mátrix már az egyes képek jellemző főkomponenseit tartalmazza. A képpontokat az F1-F2 főkomponensek koordinátarendszerében ábrázolva azok relatív helyzete megítélhető, és egy vizuális klaszteranalízissel megkülönböztethetők a csoportok.

Mindkét eljárás, a távolságfüggvény és a főkomponens analízis is alkalmazható arra az esetre, ha egy ipari sztenderd szerinti mintakép rendelkezésre áll (például a GOM Aramis rendszer ilyet kínál), és akkor az etalon képhez való hasonlóságot lehet megítélni. Ez azért jelent előrehaladást a mai technikához képest, mert jelenleg a GOM rendszer csak az etalon kép és a szórt mintázat közötti vizuális összehasonlítást kínálja az elbíráláshoz.

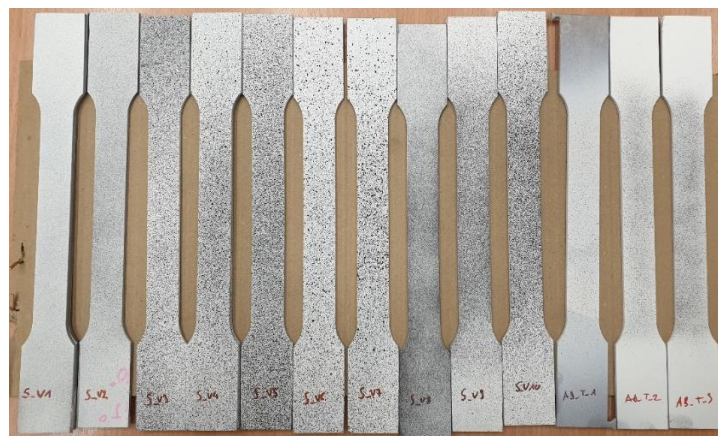
4.2.4. A DIC technikával értékelt képek hibaelemzése

Ezen alfejezet a kísérleti mintázatok jellemzésével valamint a festett próbatestek alakváltozásának vizsgálatával, a DIC és a mérőgépes mérések közötti eltérések elemzésével foglalkozik.

A kísérleti mintázatok jellemzése

Az irodalmi áttekintésből egyértelműen következik, hogy a különböző mintázatok segítségével értékelt lokális alakváltozások csak kísérleti technikákkal hitelesíthetők egyértelműen. Erre mutatott példát a [17] publikáció, amelyben a szerzők szakító próbatest ismert deformációjával hasonlították össze a DIC technikával kapott elmozdulásokat. Elemzésükben a 0 és 1% alakváltozás tartományban végeztek

méréseket és ezeket értékelték. A saját kísérleti tervben ennek csupán az elvét hasznosítom, mivel véleményem szerint az elemzést a nagyobb alakváltozások tartományára is ki kell terjeszteni. Ezért az alakváltozási lépéseket 1...2%-tól az egyenletes alakváltozás határáig célszerű tervezni, attól 1...2%-kal elmaradva, nehogy a diffúz kontrakció már jelentkezzen. A szakítóvizsgálatot adott alakváltozásonként megszakítva a jeltávok között mérhető a teljes nyúlás, amit a DIC eredményekkel lehet összehasonlítani. Ez az ellenőrzési technika alkalmas arra, hogy az új típusú \vec{K} képvektorral jellemzett képeket sokoldalúan lehessen értékelni és minősíteni. A vizsgálatokhoz különböző fedettségű és foltszámú mintázatokat készítettem spray és festékszórás technikával. A spray minták jele SV, a festékszórásé AB (AirBrush) és DC (a DC minta is AirBrush technológiával készült csak a festék gyártójával is megkülönböztetem), ez utóbbiak a festék minőségében különböznek egymástól. A próbatestek a 4.24. ábrán láthatóak.



4.24. ábra. A különböző fedettségű és foltszámú mintázatok próbatestjei

A minták fő jellemzőit a 4.17. táblázat mutatja. Ebből látható, hogy a foltokkal lefedett területarány átfogja a technikailag megvalósítható értékeket, és a foltok 1 mm²-re eső száma is széles tartományban mozog.

	A_A	$N_p, 1/mm^2$
SV1...10	0,18...0,57	36...385
AB1...3	0,19...0,47	119...170
DC1...3	0,46...0,65	57...142

4.17. táblázat. A minták fedettségi és foltszám tartománya

A 4.2.2. pontban ismertetett kísérleti feltételek között, Zeiss Axio Imager mikroszkóppal készült 4 kép mindegyik próbatestről, majd a képeket a 4.2.3. pontban

ismertetett két módszerrel értékeltem (Axio Vision szoftver és ablak technika). Ezután képeztem a (14) egyenlet szerinti képi jellemzők vektorát. A 16 próbatestről összesen 64 képvektor készült, melyet táblázatba foglalva főkomponens analízis segítségével meghatároztam a főkomponenseket. A jobb áttekintés érdekében az egy próbatest 4 képeről készült képi jellemzők vektorát átlagolva előállítottam az adott próbatestre jellemző vektort is. Az átlagokból készített mátrixot a 4.18. táblázat mutatja.

	A_A	$N_p, 1/mm^2$	$N_L 1/mm$	$D-átl-mm$	λ, mm
SV-1	0,187	249,933	7,703	0,031	0,106
SV-2	0,374	386,210	13,548	0,035	0,046
SV-3	0,395	70,215	5,877	0,086	0,103
SV-4	0,533	66,241	6,702	0,101	0,070
SV-5	0,545	62,267	6,570	0,106	0,069
SV-6	0,357	50,234	4,768	0,095	0,135
SV-7	0,451	52,423	5,471	0,105	0,100
SV-8	0,561	71,887	7,127	0,101	0,062
SV-9	0,571	47,551	5,879	0,124	0,073
SV-10	0,562	35,966	5,068	0,141	0,086
AB-1	0,162	118,911	4,941	0,042	0,170
AB-2	0,319	153,788	7,893	0,051	0,087
AB-3	0,472	169,391	10,054	0,060	0,053
DC-1	0,457	141,979	9,088	0,064	0,060
DC-2	0,576	58,866	6,436	0,118	0,068
DC-3	0,647	56,771	6,781	0,123	0,053

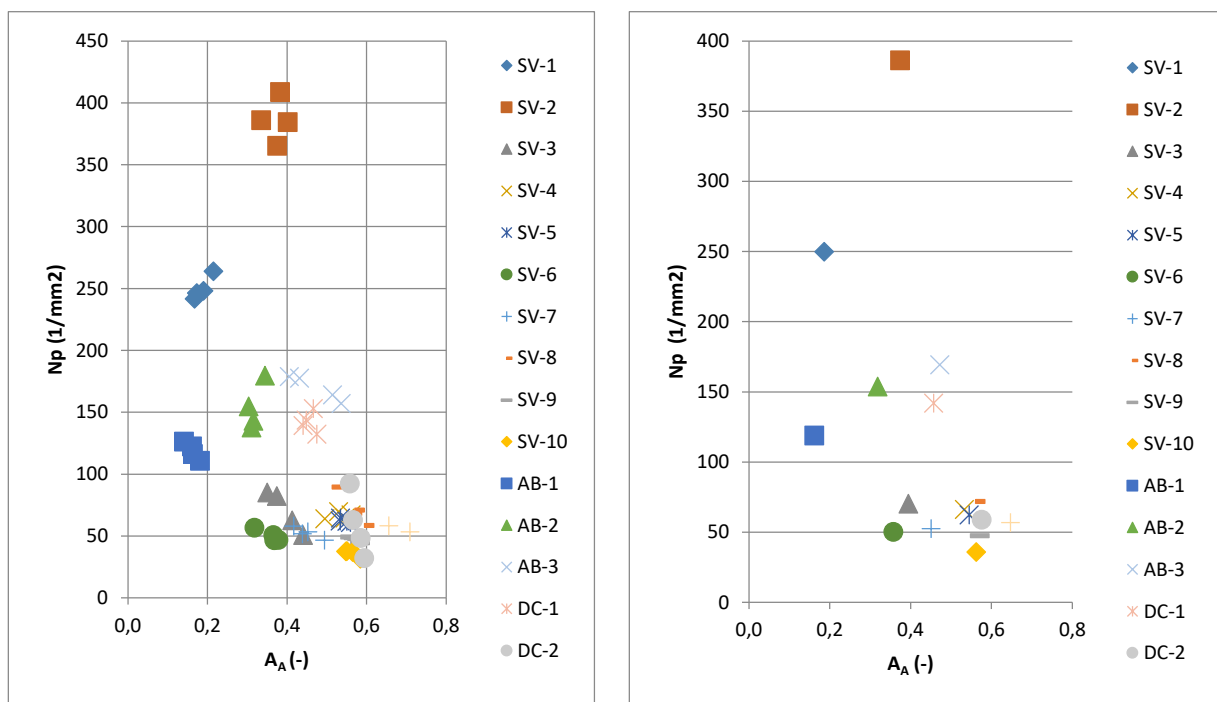
4.18. táblázat. Képi jellemzők mátrixa

Első jellemzőként a (15) képlettel számított távolságok mátrixát mutatom be. A mátrix értékeit színskálával különböztettem meg, ebből a távolságok felismerhetők.

	SV-1	SV-2	SV-3	SV-4	SV-5	SV-6	SV-7	SV-8	SV-9	SV10	AB-1	AB-2	AB-3	DC-1	DC-2
SV-1															
SV-2	136,4									MAX					
SV-3	179,7	316,1								KÖZ					
SV-4	183,7	320,0	4,1							MIN					
SV-5	187,7	324,0	8,0	4,0											
SV-6	199,7	336,1	20,0	16,1	12,2										
SV-7	197,5	333,9	17,8	13,9	9,9	2,3									
SV-8	178,0	314,4	2,1	5,7	9,6	21,8	19,5								
SV-9	202,4	338,7	22,7	18,7	14,7	2,9	4,9	24,4							
SV10	214,0	350,3	34,3	30,3	26,3	14,3	16,5	36,0	11,6						
AB-1	131,1	267,4	48,7	52,7	56,7	68,7	66,5	47,1	71,4	82,9					
AB-2	96,1	232,5	83,6	87,6	91,5	103,6	101,4	81,9	106,3	117,9	35,0				
AB-3	80,6	216,8	99,3	103,2	107,2	119,3	117,1	97,5	121,9	133,5	50,7	15,8			
DC-1	108,0	244,3	71,8	75,8	79,8	91,8	89,6	70,1	94,5	106,1	23,4	11,9	27,4		
DC-2	191,1	327,4	11,4	7,4	3,4	8,8	6,5	13,0	11,3	22,9	60,1	94,9	110,6	83,2	
DC-3	193,2	329,5	13,5	9,5	5,5	6,8	4,5	15,1	9,3	20,9	62,2	97,0	112,7	85,2	56,8

4.19. táblázat. Próbatess mintázatok képeinek távolsági mátrixa

A mátrix adataiból megállapítható, hogy az összes többi mintázattól leginkább az SV-2 próbatest különbözik a 216-350 távolság értékekkel, majd ezt követi az SV1-től való távolsága az SV2...SV10 és DC-1...DC3 képeknek (136-214), végül 30 alatt van az egymástól való távolság az SV-3...SV-10 képek között, illetve a DC2-3 és az SV3...10 képek között. Ez azt jelenti, hogy az SV3-10 és DC2-3 képek a leginkább hasonlóak egymáshoz. Gyors áttekintést adhat a képek egymástól való távolságára a jellemző pontok ábrázolása a fedettség-foltszám koordináta-rendszerben (A_A-N_p), amit a 4.25. ábra mutat. A bal oldali diagram az összes képvektorból kivett 64 pontot mutatja, a jobb oldali pedig az átlagokból képzett A_A-N_p pontokat.



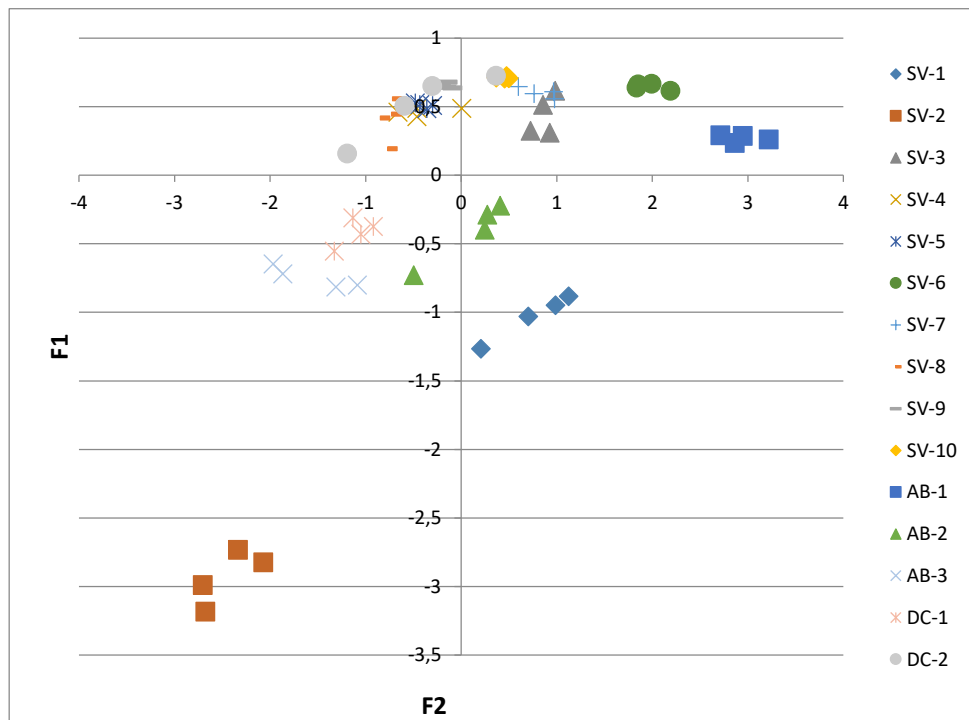
4.25. ábra. A foltok száma és a fedettség közötti kapcsolat

A diagramokból látható, hogy ez a két képi jellemző is jól mutatja az egyes mintázatok közötti különbségeket, az SV-1 és SV-2 pont lényegesen elkülönül a többi mintázattól, a legközelebbi szomszédok itt is az SV-3...10 képek és a hozzájuk közeli DC-k. A 4.2.3. pontban bemutatott eljárással számított főkomponens analízis eredményeit a továbbiakban mutatom be. A 64 képvektorból képezett kovariancia mátrixot a 4.20. táblázat tartalmazza. A mátrix sajátértékeit és sajátvektorait meghatározva képezhetők voltak a főkomponensek. Az elemzés azt mutatta, hogy az első két főkomponens hordozza a teljes képi információk 97,5%-át, tehát lehetséges az első két főkomponens függvényében jellemezni a mintázatokot.

	A_A	$N_p, 1/mm^2$	$N_L, 1/mm$	$D\text{-}\bar{a}tl, mm$	λ, mm
A_A	1,0000				
$N_p, 1/mm^2$	-0,5039	1,0000			
$N_L, 1/mm$	-0,0646	0,8576	1,0000		
$\bar{D}\text{-}\bar{a}tl, mm$	0,8129	-0,8072	-0,5800	1,0000	
λ, mm	-0,6944	-0,2046	-0,6250	-0,1907	1,0000

4.20. táblázat. Kovariancia mátrix

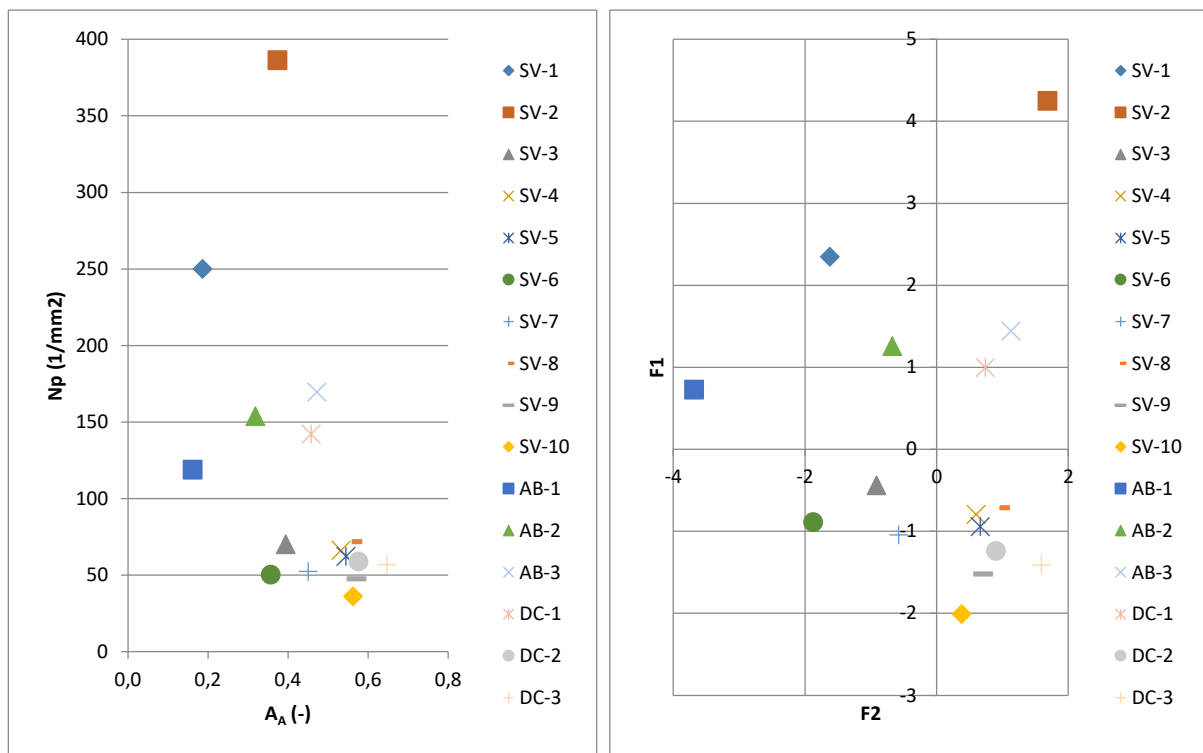
Az így meghatározott F1 és F2 főkomponensek összefüggését mutatja az összes képre a 4.26. ábra. Ebből is látható, hogy az egyes próbatestek összetartozó képpontjai elég közel helyezkednek el ahhoz, hogy az átlagukkal is lehessen helyettesíteni azokat. Erre mutat érdekes összehasonlítást a 4.27. ábra, amely a korábban már bemutatott részecskeszám-fedettség diagramot hasonlítja össze a képi jellemzők átlagából számított főkomponensekkel.



4.26. ábra. A mintázatok jellemzése az első két főkomponens koordináta-rendszerében

A 4.27. ábrán látható, hogy a foltszám-fedettség diagram közel annyi információt hordoz, mint a főkomponensek diagramja, ugyanis a képpontok elrendeződésének jellege hasonló (a hasonlóság jobb kimutatása érdekében a főkomponens vektorokat tükrözve készült a diagram). Mindkét diagramban az SV-1 és SV-2 minta jelentősen

elkülönül a többi mintázattól, ezen belül is a különbséget inkább a foltok száma, azaz a cseppek finomsága jelenti.



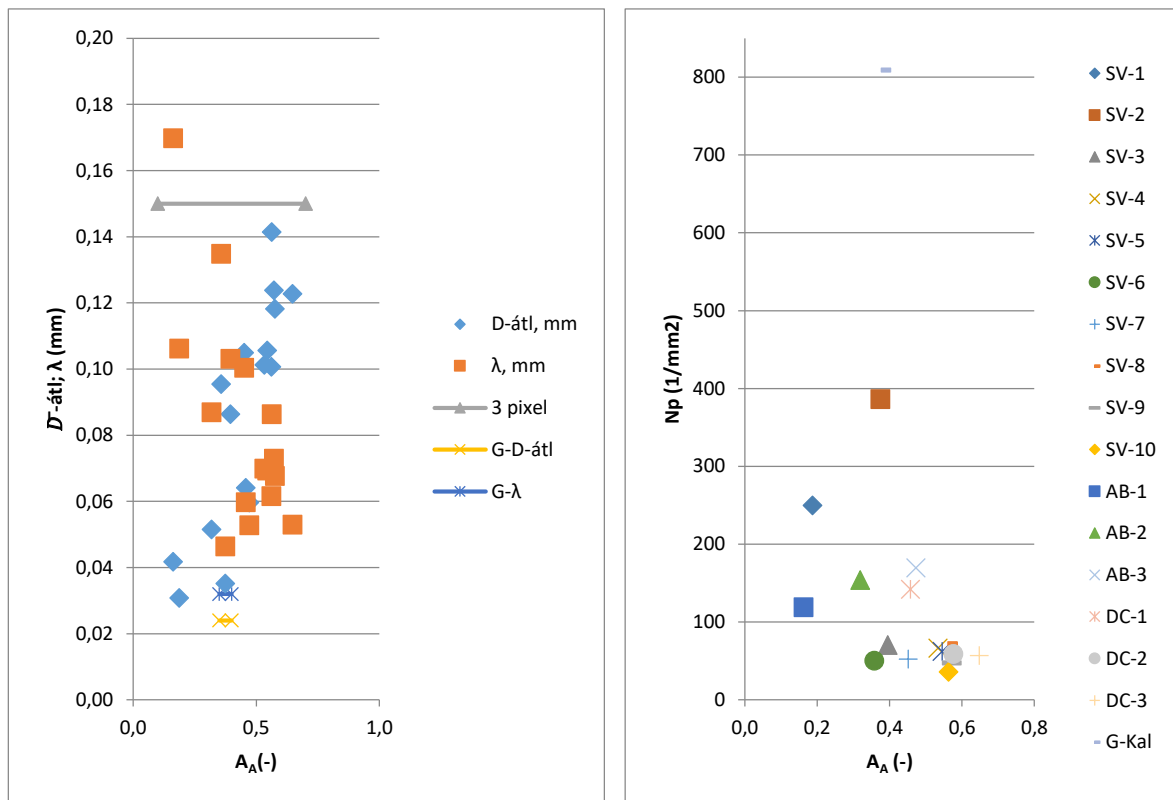
4.27. ábra. Mintázat jellemzők és főkomponensek összehasonlítása

A bemutatott képi jellemzők összehasonlíthatók a 2.15. ábrán bemutatott GOM kalibráló képpel is. A pdf-ben adott képet jpg-vé alakítva az Axio Vision szoftverrel értékeltem ki a képi jellemzőket, az egyöntetűség érdekében ugyanolyan felbontásban, mint a többi kísérleti próbatest képét.

További összehasonlítás céljára meghatároztam a GOM Aramis technikával felvett képek jellemzőit is a 2.5 ábrán bemutatott számításhoz hasonlóan. A kísérletekhez használt kamera felbontása 2448x2050 pixel, a látómező mérete 125x105 mm. Ebből következik, hogy 1 pixel mérete kerekítve 0,050 mm, tehát az irodalom szerinti kívánatos folt méret $(3...5) \cdot 0,05 = 0,15...0,25$ mm. A foltok közötti λ átlagos távolságra vonatkozó előírás szintén hasonló nagyságú, mint a foltok mérete.

A 4.28. ábrán a mért, valamint a számított 3 pixel méret és a GOM kalibráló kép jellemzői vannak együttesen ábrázolva. A bal oldali képen a fedettség függvényében látható az átlagos foltméret (\bar{D} -átl) és a közöttük lévő távolság (λ). Ugyanitt ábrázoltam

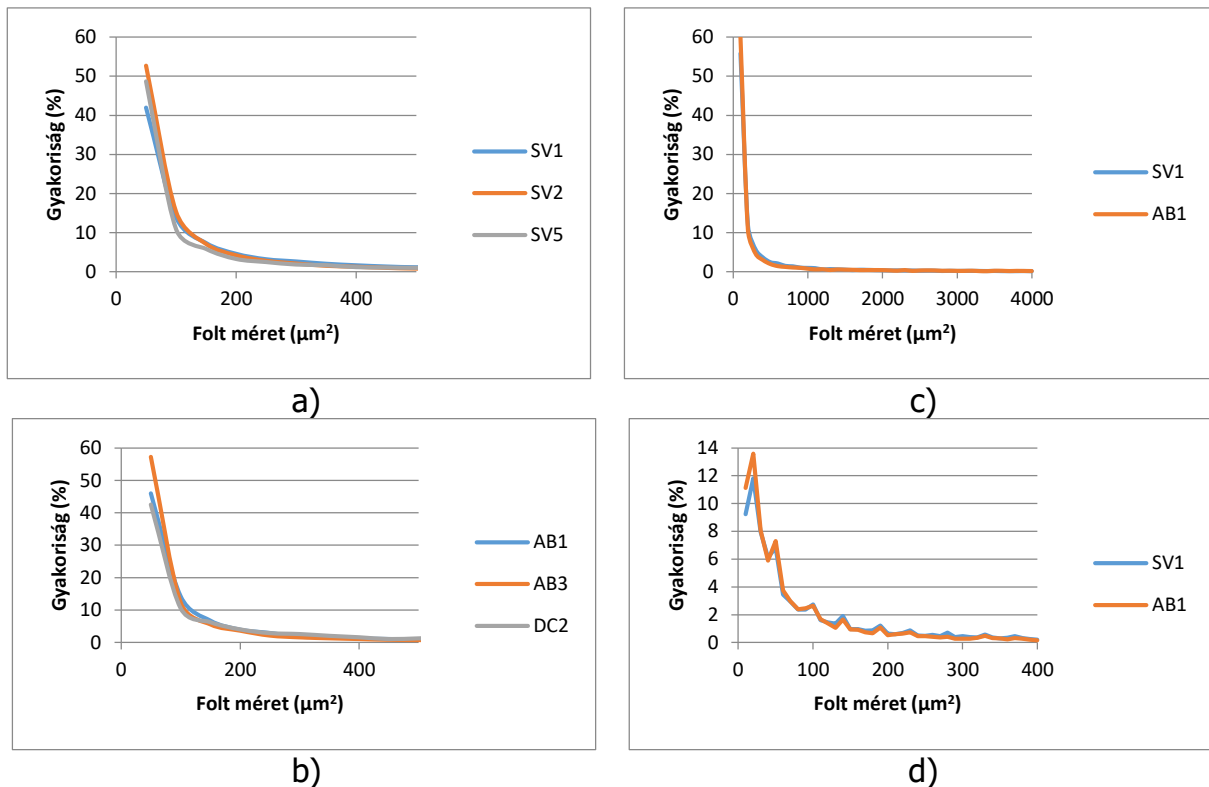
a 3 pixelnek megfelelő vonalat 0,15 mm magasságban, valamint a GOM kalibráló kép G-D-átl és G- λ pontokat is, ez utóbbiak 0,024 illetve 0,032 mm magasságban helyezkednek el. A jobb oldali képen a GOM kalibráló kép fedettségét (0,377) és az egységnyi felületre eső foltok számát ábrázoltam. A két diagram egybevetéséből megállapítható, hogy az általam készített mintázatok átlagos mérete az ajánlott 3 pixel alatt van, viszont a GOM kalibráló kép jellemzői (\bar{D} -átl és λ) még a kísérleti mintázatok alatt helyezkednek el, és ebből adódóan a GOM kép foltszáma közelítően kétszerese a legnagyobb foltszámú kísérleti mintázatokénak. Ebből az következik, hogy a GOM által ajánlott kép fedettsége irányértéknek elfogadható (0,377), mivel mind a spray, mind a festékszórásos technikával ezek a mintázatok állíthatók elő a szemlélettel megegyező módon, de a foltok mérete túl kicsinek tűnik az ajánlott 3 pixelhez képest. Az is lehetséges, hogy mivel a GOM etalonkép nem ad meg léptéket, a beviteli paraméterek azonossága mellett is előfordulhat eltérés a meghatározott képi jellemzők között.



4.28. ábra. Ajánlott és kalibráló mintázatok összehasonlítása

További összehasonlítás lehetséges a szórt minták között a foltok méretének hisztogramja, ahogy ezt a [17] irodalom szerzői is alkalmazták. A 4.29. ábrán látható a spray (SV) és az AirBrush (AB, DC) technikával készült mintázatok összehasonlítása.

Mindkét festési mód esetén a fedettség kis (0,16...0,18), közepes (0,37...0,47) és nagy (0,54...0,57) méretű, ennek ellenére a foltok gyakorisági görbéi minimális kezdeti eltérés után együtt futnak. Az SV1 és AB1 minták összehasonlítása látható a 4.29.c. és d. ábrán különböző felbontásban. Még az erősen nagyított felbontású utolsó kép sem mutat különbséget a flakonból szórt és a festékfúvóval felvitt minta között.



4.29. ábra. Különböző technikával készült mintázatok folt méret eloszlása

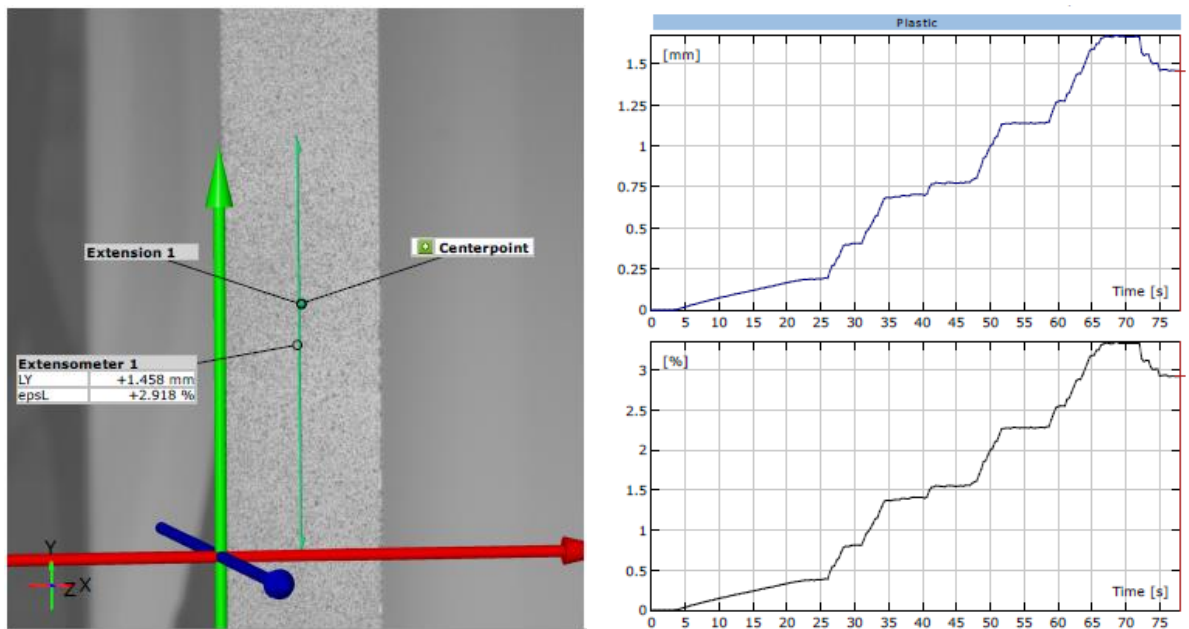
A hisztogramok elemzéséből az a következtetés vonható le, hogy a festék porlasztása során igen sok kis méretű, néhány pixel területű folt keletkezik, amelyek a hisztogram elején mutatnak magas gyakoriságot. Ezek valószínű nem jelennek meg a DIC értékelésben, mivel ott egy pixel² mérete 2000 μm², tehát az átlag körüli és annál nagyobb foltokat észleli a szoftver a vizsgáló ablakban.

A képi jellemzők összehasonlításából megállapítható, hogy azok alkalmasak a mintázatok egyértelmű jellemzésére és az irodalmi ajánlásokkal való összehasonlításra. A továbbiakban ezek pontosságát elemzését mutatom be.

A próbatetek alakváltozásának összehasonlítása a DIC eredményekkel

A festéssel előkészített 20 mm széles és 2,5 mm vastag AA5754 próbatetek jeltávja 80 mm volt, a teljes vizsgálati szakasz 120 mm, a befogó rész szélessége 30

mm. A próbatetek hátoldalára 98,1 N terheléssel Vickers lenyomatokat készítettem 50 mm távolságra, amelyek pontos értékét alakítatlan állapotban optikai hosszmérőgéppel mértem meg 0,001 mm leolvasási pontossággal. A próbatesteket húzással alakítottam az Instron 5582 szakítógépen 5 mm keresztfej elmozdulásokkal, 5 mm/min sebességgel. A próbatetek DIC vizsgálatát 5 MP-es kamerával felszerelt GOM Aramis 5M rendszerrel végeztem. A szakítógép elindítása előtt 3 Hz-es mintavételi frekvenciával indítottam a képfelvételt, majd a választott 5 mm-es alakítás után a szakítógép megállt és az erőt 0 értékre csökkentettem, majd a próbatestet felszabadítottam a befogóból. A tehermentes próbatesten is készült felvétel, így az alakváltozás történet teljes folyamata rögzítve lett. Egy tipikus regisztrátumot mutat a 4.30. ábra az SV-2 próbatest 20 mm-ről 25 mm-re való alakításáról.

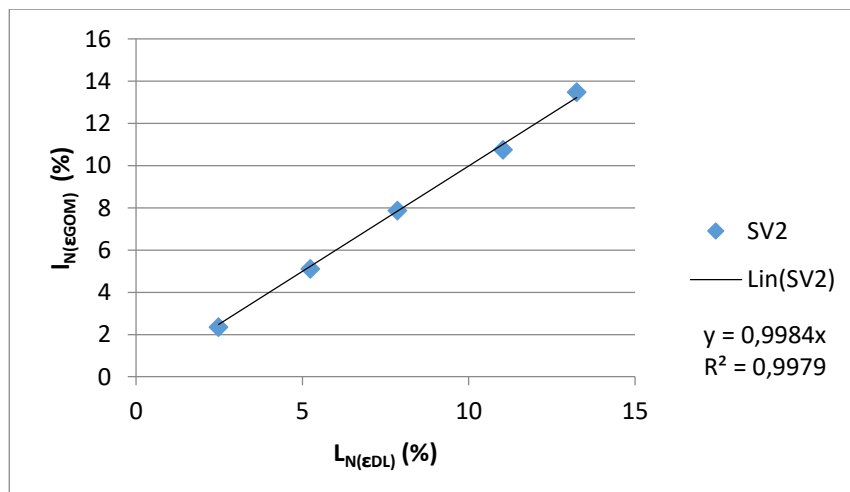


4.30. ábra. Hosszirányú nyúlás változása az idő függvényében

Az ábra bal oldalán látható a mintázattal ellátott próbatest, a virtuális extenzométer és a folyamat végén meghatározott nyúlás mm-ben és %-ban. A jobb felső kép a nyúlás, az alsó a %-os alakváltozás értékeit mutatja az idő függvényében. A diagramon látható alakváltozás lépcsők a PLC effektus következményei. A diagram legmagasabb pontja a rugalmas és maradó nyúlás összegét mutatja, ezután következett a leterhelés és a befogóból való kioldás, amely a tiszta maradó alakváltozás leolvasását tette lehetővé. A képen definiált virtuális extenzométer ugyanarra a

szakaszra vonatkozik, mint a távolságjelző Vickers lenyomatok. Alakítás közben 5-10-15-20-25 mm távolságokon megszakítottam a vizsgálatot, ezáltal egy próbatestről 5 összetartozó DIC és mérőgéppel meghatározott nyúlás növekményt vettem fel.

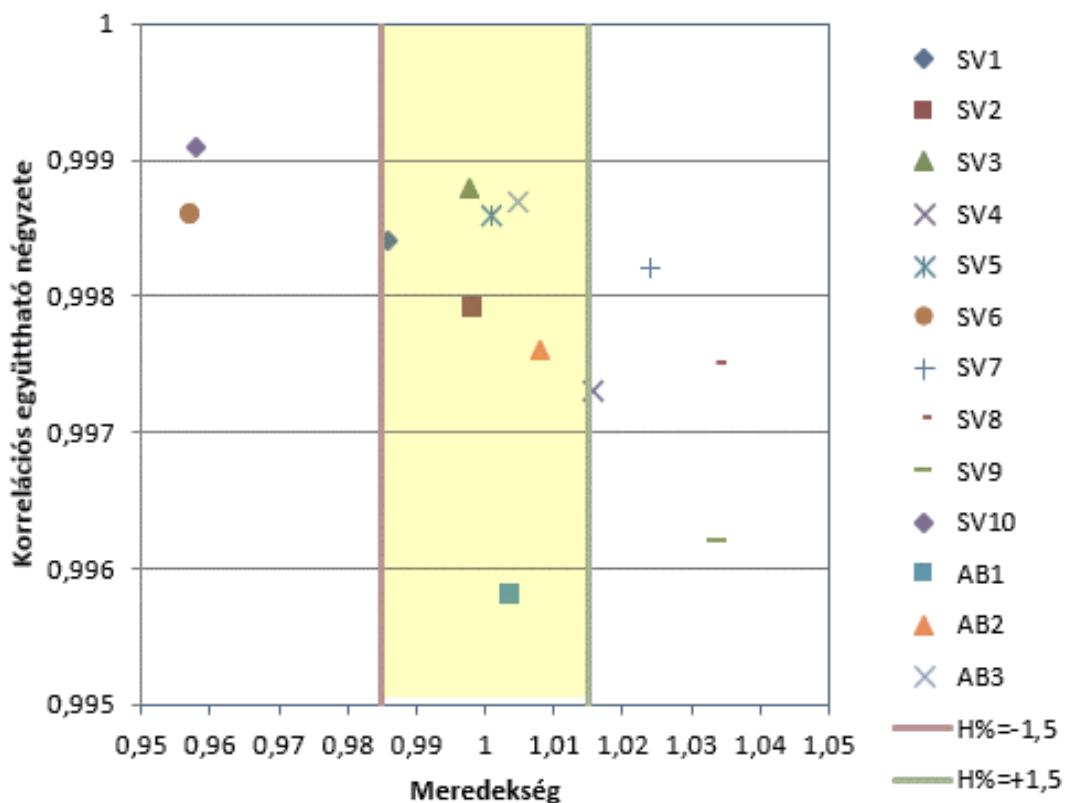
A GOM a virtuális extenzométert minden növekmény után 50 mm-es alapértékre állítja és ehhez képest adja meg a ΔL_i növekményt mm-ben és a mérnöki nyúlást %-ban. Ez egy kiértékelési sajátossága a rendszernek, hogy a megnyúlt próbatesteket új próbatestnek veszi, és ezért a már megnyúlt próbatestre is helyez egy újabb 50 mm-es virtuális extenzométert. Tulajdonképpen itt is a kiinduló jeltávhoz tartozó dL elmozdulásokat mértem és ezekből képeztem az $\ln(dL/L_0)$ logaritmikus nyúlásokat, melyek így a mindenkori jeltávától független nyúlás értéket adnak. A mérőgéppel viszont a megnövekedett alakváltozáshoz adódik a következő növekmény, így a nyúlást ezekből az adatokból lehet számolni. Az értékelés során a növekmények kumulált értékét számoltam ki, ezért a mérnöki nyúlásokat átszámítottam logaritmikus nyúlásokra, mivel azok összegezzhetők. Az így kapott teljes nyúlás értékeket ábrázoltam úgy, hogy a mérőgéppel meghatározott nyúlás függvényében szerepeljen a GOM által értékelt nyúlás. Akkor tekinthető megfelelőnek a két mérés egybeesése, ha a mérési pontokra illeszkedő egyenes iránytangense 1 és a korrelációs együttható négyzete is közel van az 1-hez. Egy tipikus közelítő egyenest mutat a 4.31. ábra.



4.31. ábra Hosszméréssel és DIC technikával meghatározott mérési pontok

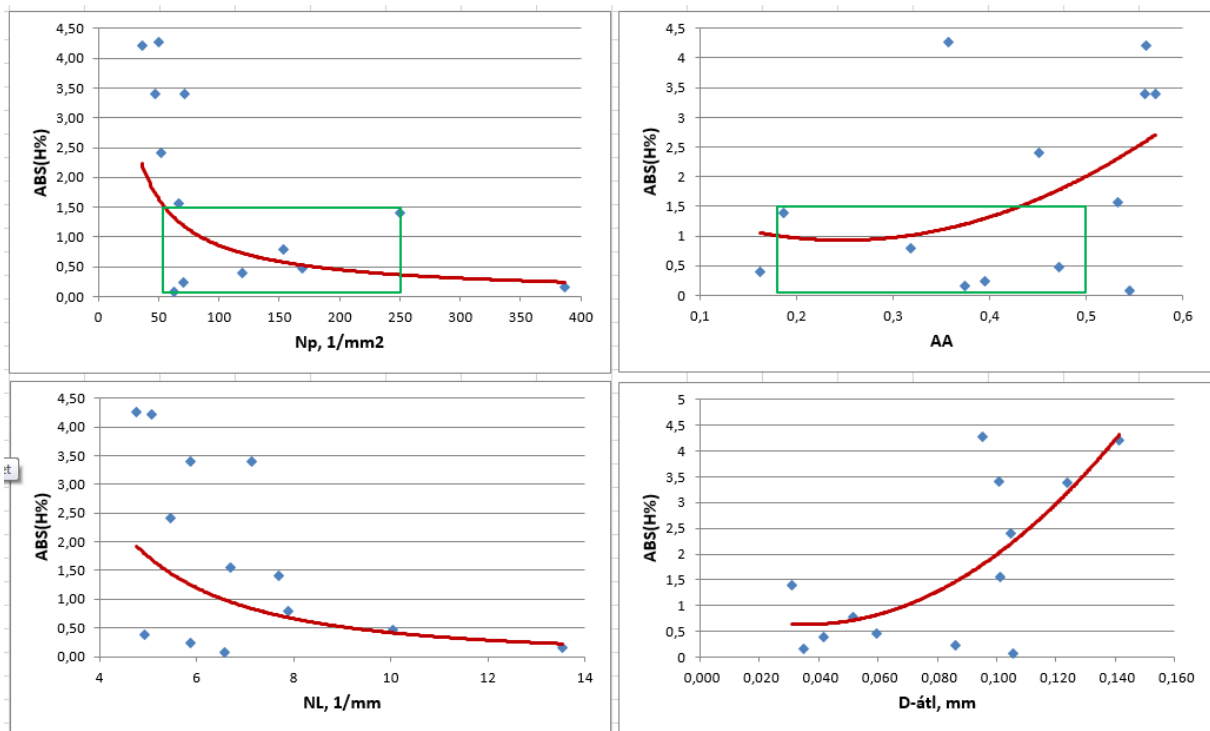
Az összes próbatestekre vonatkozó meredekség-korrelációs együttható diagramot a 4.32. ábra szemlélteti. Ebből látható, hogy a mérési pontokat közelítő egyenesek

egyenlete a 0,96-1,04 tartományon belül van és a számítással meghatározott átlagos hiba 1,75%. Ezek az értékek nem haladják meg a méréstől várható bizonytalanságokat. A diagram közepén lévő függőleges egyenesek a meredekség +/- 1,5% hibahatárát jelölik ki, az R^2 1,5%-os hibája a teljes diagram magasságra terjed ki (az ábra csak 0,5% hibahatárig mutatja a pontokat, ez alatt további értékek nem voltak). A mintázattal kiemelt téglalap szemlélteti mindazon festési mintákat, ahol a hiba az említett értékeken belül van.



4.32. ábra. A mért meredekségek és korrelációs együtthatók kapcsolata.

A hibahatárok és a képi jellemzők közötti kapcsolatokat a 4.33. ábrák mutatják. Itt a mérési hibát az iránytangens 1-től való eltérésének abszolút %-os értékével jellemeztem, ez az $ABS(H\%)$, és ezt ábrázoltam a különböző képi jellemzők függvényében. Az így kapott diagram együttest mutatja a 4.33. ábra.



4.33. ábra. A DIC és a mérőgépes mérések közötti eltérések

Az ábrákból megállapítható, hogy a pontok jelentős szórást mutatnak, de azért egyértelmű tendenciák láthatók a képi jellemzők, valamint a GOM által meghatározott és a mérőgéppel ellenőrzött nyúlások között. A mintázat fedettségének és a foltok átlagos átmérőjének növekedése növeli a hibát, ugyanakkor az 1 mm²-re eső foltok száma és az 1 mm-re jutó metszésszám függvényében a hiba csökken.

A közelítő függvények elemzése alapján egyértelmű, hogy az ábrázolt tartományok közepén elfogadható mértékűre, 1,5% alattira csökken le a hiba.

ABS(H%)<1,5	SV1	SV2	SV3	SV5	AB1	AB2	AB3
N_p 50-250	SV1		SV3	SV5	AB1	AB2	AB3
AA 0,2-0,5	SV1	SV2	SV3			AB2	AB3

4.21. táblázat. Az 1,5%-nál kisebb hibájú minták a paraméterek függvényében

A 4.21 táblázat az 1,5%-nál kisebb abszolút hibát adó mintákat tartalmazza, összehasonlítva azzal, hogy a 4.12. ábrán feltüntetett tartományokba ezek közül melyik esik bele. Látható, hogy N_p esetében az átfedés majdnem teljes, az AA esetében pedig két minta nem esik a kijelölt tartományba. Ebből megállapítható, hogy a 0,2...0,5 fedettségű, 50...250 1/mm² közötti foltszámú próbatestek festése tekinthető

legkedvezőbb mintázatnak. Ezek a spray technika SV1 és SV3, valamint az AirBrush szórás AB2 és AB3 változataival állíthatók elő mindkét kritérium szerint megfelelő hibahatárral az A jelű vízbázisú festékekkel, ezért ezek tekinthetők a legmegfelelőbbnek a mintázat felvitelére az adott képi jellemző pontossági határainak betartásával.

Megjegyzésre érdemes, hogy a GOM rendszer a vizsgálat előtt minősíti a mintázatot, és színjelzéssel indikálja annak megfelelőségét. A most elkészült próbatestek mindegyikét megfelelőnek minősítette, nyilván a mintázat jellegéhez igazította a vizsgáló ablak méreteit és a képkorrelációs technikát.

Összefoglalva megállapítható, hogy az így megállapított 1,5%-os hibahatár elfogadható a GOM által végzett nyúlásmérés pontossági kritériumaként, miközben a mérési szórásra jellemző korrelációs együttható négyzete minden esetben meghaladta a 0,995-ös értéket. A mérés különös jelentőségét az adja, hogy ez a szakítóvizsgálatok során mérhető egyenletes nyúlástartományt átfogta egészen 15%-ig, amelyre az irodalomból hasonló információk nem ismertek.

A digitális képkorrelációs technika vizsgálatával kapcsolatos megállapítások:

- A véletlenszerű mintázatok jellemzésére egy az irodalomból már ismert vizsgáló ablak technikán alapuló elemző módszert adaptáltam és egy újszerű morfológiai paraméter együttest dolgoztam ki. A paramétereiből komponált képi jellemzők vektora a következő jellemzőket tartalmazza: fedettség, átlagos szabad úthossz, egységnyi felületre eső foltszám, a foltok átlagos átmérője és átlagos távolság a foltok között. Ez a vektor alkalmas az egyedi képek minősítésére.
- A képi jellemzők vektorából képezett öt dimenziós Euklidesi távolságfüggvény, valamint a főkomponens elemzésen alapuló vizuális klaszteranalízis alkalmas az egyes képek hasonlóságának megítélésére, illetve a technikai sztenderdek megfelelő etalon képektől való eltérés megítélésére.
- A különböző festési paraméterekkel készített és a képi jellemzők vektorával definiált képek digitális képkorrelációs technikával értékelt helyi nyúlásait a szakítóvizsgálat során mért teljes nyúlással összehasonlítva meghatároztam a DIC vizsgálat pontosságát. Megállapítottam, hogy a vizsgált 0-15% nyúlás

tartományban az összehasonlító vizsgálat során észlelt átlagos hiba nem haladja meg a méréstől elvárt értéket.

- A pontossági elemzés összesített eredményei kijelölik a képi jellemzők azon tartományát, amelyen belül a hiba 1,5% alá csökkenthető. Ezekhez kiválasztottam a megfelelő festék minőséget és szórás technológiai változatokat.

4.3. A lokális alakváltozások vizsgálata

A lokális alakváltozások vizsgálata az egyik fő témája a kutató munkámnak, így ebben a fejezetben ez a rész kerül bemutatásra különös tekintettel a PLC effektusra, valamint a diffúz és lokális kontrakcióra a DIC technológia alkalmazásával.

4.3.1. Az egyenletes alakváltozás tartományának elemzése

Vizsgálati módszer

A PLC effektus részletes elemzése a szakítódiagram kezdetétől a maximális erő eléréséig, az egyenletes alakváltozás tartományára terjed ki. A kísérletek során elsősorban AlMg3 lemezeket vizsgáltam, melyek kémiai összetételét a 4.22 táblázat mutatja.

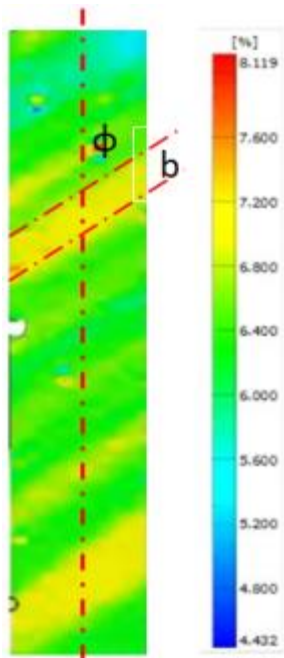
	Vastagság, mm	Mg%	Fe%	Si%	Mn%
A1	2,5	3,30	0,11	0,05	0,33
A2	2,5	3,41	0,23	0,17	0,16

4.22. táblázat. A vizsgált lemezek jellemzői

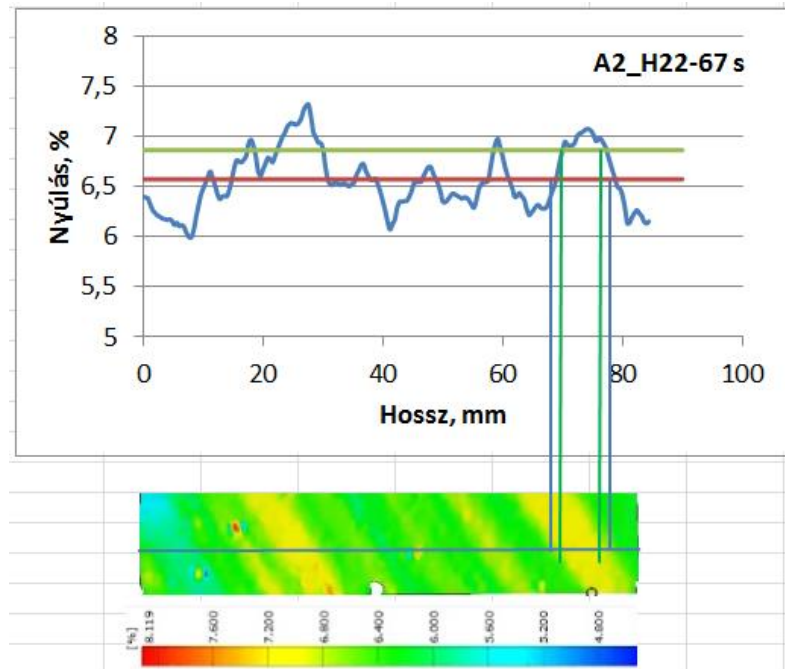
Az A1 és A2 lemezek lágy (O) és hidegen alakított (H22) állapotban is vizsgálva lettek. Mindegyik lemez H22 állapotban érkezett, ebből 320 C°-on 2 óráig végzett lágyítással készültek az O változatok. A lemezeket a hengerlési iránnyal párhuzamos (RD), arra merőleges (TD) és 45 fokos irányban (DD) is vizsgáltam.

A szakító próbatesteken a nyúlásmezőket az idő függvényében regisztrálta a GOM Aramis 5M hardver-szoftver technika. A nyúláseloszlás grafikusan színes képeken állt rendelkezésre, emellett a nyúlások számszerű értékét is ki lehet nyerni a szoftverből tengelyirányban és keresztirányban. A nyúlásképeket 1-2%-os lépésekben értékeltem 2%-tól közelítően 15% maradó alakváltozásig. Az idő és a hely függvényében mátrixba

rendezett nyúlás értékekből az átlagnyúlás (ϵ_{AVG}), a maximális és minimális nyúlás (ϵ_{max} és ϵ_{min}), valamint a nyúláseloszlás hisztogramja volt értékelve, amelyet négy paraméteres Gauss függvénnyel közelítettem a (17) egyenlet szerinti alakban.



4.34. ábra. Nyúlás eloszlás és a PLC sáv szélesség



4.35. ábra. Nyúlás eloszlás színskálája és értékei

A 4.34. ábrán látható PLC sáv szélessége a sárga szín határán jelölhető ki, és a határoló vonal tengellyel alkotott szöge is itt mérhető. Az abszolút PLC nyúlás a színskála alapján 7,2%-ra becsülhető, de a korábbi definíció szerinti nyúlás növekményt a sávot körülvevő zöld jelzésű nyúláshoz kell viszonyítani, ami $\sim 6,5\%$ – ez közelítően az átlagnyúlással egyenlő. Ebből adódóan a PLC nyúlás, $\epsilon_{PLC} \sim 0,7\%$, amely a 2.2. fejezetben bemutatott irodalmi adatokhoz hasonló. A digitalizált nyúlás értékeket a 4.35. ábra mutatja. Az első benyomás az, hogy több különböző PLC sáv van a próbatestenen, amelyek szélességben és a nyúlás nagyságban is különböznek. Ez azzal magyarázható, hogy a sávok a diszlokációs mechanizmusokból adódó véletlenszerű hatás miatt a képződés különböző fázisaiban vannak, ezért pillanatnyi állapotuk eltér egymástól, így nem lehetséges egységes sáv paramétereiket megadni. A megoldás kétféle módon lehetséges, (i) egy karakterisztikus sáv kiválasztása értékelésre, vagy (ii) feltételezve, hogy a nyúlás sávok előfordulása statisztikus, véletlen változó, ezért statisztikai módszerekkel kell jellemezni azokat.

A 4.35. ábra bal oldalán lévő sávot kiemelve első kérdés a sáv szélességének meghatározása. Erre a nyúlás grafikonnak az átlag nyúlás piros vonalával alkotott metszéke, vagy a felett egy tetszőleges, később definiált zöld vonallal alkotott metszék – például a sáv magasságának felében lehet alkalmas. A második kérdés a sáv nyúlásának értékére vonatkozik. Az abszolút nyúlás magasság 7,07% és az átlagnyúlás 6,55% - ebből a PLC nyúlásra 0,52% adódik. Ugyanakkor a próbatest bal oldalán lévő csúcs 7,25% magasságú, ebből 0,7% PLC sáv nyúlás számítható, amely megegyezik a grafikus értékeléssel. Látható tehát, hogy az egyes sávok nyúlása különbözik. Ezért a publikációmban [83] az átlagos PLC nyúlásra az átlag + szórás értéket ($\epsilon_{AVG} + \epsilon_{STD}$) javasoltam, amelyet a zöld vonal mutat. Ennek 7,01%-os értéke kicsit alacsonyabb, mint a vizsgált két maximum, de ugyanakkor lényegesen stabilabb mérőszámnak mutatkozik. Az átlagos sáv szélességet az átlagnyúlással való metszésekből lehet számolni, ez például a jelen esetben 6 sávra összesen 36,8 mm metszékhossz, tehát az átlag 6,13 mm.

Az inhomogenitás jellemzésére az egyenletes alakváltozás tartományában a [43] szerinti definíciót lehet alkalmazni, amely a PLC effektustól függetlenül minden inhomogenitásra jellemző. Az inhomogenitási faktort a (16) összefüggés definiálja, értéke a nyúlás mátrixból könnyen értékelhető adott átlagnyúlás esetében.

$$\Lambda = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{\epsilon_{AVG}} \quad (16)$$

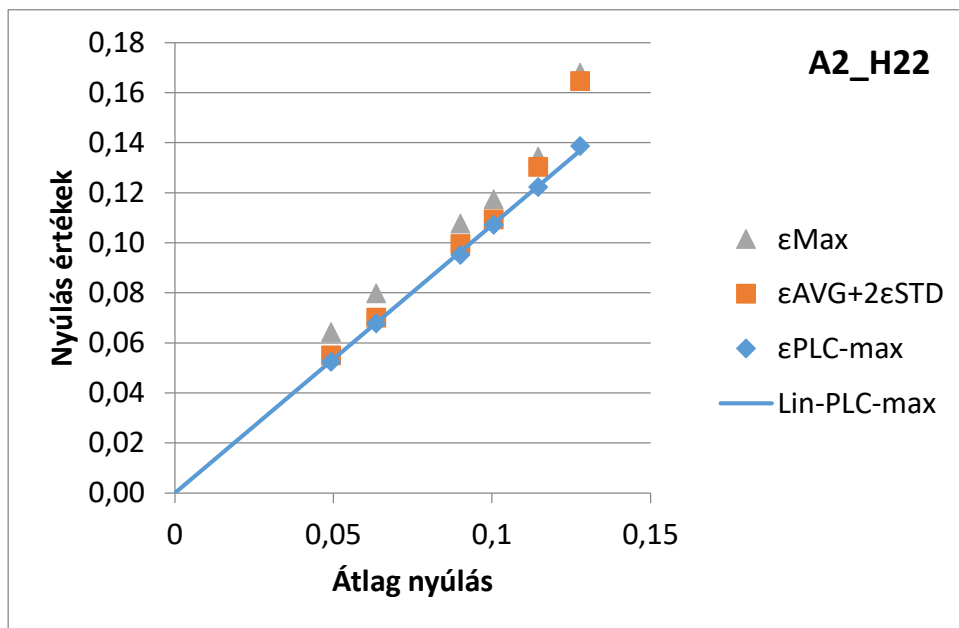
Ez a tényező függ a nyúlástól, ahogy a vizsgálati eredményekből látható lesz.

Vizsgálati eredmények

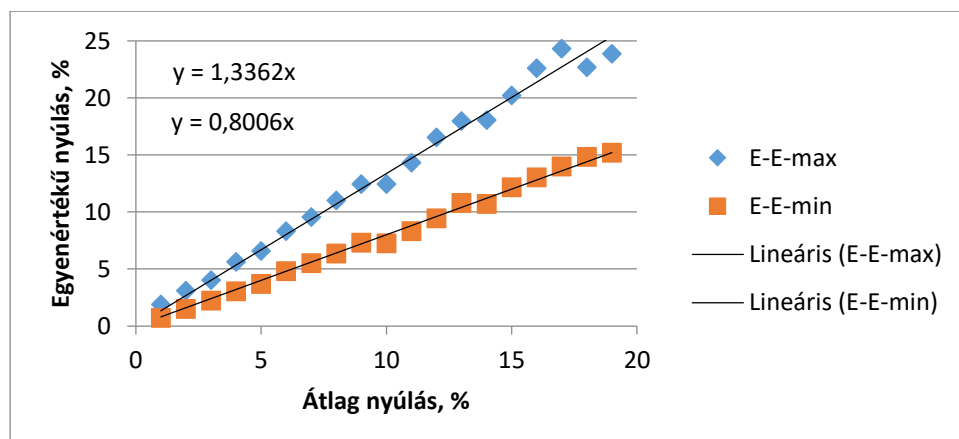
Az idő, valamint ezzel arányos átlag nyúlás függvényében ábrázolva a maximális nyúlást, az átlag+2szórás értékeket, valamint a korábban definiált PLC nyúlást a 4.36.a. ábrán látható grafikont kapjuk. Ebből következik, hogy az ábrázolt karakterisztikus nyúlások jó közelítéssel lineáris függvényei az átlagnyúlásnak. Az ábrából az is látszik, hogy első közelítésre a nyúlás maximumok és a két szórással növelt átlag nagyon közel vannak egymáshoz, valamint nem jelentősen különböznek az átlagos PLC nyúlásoktól. Ezért egyszerűbb értékelési módként az $\epsilon_{PLC} \approx \epsilon_{MAX} - \epsilon_{AVG}$ képlet is használható.

A (16) összefüggéssel értelmezett lokális inhomogenitási mértéket a [43] irodalom

lágycélokra egy kiválasztott átlag nyúláshoz rendeli hozzá. A teljes nyúlás tartományra kiterjesztett mérések azt igazolták, hogy sokkal stabilabb, a lemezanyagra jobban jellemző mérőszám nyerhető, ha az értékelés a 4.36.b. ábra szerinti maximális és minimális nyúlásokra is kiterjed a teljes átlagnyúlás tartományban. Egyszerű számítással igazolható, hogy a Λ egyenletlenségi mérőszám a két meredekség különbségével egyenlő, azaz $\Lambda = \Delta m = m_{\max} - m_{\min}$. Technikailag ez úgy számítható, hogy a pontok közelítő egyenesének egyenletét kell képezni az origón átmenő egyenesre, és a meredekségek különbsége adja a Λ -t.



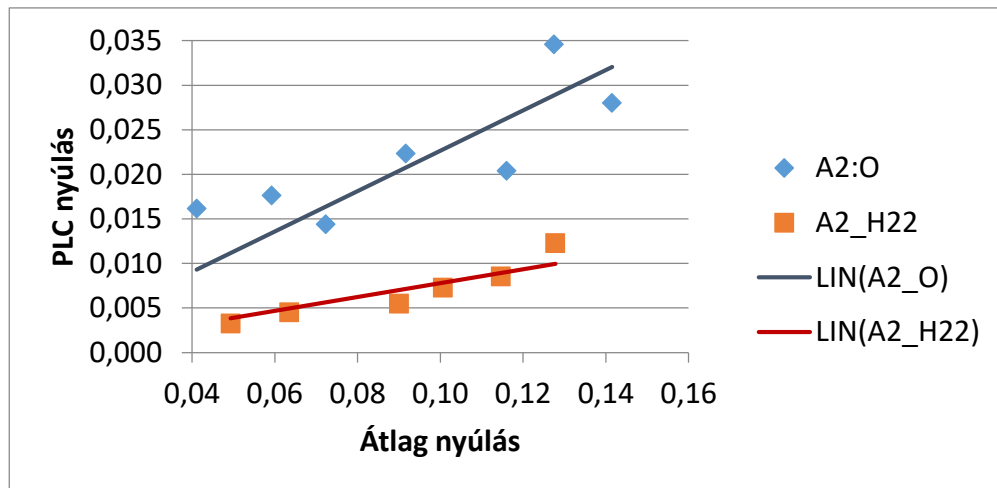
a)



b)

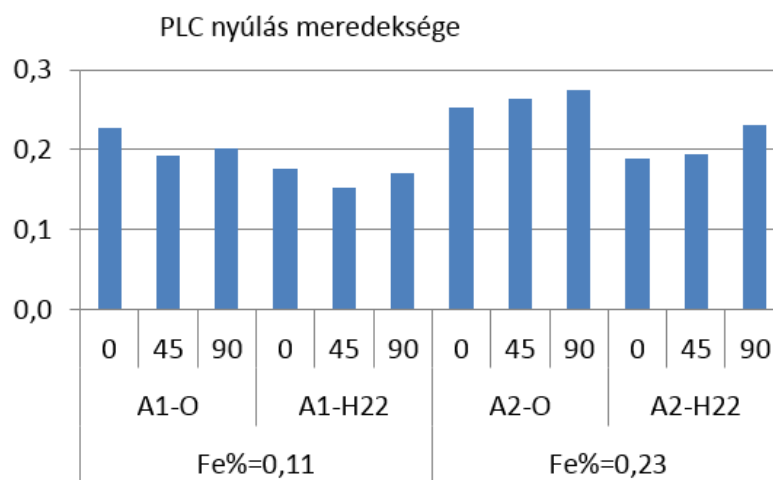
4.36. ábra. Jellegetes nyúlások az átlagnyúlás függvényében.
a) maximális nyúlások ábrázolása; b) maximális és minimális nyúlások kapcsolata

A PLC nyúlásokat a 4.37. ábra szemlélteti, az irodalommal összhangban ezek is növekednek az átlagnyúlás függvényében, és a lágyított lemez PLC nyúlása magasabban halad a hidegen alakítottéhoz képest. A Λ értékhez hasonlóan a közelítő egyenes meredeksége a lemez teljes tartományban értékelhető viselkedésére lesz jellemző a PLC nyúlás esetében is.



4.37. ábra. PLC nyúlások az átlagnyúlás függvényében

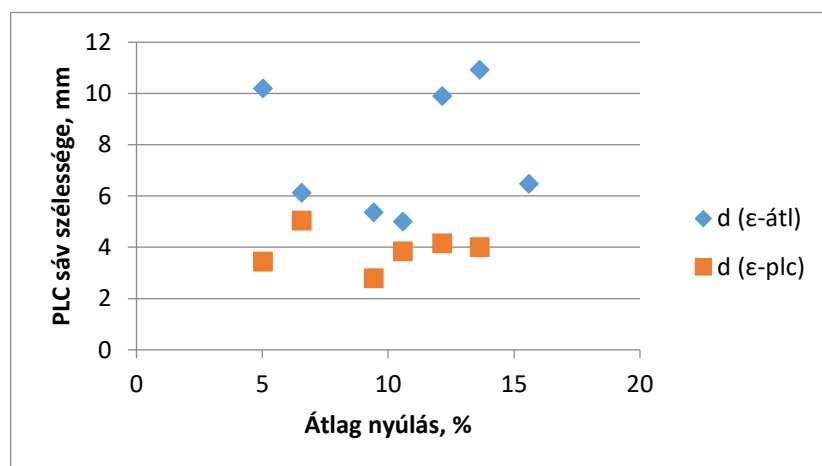
Két eltérő tulajdonságú AlMg3 ötvözet jellemző inhomogenitási mérőszámait mutatja a 4.38. ábra. A PLC nyúlás értékekből számított meredekségek azt mutatják, hogy az alacsonyabb Fe-tartalmú, az irodalom szerint jobban alakítható lágyított és hidegen alakított ötvözet meredeksége, tehát az inhomogenitás mértéke kisebb, mint a nagyobb vastartalmú ötvözeté.



4.38. ábra. Különféle Fe-tartalmú lemezek lokális inhomogenitásának összehasonlítása

A 4.22. táblázat adatai szerint az A1 ötvözet 0,11% vasat tartalmaz, ezzel szemben az A2 0,23%-ot. A 4.4. pontban ismertetett fémtani vizsgálatok szerint az alacsonyabb vastartalmú változatban az intermetallikus részecskék aránya 0,51% ezzel szemben a nagyobb vastartalmúban 1,35% intermetallikus fázis van, amely egyértelműen rosszabb alakíthatósággal párosul. Ebből következik, hogy a PLC effektus által okozott inhomogenitás mértéke kapcsolatban van az alakíthatósággal. Hasonló eredményeket tartalmaz a [65] irodalom is. Továbbá az is látható az összehasonlításból, hogy az inhomogenitás mértéke kisebb a hidegen hengerelt változatoknál.

Az átlagos PLC sáv szélesség kétféle módon számítható, egyrészt azon metszések átlagából, melyeket az átlagnyúlás vonala metsz ki a nyúlásgrafikonból, másrészt egy másik, az átlagnyúlásnak a szórás értékével megnövelt vonallal való metszésekéből. A sávok szélessége nem mutat határozott tendenciát az átlagnyúlás függvényében, ahogy ezt a 4.39. ábra mutatja.



4.39. ábra. A PLC sáv szélessége az átlag nyúlás függvényében két metszővonalhoz viszonyítva

Az ábrán az is jól látható, hogy az átlagnyúlással (ϵ -átl) való metszeshossz pontok szórása lényegesen nagyobb, mint az ábrán (ϵ -plc)-vel jelölt, az átlag felett $+\sigma$ -val húzott vonallal alkotott metszések hossza. A metszések átlagát képezve az 5-15% nyúlás tartományban az első módszer szerint az átlag szélességre 7,71 mm, míg a második módszer szerint 3,88 mm adódik.

A nyúlásgrafikonokat tanulmányozva megállapítható, hogy az átlagnyúlás vonalával való metszés ad realisabb eredményt, és ez van összhangban a színkálával szemléltetett képekkel is – annak ellenére, hogy ennek nagyobb a szórása. A

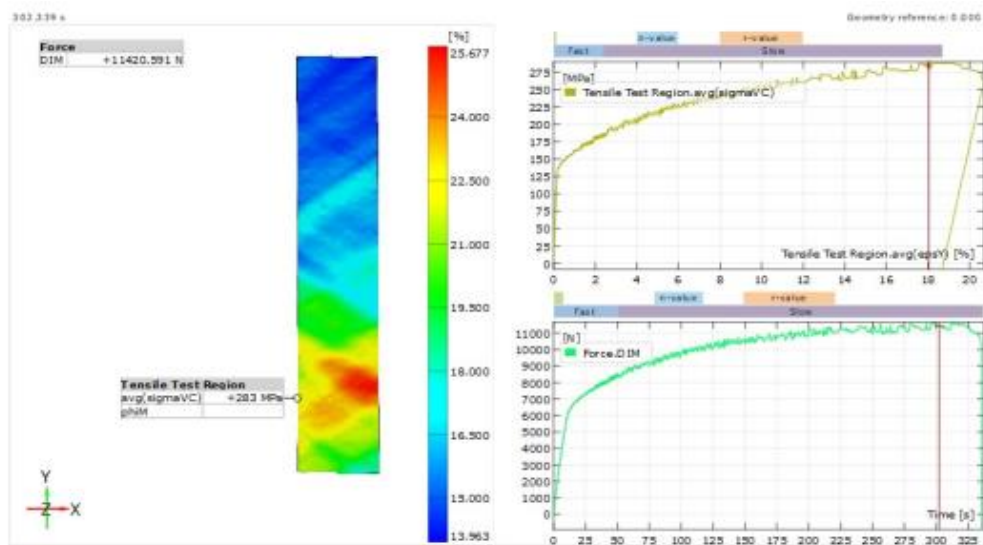
sávszélesség szórását az okozza, hogy a próbatest hossza mentén a PLC sávok a keletkezés és növekedés különböző fázisaiban vannak, ezért azok mérete és nyúlás maximuma is különbözik. További tényezőként figyelembe kell venni, hogy az alakítás kezdetén A típusú feszültséglengések jelentkeznek a szakítódiagramon, melyek később B típusúba mennek át, ezért az általuk okozott nyúlásképek is változhatnak.

4.3.2. A diffúz és lokális kontrakció határának kutatása

A diffúz és a lokális kontrakció a lemezanyagok alakíthatóságának jellemzése szempontjából fontos, így ebben az alfejezetben ezen vizsgálatokat ismertetem.

Vizsgálati anyag és módszer

A kísérleti lemez A2 jelű 2,5 mm vastag negyedkemény AlMg3 ötvözet (AA5754_H22), melynek fő ötvözőit a 4.22. táblázat mutatja A szakító próbatestek szélessége 20 mm, jeltávja 80 mm volt, melyeket a hengerlési irányhoz képest 0, 45 és 90°-os szögben munkálták ki. A vizsgálatok 100 kN méréshatárú Instron 5582 szakítógéppel készültek $2 \cdot 10^{-3}$ 1/s nyúlássebességgel, és a szakítóvizsgálat során helyi alakváltozás mérés is történt a GOM Aramis 5M hardver-szoftver rendszerrel a próbatestre előzetesen felvitt véletlen mintázat segítségével. A GOM Aramis szoftver alkalmazásával lettek meghatározva a helyi nyúlások. A vizsgálat során 1 s-ként készültek felvételek, melyek az összetartozó átlagnyúlás-feszültség, idő-erő diagramokat és a próbatest lokális alakváltozásait mutatják (4.40. ábra).



4.40. ábra. Jellegetes mérési eredmény

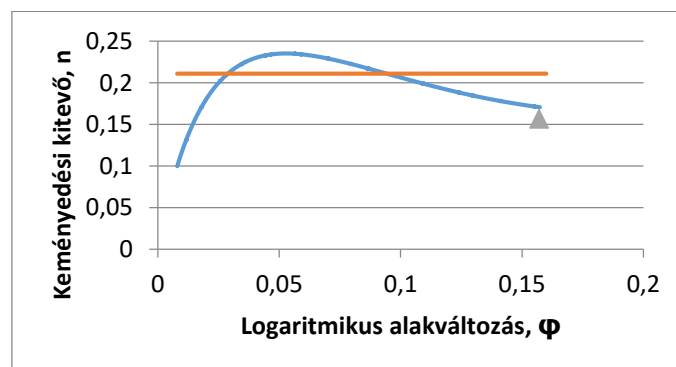
A GOM szoftver a helyi alakváltozások széles választékának meghatározására

alkalmas, a hossz- kereszt- és vastagságirányú nyúlás mellett az egyenértékű (Mises) nyúlást is tudja ábrázolni, valamint az egyenértékű (Mises) feszültséget. Fontos megjegyezni, hogy a próbatest hosszváltozását a mérnöki nyúlással jellemzik a diagramok, viszont a Mises nyúlást logaritmikus nyúlásként számítja a szoftver. Ennek értékét vagy dimenzió nélküli számként, vagy százalékosan adja meg, a diagramokban mindkét használat előfordul. A mérési eredményként feltüntetett nyúlások mind az egyenértékű (Mises) nyúlásként vannak értelmezve.

Eredmények

A kontrakció időbeli folyamatának elemzése

A digitális úton rögzített szakítóvizsgálati eredmények és az idő paraméter alapján az átlagnyúláshoz rendelhető képi információk együttesen szolgálnak a diffúz és lokális kontrakció jellegének tanulmányozására. Elsőként annak elemzésére kerül sor, hogy a vizsgált anyag hogyan követi az (1) és (2) egyenlet szerinti összefüggéseket. A diffúz kontrakció kezdetét jelentő $\varepsilon_D = n$ képlet helyességének elemzése érdekében azt kell meghatározni, hogy a folyási görbéből származtatható keményedési kitevő milyen értékét kell figyelembe venni az egyenletben. A vonatkozó szabvány a 4-6%, 10-15% és a 2-(Ag-1)% nyúláshatárok közötti értékeket tekint meghatározónak. Ugyanakkor például a [31] irodalom is hivatkozik arra a megállapításra, hogy a keményedési kitevő az alakváltozás függvényében változik, 4-5% nyúlástól az $n = n_0 - p\varepsilon$ egyenlőséggel írható le a kapcsolat. Példaként a hengerlési irányban kivett szakító próbatest folyási görbéjéből számított összefüggést mutat a 4.41. ábra. Az ábrán a vízszintes vonal a Ludwik-féle közelítés $n = 0,211$ értékét mutatja, a kék vonal a folyási görbe Voce féle közelítéséből számított n értékeket, a háromszög pedig az egyenletes nyúlás határán mért pontot jelzi.



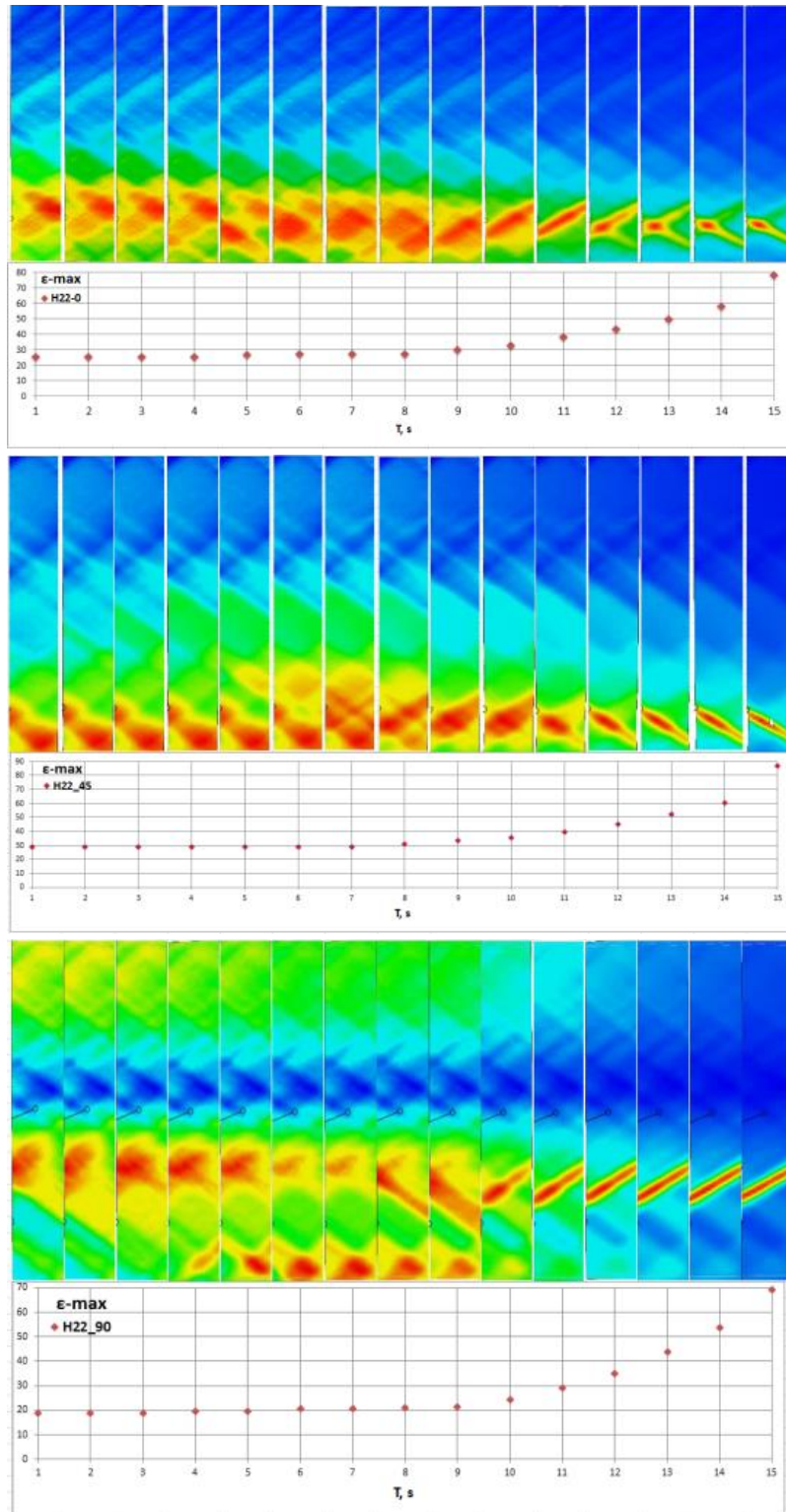
4.41. ábra. A keményedési kitevő változása a nyúlás függvényében

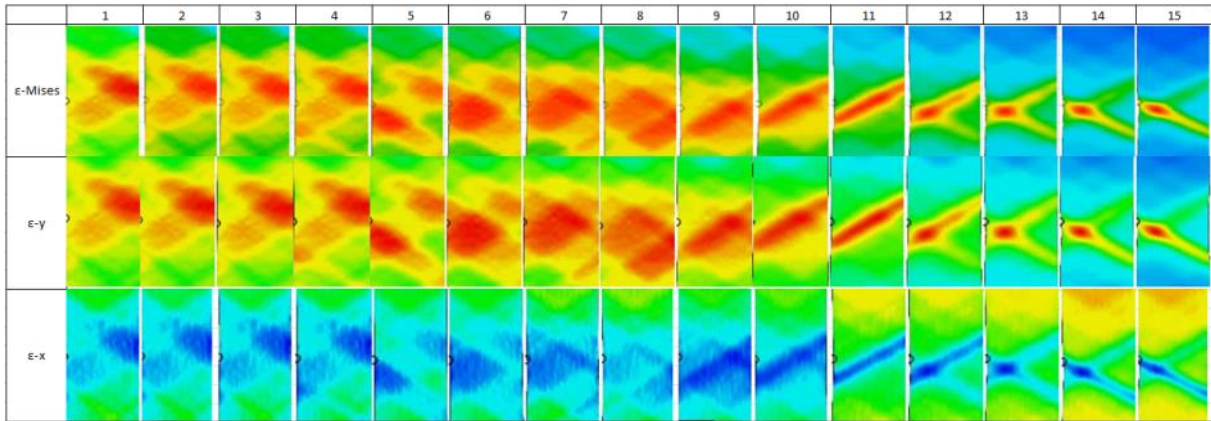
Az ábrából látható, hogy a Voce közelítésből származtatott keményedési kitevő eső szakasza jól közelíthető a [31] irodalom szerinti egyenessel, a teljes görbe lefutása pedig hasonló például az [29] irodalomban található függvényekhez. A zöld pont helyzete azt mutatja, hogy a keményedési kitevő helyi értéke $\sim 10\%$ -al nagyobb, mint az ε_D , tehát csak közelítően teljesül az $\varepsilon_D = n$ összefüggés. Ugyanakkor például a Ludwik-féle illesztésből a teljes görbére számított, vagy a korábban felsorolt határok között értelmezett keményedési kitevők sokkal jobban eltérnek az ε_D -tól. Tekintettel arra, hogy a szakadáskor mért logaritmusos nyúlások 0,2 körüli értékek, az $\varepsilon_D = 2n$ összefüggés teljesülése számításba sem jöhet. Ezért a diffúz és lokális kontrakció kijelölésére a vizsgált alumíniumötvözeteknél más megoldást kell keresni. Erre a továbbiakban bemutatott DIC technika eredményei lehetnek alkalmasak.

A 4.42. ábra felső képei a szakadás előtti, 1 másodpercenként mintavételezett 15 nyúlás eloszlást mutatják a hengerlési irányhoz képest 0-45-90°-os irányban kivett próbatesteken mérve, a képek alatt látható grafikon pedig az alakváltozás térképen mért maximális egyenértékű nyúlást szemlélteti. Az alsó képsorozat a Mises-féle egyenértékű nyúláson kívül mutatja a tengelyirányú ε -y és a keresztirányú ε -x nyúlást is. A Mises és az y irányú nyúláseloszlás gyakorlatilag azonos, és a keresztirányú nyúláskép is követi az intenzív alakváltozási zóna alakját. Megjegyzendő, hogy az ábrákon a színskála a tömörebb ábrázolás érdekében hiányzik, természetesen a 4.40. ábrához hasonlóan a mérésekből mindezek rendelkezésre állnak. A dinamikus színskálázás miatt a piros szín minden esetben a maximális nyúlás helyét mutatja, ennek értéke a színes ábrák alatti grafikonból megbecsülhető.

A képsorozat egyértelműen mutatja a diffúz kontrakció terjedését az 1-8 képeken, miközben a maximális nyúlás a kontrakciós zónában alig emelkedik, tehát az alakváltozás növekmény egyértelműen a zóna terjedésében nyilvánul meg. Külön érdekessége a 90°-os képsornak, hogy ennél két helyen is kialakul diffúz kontrakciós zóna, majd az alsó zóna a lokális kontrakció megjelenésekor eltűnik. A diffúz és lokális kontrakció közötti átmenet a 9-10 képeken jelentkezik, ekkor indul meg a maximális nyúlás növekedése is. Az utolsó képek (11-15) egyértelműen mutatják az erőteljes lokalizációt, a nyírási sáv kialakulásával a maximális alakváltozás intenzíven emelkedik. A 0°-os próbánál tapasztalható az az irodalomból ismert és az 5. ábrán bemutatott

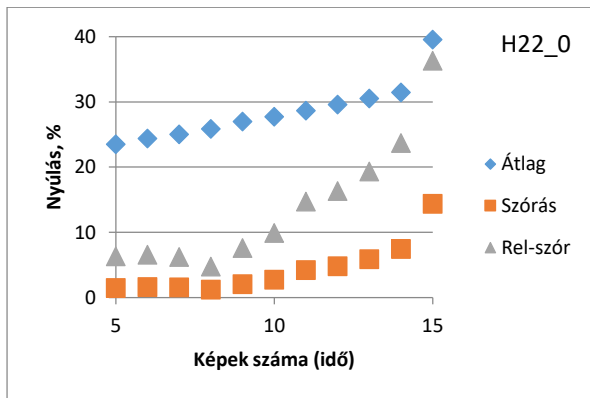
jelenség is, hogy a 12 és 13-as képeken még kétirányú intenzív alakváltozási sáv van jelen, amely a 14. képen veszi fel a szakadáshoz vezető határozott irányt. A nyírási sávok közelítően 60° -os szöget zárnak be a próbatest tengelyével, ez kissé tér el az elméleti 55° -os értéktől, de az irodalomban található a 60° -hoz hasonló mérési eredmények is.



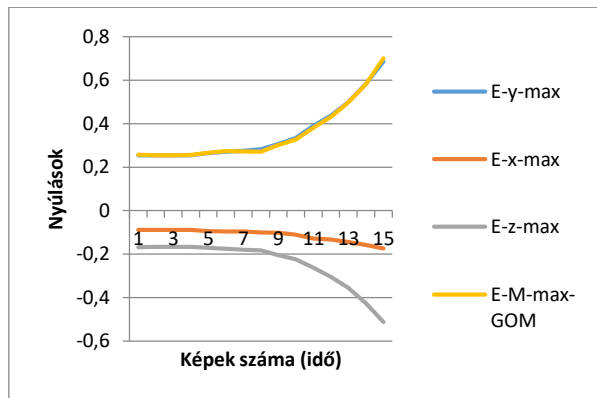


4.42. ábra. Diffúz és lokális kontrakció folyamata (a dinamikus színskálázás miatt a piros szín minden esetben a maximális nyúlás helyét mutatja)

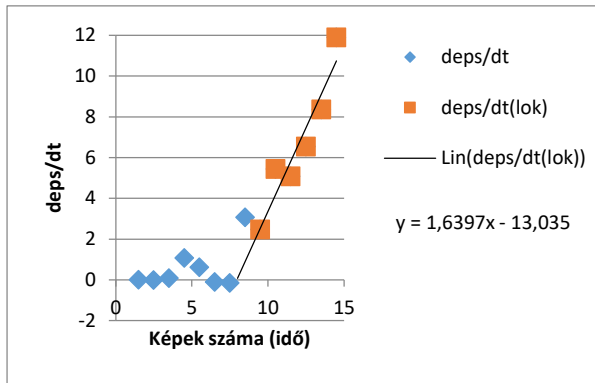
A képeket együttesen elemezve megállapítható, hogy a diffúz kontrakció a 9-es képeken következik be, és a 10. képektől kezdődik az erőteljes lokális kontrakció. A szemléletlen alapuló megállapítás számszerű igazolása a következő: a diffúz és lokális kontrakció tartománya a próbatest hosszirányában a szélesség 1-1,5-szerese. Nyilvánvaló, hogy a lokális kontrakció alakítási inhomogenitást okoz, tehát például az előző pontban ismertetett Λ alakítási inhomogenitási tényező is alkalmas lehetne ennek jellemzésére. Az előzetes számítások azt mutatták, hogy ez a pontszerű jellemző értékelhetetlen szórással jellemezné a képeket, sőt ugyanez tapasztalható akkor is, ha egyetlen hosszirányú nyúlás metszetből végzem az értékelést. Egyetlen jó megoldást az adott, ha a kontrakciós terület minél több pontját figyelembe veszem, ennek érdekében pedig a GOM Aramis szoftver által szolgáltatott 17 hosszmetsetet egy 23 mm hosszú tartományban értékelem. Itt közelítően 1400 nyúlás érték áll rendelkezésre egyenletes területi eloszlásban, amely már elég stabil átlagot, szórást és ebből számított relatív szórás értéket adott.



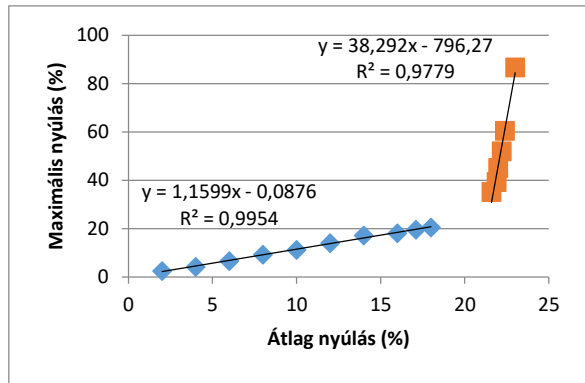
a) A képekhez rendelt nyúlások szórás paramétere



b) a nyúlások időbeli változása



c) a nyúlások idő szerinti deriváltja



d) a közelítő egyenesek ábrázolása

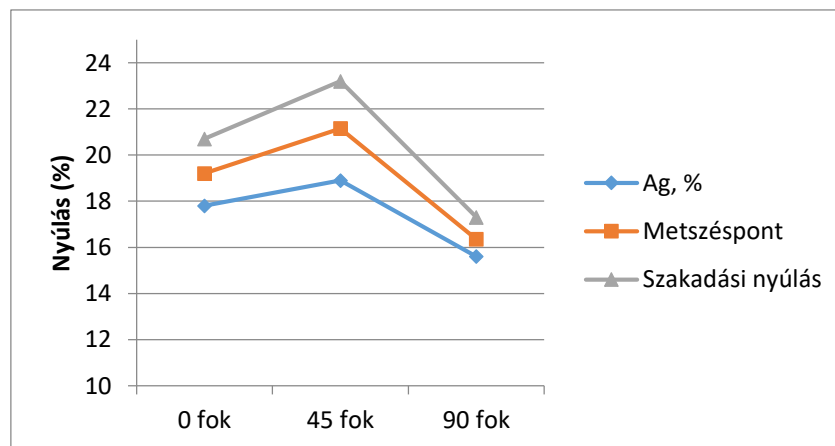
4.43. ábra. Diffúz és lokális kontrakció határának szemléltetése és számítása

A 4.43.a. ábra mutatja példaként a kapott számértékeket a 0 fokban, hasonló diagramokat mutatott a többi irány is. A relatív szórás ugrásszerű növekedése a 9. képnél indul meg, tehát ez is egy lehetséges indikátora a lokális kontrakció kezdetének. A 4.43.b. ábra az idő függvényében mutatja a nyúlásokat, ebből következtethető, hogy az y tengelyirányú nyúlás közelítően megegyezik az egyenértékű nyúlással, a vastagság irányú E-z nyúlás lefutása pedig azt igazolja, hogy a tengellyel szöget bezáró intenzív nyírási sávban jelentős a vastagságcsökkenés, és végül ez vezet töréshez. Az irodalmi összefoglalásban bemutattam, hogy elsősorban a Merklein által vezetett tudományos iskola [51] publikál a nyúlások első vagy második deriváltjain alapuló értékelési módszereket. Ennek alkalmazása a hossz- és vastagságirányú nyúlás felhasználásával lehetséges. Mivel a képek közötti időintervallum azonos, a 4.42. ábra képeihez kapcsolt egyenértékű vagy hosszirányú nyúlás numerikus deriválása egyszerűen elvégezhető. Az eredményt mutatja a 4.43.c. ábra. A lokális kontrakció zónájába eső képpontokhoz tartozó nyúlások közelítő egyenese a tengelyből egy időpontot metsz ki, mely lineáris interpolációval átlagnyúlássá számítható át, amely összehasonlítható az egyenletes és szakadási nyúlással. Az így kiszámított értékeket a 4.23. táblázat mutatja, a konkrét 0 fokban irányú szakítóvizsgálatra ez 19,30%. A 4.43.d. ábra a szakítás folyamatához rendelt átlagnyúlás függvényében tartalmazza a maximális nyúlás jellemző értékeit a diffúz és lokális kontrakció állandósult szakaszára. A két szakasz közötti átmenet pontjait kihagyva egyenesek illeszthetők mindegyik pontsorra. Az illesztés során egyre több pontot kell felvenni a közelítő egyenes számításához, és közben ellenőrizni a regressziós együttható négyzetét. Amikor az együttható értéke csökkenni kezd, ott kell

elfogadni a számításba vehető pontok számát. Ezután a két egyenes egyenletéből meghatározható a metszésponthez tartozó átlagnyúlás, amely egyben a diffúz és lokális kontrakció határa. A konkrét esetben a felírt két egyenes metszéspontjából meghatározott, nyúlás 19,36%, amely jól egyezik a derivált függvényből kapott 19,30%-kal. Logikájában ez a közelítés hasonló az [51] irodalomban közölt megoldáshoz, csak más paraméterek felvételével. Előnye viszont az, hogy közvetlenül a mért adatokból szolgáltatja a megoldást, és a 4.23. táblázatban közölt összehasonlítás szerint közel azonos az idő szerinti deriválásból kapott értékekkel. Az így kapott határpontokat az átlag- és maximális nyúlásokból számított értékekre a 4.44. ábra szemlélteti. Véleményem szerint ez a nyúlásokon alapuló értékelés realisabb eredményt ad, mert a derivált függvény bizonytalanságait nem hordozza magában, és legalább olyan karakterisztikus elkülönülést mutatnak a pontok, mint a derivált függvénynél. Megjegyezhető továbbá, hogy a 4.43.a. ábrán bemutatott relatív szórás függvény is alkalmas lehet a diffúz és lokális kontrakció határának kijelölésére.

Hengerlési iránnyal bezárt szög	0°	45°	90°
Egyenletes nyúlás (A_g %)	17,8	18,9	15,6
Derivált függvényből számított lok. kontr. nyúlás, %	19,30	20,98	16,10
Átlag- és maximális nyúlásból számított lok. kontr. nyúlás, %	19,36	21,15	16,35
Szakadási nyúlás (A_{80} %)	20,7	23,2	17,3
Maximális helyi alakváltozás, %	70,0	86,7	69,2
Szakadási pont aránya	0,54	0,59	0,44
Diffúziós kontrakció végére jellemző kép	9	9	9
Lokalizált kontrakció kezdetének képe	10	10	10
Nyúlás a lokális kontrakció megindulásakor, %	32	33	24

4.23. táblázat: Számított és mért nyúlás értékek

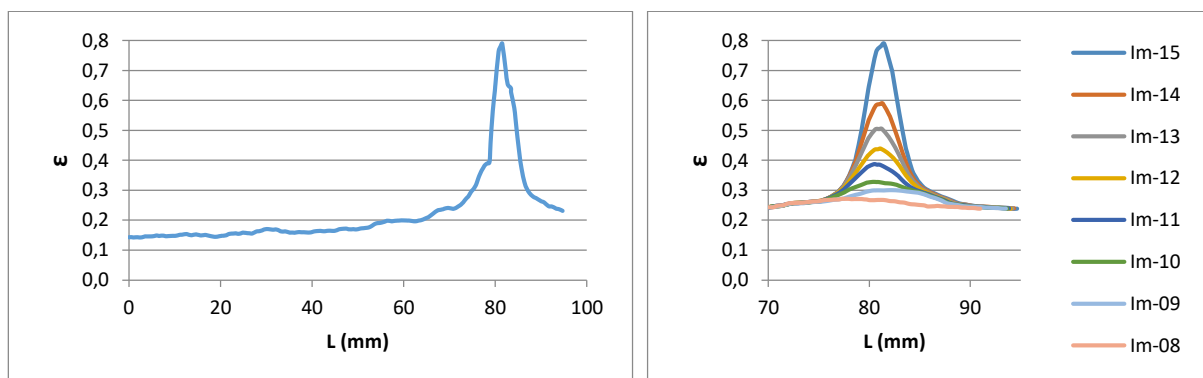


4.44. ábra. Mért nyúlások és a lokális kontrakció határa

Az ábrából látható, hogy a diffúziós zóna határa közelítően a kontrakciós szakasz közepén helyezkedik el, ahogy ezt a 4.23. táblázat számai is mutatják. A számított metszéspont és a képi jellemzők is összhangban vannak, mert a képekhez rendelt átlagnyúlás jól egyezik a számított nyúlással. Ezek ismeretében a lokális kontrakció kezdetekor mérhető maximális nyúlás is meghatározható, ezt mutatja a 4.23. táblázat utolsó sora. A bemutatott módszer egy időfüggő értékelési eljárás, mivel az egymás után következő képek és az idő függvényében mért mennyiségek alapján határozza meg a lokális kontrakció helyét, valamint az ott fellépő mértékadó alakváltozást.

A képi információk a próbatest hossz tengelyével párhuzamos metszetek felvételével és a lokális alakváltozások ábrázolásával számszerűsíthetők. Ezt mutatja a 4.45. ábra, melynek bal oldali képén a 0°-os irányhoz tartozó próbatest alakváltozása látható a teljes hosszon, a jobb oldali ábrán pedig a 4.42. ábrán azonosított képekhez rendelhető alakváltozás görbék vannak feltüntetve a szakadás környezetéből felvéve.

Látható, hogy a diffúz kontrakció befejeződésekor a lokális nyúlás az Im-08-as képen kezd kiemelkedni az átlagnyúlásból, de a platója közel vízszintes. Az Im-09 és Im-10 görbék mutatnak határozottabb emelkedést, majd az Im-11-es képtől indul meg az erőteljes lokalizálódás, melyet az összerajzolt diagramok jól szemléltetnek. Hasonló görbesereget mutat be a [38] irodalom is, ezt a 2.23. ábra szemléltette. Az itt bemutatott mérésekből ugyanaz a következtetés vonható le, mint a 4.42. ábra szerinti képi információból és számításból, vagyis a lokális kontrakció a 9. képtől jelenik meg, mértéke erről a diagramról is leolvasható.

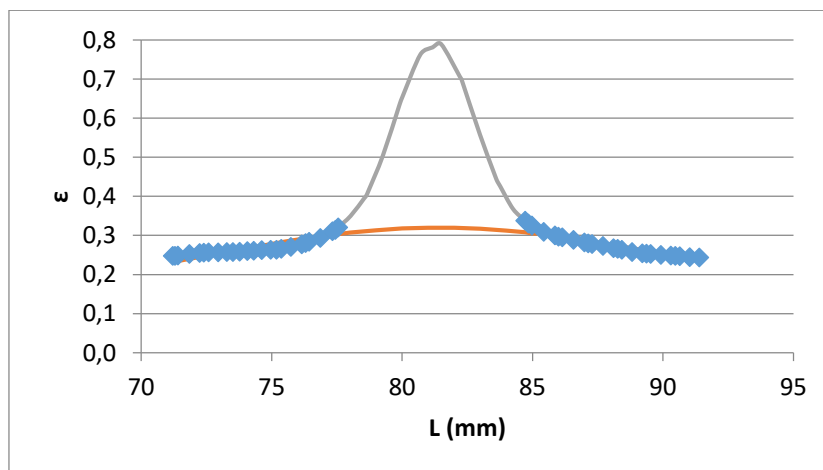


4.45. ábra. Alakváltozás eloszlás a próbatest hossz tengelye mentén

A kontrakciós jellemzők elemzése a szakadás előtti nyúláseloszlásból

A szakadás előtti utolsó, 15 számú felvétel lehetőséget nyújt az időtől független (time independent) értékelésre is, hasonlóan a Nakazima teszthez javasolt ISO 12004-2-2009 szabvány szerinti eljáráshoz. A szabványt követve adott technika szerint ki kell jelölni a felvett metszethossz-alakváltozás görbén egy bal- és jobboldali illesztő ablakot (fit window), melynek belső pontjait az alakváltozás függvény második deriváltjának maximumai adják, szélességét pedig egy tapasztalati képlet szolgáltatja. Ezután a mért pontokra egy $f(L)=1/(aL^2+bL+c)$ függvényt illesztve a szakadási pozícióban mért függvényérték adja a lokális kontrakció kezdetére jellemző alakváltozást.

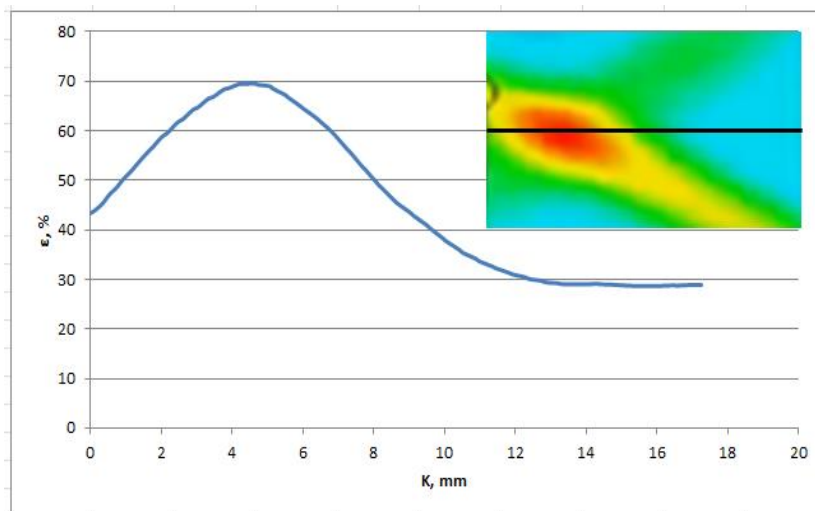
Ezt szemlélteti a szakítóvizsgálat során felvett 15. kép nyúláseloszlására a 4.46. ábrán, amely mutatja az eredeti lokális alakváltozás függvényt, az illesztő ablak pontjait és a pontokra illesztett inverz parabolát. Az illesztett függvény maximuma a hengerlés irányú próbatest esetében 0,32, azaz 32% nyúlás, amely megegyezik a 4.23. táblázat utolsó sorában feltüntetett értékkel. Hasonlóan a 45°-os és 90°-os irányú próbákra elvégzett értékelés eredményei is jól közelítik a korábban meghatározott értékeket, tehát a kontrakciós folyamat időbeli változásán alapuló és az utolsó nyúláseloszlásra kidolgozott eljárás közel azonos eredményt szolgáltatott.



4.46. ábra. A lokális kontrakció mértékének meghatározása az ISO 12004-2-2009 szabvány szerint

Az itt felismert összefüggésekre alapozva közelítő eljárás határozható meg a szakítóvizsgálat eredményeiből a diffúz és lokális kontrakció határának számítására. Ehhez a kontrakció kezdetén és végén mért alakváltozás ismeretére van szükség. A

kezdeti logaritmikus alakváltozás az A_g -ből számítható, a szakadáskor jelentkező pedig a tört keresztmetszet méréséből. A két szélső értékből arányosítással becsülhető a lokális kontrakció kezdetén fellépő alakváltozás. Jelen kutatás során a próbatest szakadási keresztmetszetét szintén DIC technikával lehetett számítani a rendelkezésre álló információkból. Ehhez a 21 ábrán látható hosszmetsetekhez hasonlóan a keresztirányú nyúlás eloszlásra van szükség. Ez a 4.47. ábrán látható, ahol az ábra együtt mutatja a nyúlás térképet és a bejelölt metszet alakváltozását.



4.47. ábra. Nyúlás eloszlás a kontrahált zóna keresztmetszetében

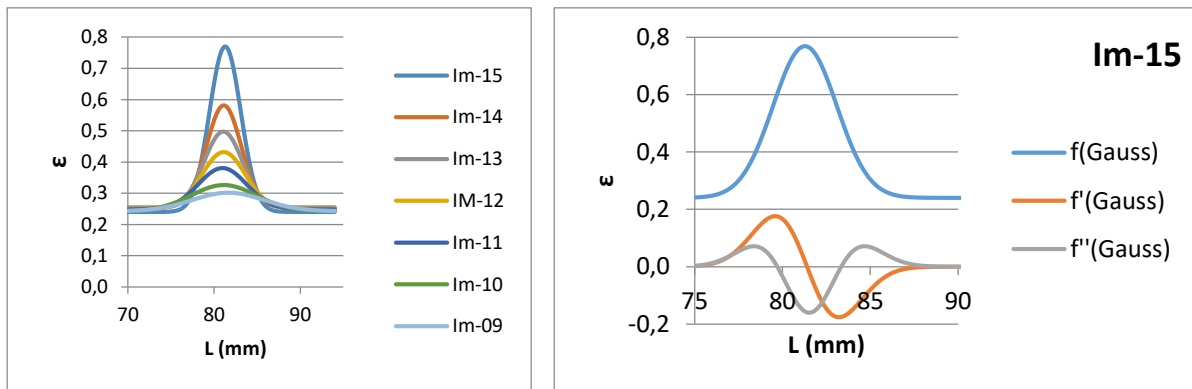
A helyi nyúlások átlaga 43,3%, ez tekinthető a keresztmetszet csökkenés mértékének. Az egyenletes alakváltozás határán mért alakváltozás 16%, e két szélső értékből arányosítással lehet meghatározni a határalakváltozást. Az 1. táblázat szerint a szakadási pont aránya közelítően 0,5, ezzel 33,15% lenne a nyúlás mértéke. Az átlagnyúlás aránnyal számolva 31,8% adódik, az időarányos közelítéssel pedig 32,4%. Ezek jól közelítik a 4.23. táblázatban szereplő 32%-ot, tehát a becslés elfogadható.

A bemutatott hosszmetsetek számszerű eredményei az értékelés bizonyos egyszerűsítésére és a kialakuló lokális kontrakció további jellemzésére is lehetőséget kínálnak. A függvények alakját tanulmányozva látszik, hogy a kapott mérési eredmények jól közelíthetők a (17) egyenlet szerinti 4 paraméteres Gauss-függvénnyel.

$$f(L) = y_0 + A \cdot \frac{2}{w} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{L-L_c}{w}\right)^2\right) \quad (17)$$

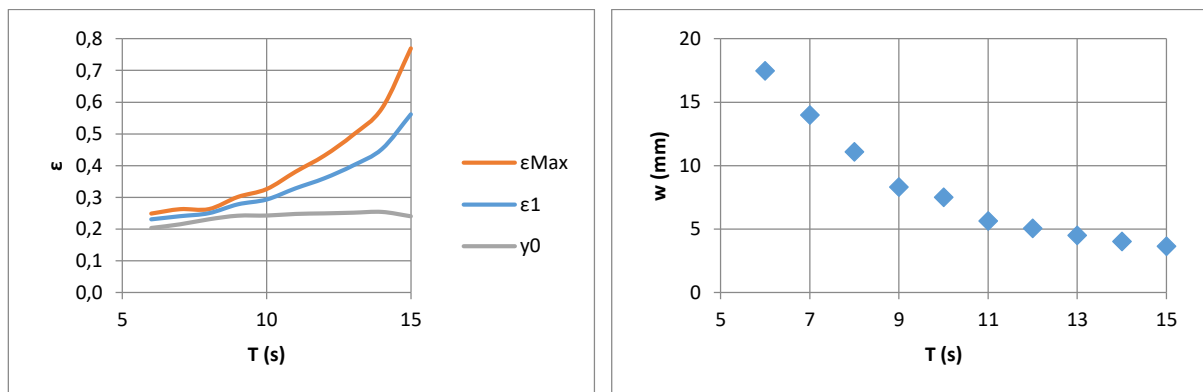
A képletben A az amplitúdó, L_c a függvény középpontja, w az inflexiók pontoknál mért szélesség, y_0 pedig a függőleges eltolás paraméter. A számított közelítő

függvényeket néhány időpontra a 4.48. ábra bal oldali képe mutatja, a jobb oldali grafikon pedig a Gauss-görbe első és második deriváltját. Például a második derivált maximumának helykoordinátái, amelyek az illesztési ablak középső pontjait szolgáltatják, nagyon jó egyezést mutatnak az ISO szabvány szerinti parabolikus közelítéssel meghatározott L-koordinátákkal, és számításuk sokkal megbízhatóbb, mint a nagy szórású mérési eredményeké.



4.48. ábra. A lokális alakváltozás közelítése Gauss-függvénnyel

A Gauss-féle közelítő függvények együtthatói és a képek időparaméterei között fennálló néhány összefüggést mutat a 4.49. ábra.



4.49. ábra. A Gauss-függvény együtthatóinak változása

Ebből számszerűen is látszik a maximális és az inflexiós ponthoz tartozó nyúlás (ϵ_1) növekedése, valamint az, hogy az eltolási együttható közel állandó, tehát a diffúz alakváltozás mértéke az idő függvényében nem nő, hanem csak a lokalizációs sávban van erőteljes emelkedés. Ugyanakkor az inflexiós pontok w távolsága erőteljesen csökken az idő függvényében, amely szintén a lokalizálódásra jellemző.

4.3.3. Az összefüggések alkalmazása FLC felvételére

A diffúz és lokális kontrakció határának kijelölésére a szakítóvizsgálat körülményei között kidolgozott összefüggéseket az alakíthatósági határgörbe (FLC) felvétele során ellenőriztem. A vizsgálat célja a Gauss-függvénnyel való közelítés alkalmazhatóságának elemzése volt.

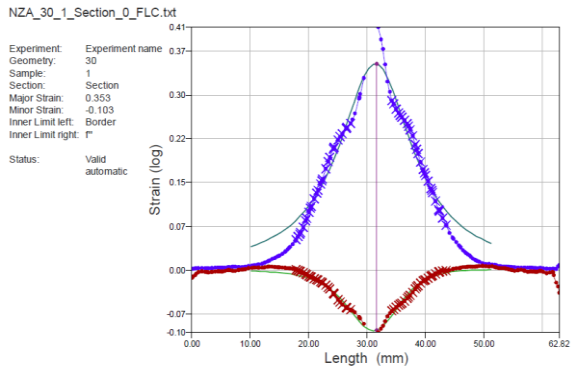
A vizsgálatokhoz 37,5 mm átmérőjű bélyeggel végeztem Nakazima tesztet a 100 mm-es bélyeghez rendelt 30-200 mm-rel arányos szélesség tartományban, emellett a 60-90 mm tartományon belül közbenső értékek felvételére is sor került. A próbatestek 37,5 mm-es bélyeghez illesztett szélességei a következők voltak: 12-23-34-46-56-65-100 mm és 26-30-37 mm, amik a kiegészített tartomány arányosított mintái voltak. A Nakazima és az Erichsen vizsgálatok esetében a mérés során törekedni kell a súrlódási tényező alacsony értéken történő tartására. Erre az értekezés készítése során sikerült egy optimális rétegrendet kidolgozni és ezt alkalmaztam is a vizsgálatoknál. Használatával a Nakazima-teszt értékelését erősen zavaró kettős maximumú nyúlásgörbék nem jelennek meg, ami a kenés jóságára utal, ezt a dolgozatban bemutatott mérési eredmények is igazolnak. A rétegrend a következő volt (a bélyegtől a lemez felé haladva):

1. Fehérzsír spray vékony rétegben
2. 0,1mm vastagságú teflon fólia
3. grafitos zsír és olaj keveréke (ADD20 MOL mélyhúzóolaj)
4. 0,1mm vastagságú teflon fólia
5. teflon spray vékony rétegben

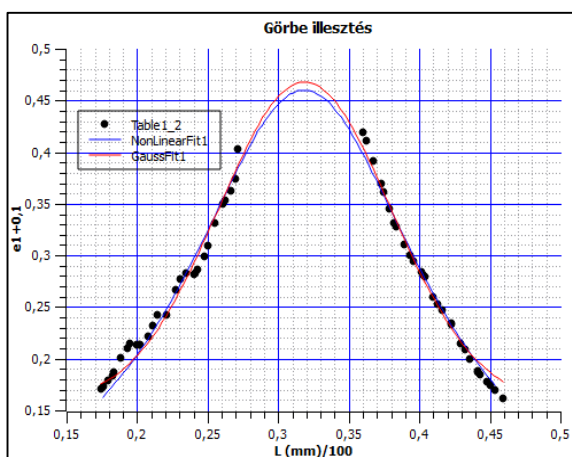
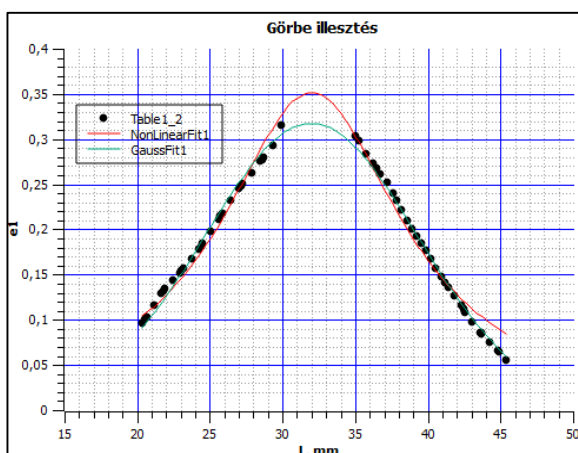
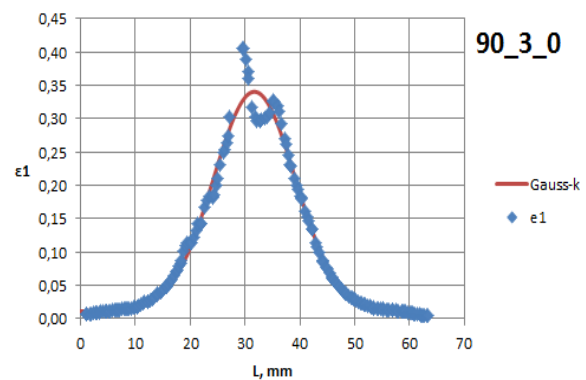
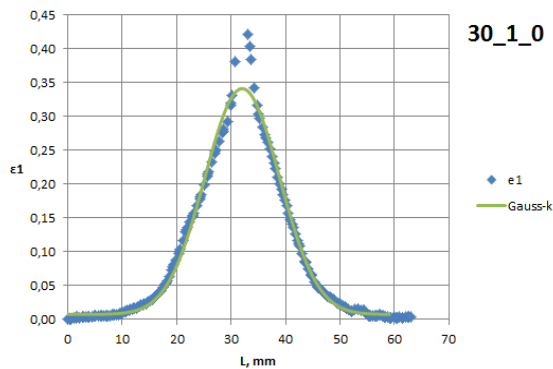
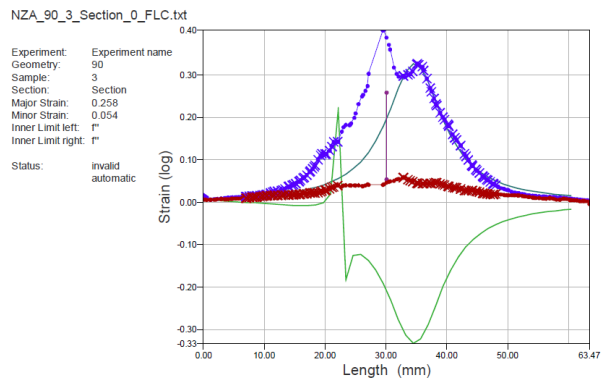
A 4.50. ábra két tipikus mérési adatra mutatja az automatikus értékelés problematikáját. Az AA5754_E20 lemez eredményeiből egy „szabályos” (30_1_0, 175_1_2) és egy „rendellenes” (90_3_0; 200_1_1) nyúlásképet emeltem ki összehasonlítás céljából. Az eredeti GOM diagramokat a 4.50. ábra felső képei mutatják. A 30-as és 175-ös metszeten az illesztő ablak kijelölése és az illesztési tartomány meghatározása egyértelmű. A 90-es metszet képe viszont jól szemlélteti, hogy a mérési pontok két maximumot mutatnak, ezért az értékelés során a GOM a jobb oldali mérési pontokra támaszkodott az inverz parabola illesztésekor, viszont a mértékadó ϵ_1 értéket a szakadáshoz tartozó L koordináta mentén metszette ki, ezért

adódott a 0,258-as érték. A 200-as próba GOM értékelése teljesen téves, itt az ϵ_2 nyúlásra nagy negatív érték jön ki a biaxiális ponthoz közel. A középső ábrák a mért nyúlások Gauss-függvénnyel való közelítését mutatják (30 és 90 metszet). Ezekből látható, hogy a GOM értékeléssel ellentétben az automatikus illesztéskor mindkét görbeágot figyelembe vettem a 30-as és 90-es metszetenél egyaránt.

30_1_0 metszet



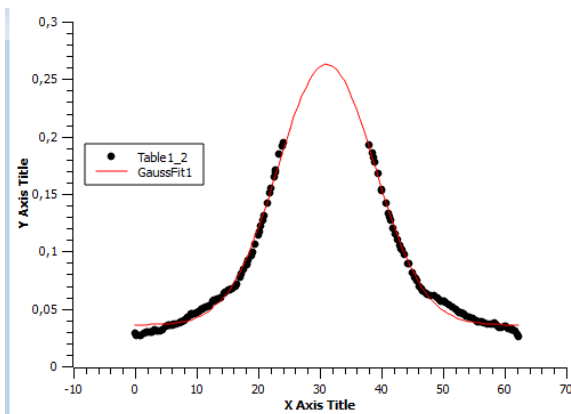
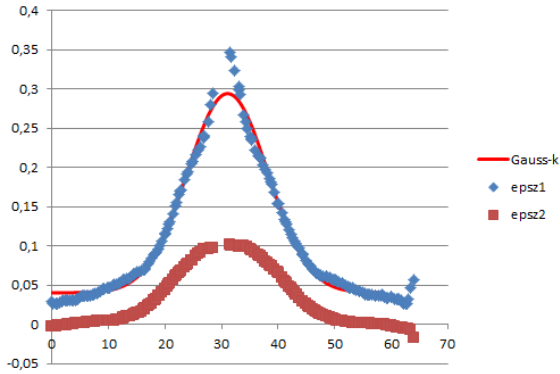
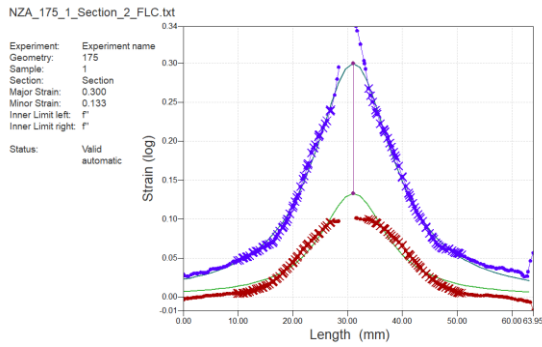
90_3_0 metszet



GOM-IP	GA-MAX	GA-FW	IP-FW
0,353	0,341	0,319	0,351

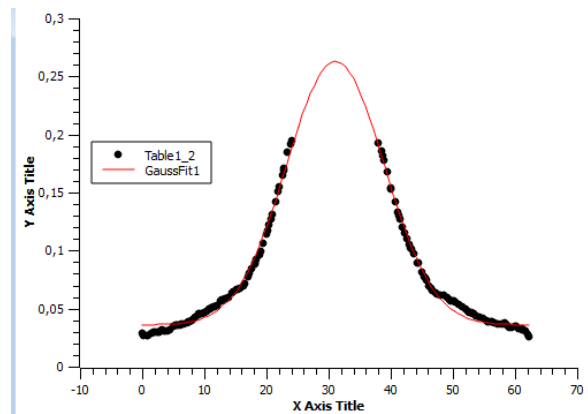
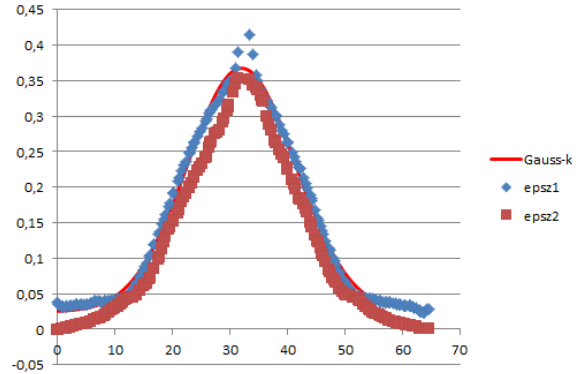
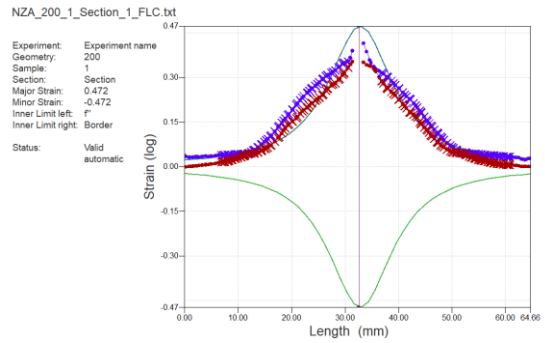
GOM-IP	GA-MAX	GA-FW	IP-FW
0,258	0,340	0,369	0,361

175_1_2 metszet



GOM-IP	GA-MAX	GA-FW	IP-FW
0,300	0,294	0,263	0,308

200_1_1 metszet



GOM-IP	GA-MAX	GA-FW	IP-FW
0,472	0,368	0,360	0,392

4.50. ábra. FLC pontok meghatározásának összehasonlítása

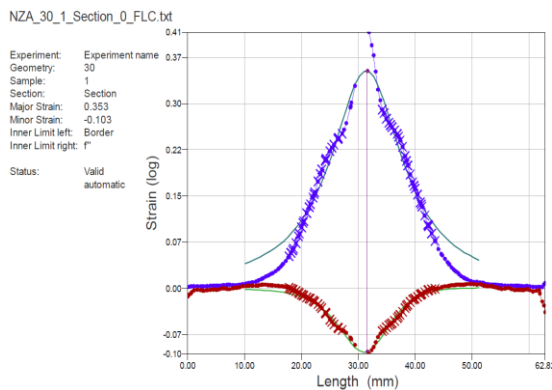
(Jelek: GOM-IP: GOM inverz parabolaillesztés; GA-MAX: Gauss függvény illesztés az összes mérési pontra; GA-FW és IP-FW: Gauss és inverz parabola illesztés a fit window értékekre)

A nyúlásmetszetek esetében a Gauss-függvénnyel való közelítés az illesztő ablak belső pontjainak meghatározására kínál egy viszonylag egyszerű megoldást a 3 vagy 5 mérési pontra illeszkedő parabolikus közelítés helyett, amelyet a függvény második deriváltjának számítására ajánl az ISO-12004 szabvány. Ugyanis az illesztő

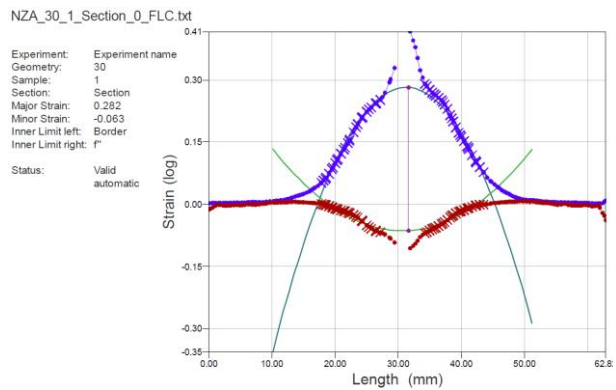
függvénynek a mérési pontoktól való elválása jelzi a lokális kontrakcióhoz tartozó nyúlások kezdetét, így ebből kiválaszthatók a maximális görbülethez tartozó pontok. Ez a módszer az illesztő ablak belső pontjai közötti távolságra 5 mm-t ad, a GOM ábrájából ugyanez ~ 6 mm-re becsülhető. Mivel elemzéseim szerint a belső pontok közötti távolság 5-15 mm tartományban az illesztő függvény maximumát nem változtatja, az általam javasolt közelítés elfogadható. Az illesztő ablak külső pontjait a szabvány szerint vettem fel, amely közelítően 10 mm. Ezekkel a feltételekkel számítottam ki SciDavis szoftver segítségével az illesztő függvényeket inverz parabolára és Gauss függvénnyel való közelítésre. A bal oldali utolsó sor mutatja, hogy a GOM által számított 0,353-as érték jól egyezik az így kijelölt illesztő ablak inverz parabola (IP-FW) 0,351-es eredményével. A középső ábrán lévő Gauss-közelítés GA-MAX=0,341-et ad, amely mindössze 2,8%-al tér el az IP-FW értéktől, tehát első közelítésre ez is elfogadható az FLC pontjaként.

Ugyanakkor a 90-es metszet esetében ez a logika korlátozottan alkalmazható, mert a két maximumos görbe oldalsó ágai nem tekinthetők összetartozónak, emiatt az eredményeket fenntartással kell fogadni. Számítástechnikai problémát okoz az is, hogy a legtöbb függvényillesztő szoftver nehezen találja meg az inverz parabolát, és gyakran a nevező zérushelyein a végtelenbe kifutó értékeket ad. Ezért saját számításaimban az ε_1 értékeket 0,1-el meg szoktam növelni (majd ezt az eredményből levonni), és az x-y értékek azonos nagyságrendjének biztosítása miatt az L helyett annak századrészét alkalmaztam (L/100). Ezekkel a módosításokkal a számítás reális eredményeket ad, ahogy a jobb alsó ábra és az alatta lévő értéktáblázat mutatja. Az eredmények összevetéséből látszik, hogy a GOM 0,258-as nyúlás értéke irreális, a két maximum miatt az oldalsó görbeágak maximumából számított értékek pedig túlbecsülhetik a lokális kontrakció határát. Ezért megoldás lehet ilyen mérési eredményekre az, hogy a mérési pontokat két Gauss-függvényre kell bontani, és a szakadást tartalmazó függvénnyel számolni. Erre vannak irodalmi utalások, de a módszer még nem terjedt el általánosan. A bemutatott példára excel solver és Python programok segítségével végeztem számításokat a két Gauss függvény dekompozíciójára, de úgy tűnik, hogy a két függvény olyan közel esik egymáshoz, hogy egyik módszerrel sem sikerült a szétválasztás. A két görbeágot külön kezelve viszont lehetett illeszteni rájuk 4

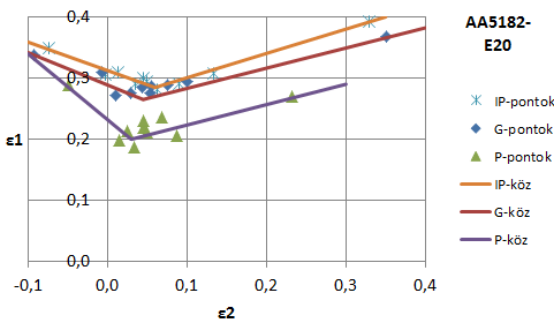
paraméteres Gauss függvényeket, és a bal oldali a szakadás helyén 0,341-es maximumot adott, a jobb oldali csúcshoz illesztett függvény pedig 0,314-et. Ez utóbbi érték jól egyezik a teljes értéktáblázatra illesztett Gauss-függvény maximumával (0,340), tehát a 90-3-0 metszet esetében is a 4.50. ábrán ajánlott módszer használata javasolható a téves GOM értékelés helyett. Hasonló megállapítások tehetők a 175-ös és 200-as metszetekre is, a 175-nél a GOM reális értéket adott, a 200-as metszetről viszont tévedett.



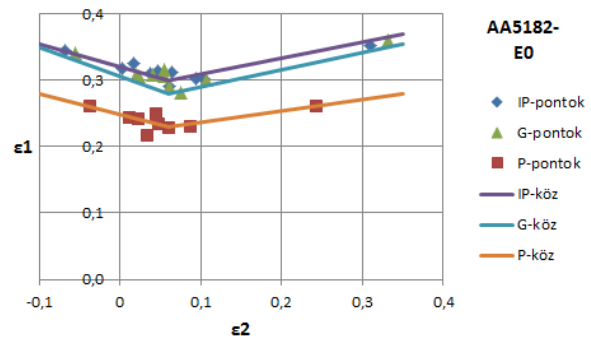
a) $\epsilon_1=0,353$ és $\epsilon_2=-0,103$



b) $\epsilon_1=0,282$ és $\epsilon_2=-0,063$



c) FLC összehasonlítás E20



d) FLC összehasonlítás E0

4.51. ábra. Parabola és inverz parabola illesztés összehasonlítása

A javasolt értékelési mód alkalmazásának indokoltságát a GOM Aramis szoftver új verziójának megjelenése is motiválta, ugyanis ennél az inverz parabola illesztés mellett a másodfokú parabola illesztés is választható opcióként. Nyilván a szoftver fejlesztőit az a tapasztalat vezette, hogy az inverz parabola illesztés a nagy szórás és az illesztő ablakok közötti adathiány miatt gyakran téves eredményre vezet. Viszont az egyszerű parabola illesztés erősen tompítja a maximális nyúlást. A 4.51. a) és b) ábra értékei között 25% eltérés van, amely az FLC használata esetében komoly hibákat okozhat a számítógépes szimulációban.

A vázolt eltérés elemzése érdekében elvégeztem a Gauss-függvény szerinti közelítésre alapozott értékelést ugyanúgy, ahogy ez a 4.50. ábra középső és alsó sorában látható. Az eredményt a 4.51.c. és d. ábra mutatja 1,5 mm vastag AA5182 lemezre. A két diagram között az a különbség, hogy a c. ábra a hengerművi kiszállítási állapotra vonatkozik, 20%-os egyengetés után vizsgálva, az E0 jelű lemez pedig egyengetés nélküli. A felső és alsó mérési pontok az inverz parabola (IP) és a sima parabola (P) szerinti értékeket tartalmazzák a GOM értékelés alapján, a G-vel jelölt pontok pedig a Gauss-közelítésen alapulnak. Látható, hogy ennek közelítő függvénye a két GOM értékelés között halad, az inverz parabola értékekhez van közelebb. Az egyengetés minimális méretű hidegalakítást jelent a lemez számára, ezért az egyengetés nélküli FLC pontok kissé magasabban helyezkednek el, mint az egyengetett lemez esetében.

Megjegyzendő, hogy az illesztő ablak helyzete és szélessége is befolyásolja az ε_1 és ε_2 számított értékét, amely még inkább indokolja számítás pontosításának igényét. További DIC vizsgálatok szükségesek ahhoz, hogy a jelenleg hatályos ISO12004-2 szabvány kiértékelési módszerét továbbfejlesszék.

A bemutatott számítás egyértelműen igazolja, hogy a kidolgozott eljárás alkalmas az FLC pontjainak meghatározására, és egyben ellenőrzési lehetőséget is kínál a szoftver által meghatározott értékekhez. Az eredményeket a [81, 82, 85, 86] publikációban tettem közzé angol illetve magyar nyelven. Az eddig elvégzett kísérletekből és azok elemzéséből a következő megállapítások tehetők:

Az egyenletes alakváltozás tartományára vonatkozó értékelés:

- Az egyenletes alakváltozás tartományában az AlMg3 próbatesteken jelentős helyi alakváltozás különbségek figyelhetők meg. Az intenzív nyúlási zónák eleinte foltszerűen jelennek meg, majd a próbatest hossz tengelyével közelítően 60o-os szöget bezáró A-típusú PLC-sávok keletkeznek. Az alakváltozás további szakaszában véletlenszerűen keletkező, döntően B-típusú PLC-sávok fordulnak elő. A PLC-sávok jellemzésére új típusú mérőszámokat dolgoztam ki, amelyek az irodalomból ismert paramétereknél realisabban jellemzik az alakváltozás folyamatát.

- Az egyenletes nyúlás tartományában a lokális alakváltozás a helyi nyúlás minimális és maximális értékével jellemezhető az időhöz vagy átlag alakváltozáshoz viszonyítva. A mérési szórás kiküszöbölése és a határok pontos kijelölése érdekében a próbatesten észlelhető pontszerű helyi alakváltozások sűrűségfüggvényét kell meghatározni, és annak $\pm 2\sigma$ tartománya tekinthető a lokális alakváltozás minimum illetve maximum értékének. Az így definiált minimum és maximum értékek az átlag nyúlás függvényében lineárisan nőnek, az egyenesek meredekségének különbsége a lemezanyag teljes szakadási folyamatára jellemző. A maximum és átlagnyúlás különbsége adja a PLC-nyúlást, míg a maximum és minimum pontokra illesztett egyenesek meredekségének különbsége az irodalomból ismert lokális alakíthatósági egyenetlenséget adja, kiterjesztve az egyenletes alakváltozás teljes tartományára. Ez a lokális alakváltozási mérőszám jellemzi az alakíthatóságot.
- Megállapítható, hogy AlMg3 ötvözeteknél az előzetes hidegalakítás mértéke, valamint az intermetallikus fázisok mennyiségének alacsonyabb szintje csökkenti a lokális egyenetlenséget.

A kontrakciós szakaszra vonatkozó megállapítások:

- A kontrakciós szakaszban a diffúz és lokális alakváltozás határának újszerű meghatározását dolgoztam ki időtől függő és független eljárásra egyaránt.
- Az időtől függő meghatározás lényege az, hogy az idő, vagy ezzel arányos átlag nyúlás függvényében ábrázolni kell a korábban definiált nyúlás minimumokat és maximumokat. A maximum görbe két szakaszra bontható, a viszonylag lapos diffúz kontrakcióra és a meredeken emelkedő lokális kontrakcióra. A két szakaszra illesztett egyenesek metszéspontja adja a diffúz és lokális kontrakció határát. Ez a határ jól egyezik az irodalomból ismert derivált görbék módszerén alapuló kiértékelések eredményeivel, de annál egyszerűbben és biztonságosabban értékelhető ki.
- Az időtől független meghatározás a szakadás előtti pillanat lokális alakváltozás függvényéből indul ki, mely a törés előtti legnagyobb alakváltozási helyen áthaladó metszési vonalon mérhető egyenértékű alakváltozást tartalmazza. A

mérési pontokra illesztett 4 paraméteres Gauss-függvény együtthatói jól jellemzik az alakváltozás befejező fázisát, kiküszöbölik a mérési szórást és pontosítható a diffúz és lokális kontrakció határához rendelt nyúlás értéke.

4.4. Az intermetallikus fázisok hatása az alakíthatóságra

Az alumíniumban található egyes ötvözők a szakirodalom alapján az intermetallikus fázisok révén fejtik ki hatásukat. Ezeknek a fázisoknak a mikroszerkezetben való jelenléte, elhelyezkedése döntően meghatározza az alakíthatóságot így ebben a fejezetben az ötvözőkkel illetve ezen ötvözők alakíthatóságra gyakorolt hatásainak vizsgálatát ismertetem.

4.4.1. Alakíthatósági vizsgálatok eredményei

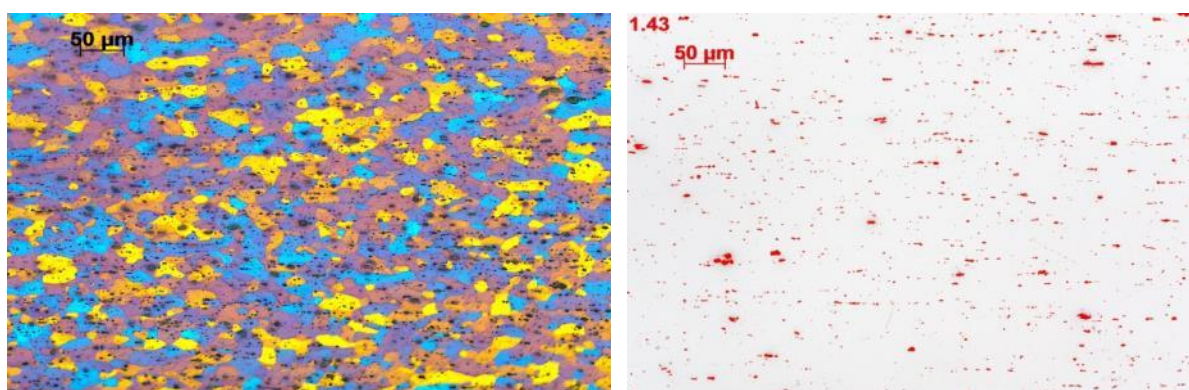
Az intermetallikus fázisok alakíthatóságra gyakorolt hatása először az AA3104 alumíniumötvözetnél merült fel ipari kutatás során, ahol két gyártótól származó lemez előírt mechanikai tulajdonságai közel azonosak voltak, viszont a gyártásban az egyik lemez lényegesen nagyobb selejtet produkált, mint a másik. Ekkor végezte el a tanszék a kvantitatív mikroszkópiai vizsgálatokat a két adag összehasonlítása érdekében. Az itt szerzett tapasztalatok kerültek alkalmazásra egy másik ipari probléma vizsgálata során, ahol különböző AA5754 jelű adagok mutattak hasonló különbségeket a konkrét alkatrészek mélyhúzósa során. A továbbiakban először az első vizsgálat eredményeit mutatom be, melyet szerzőtársakkal a [82] cikkben publikáltunk. Ezt követően több adagot vontam be a vizsgálatokba, melyek alapján kellően nagy mintán általánosítható összefüggések felismerésére jutottam.

Az első vizsgálathoz AA3104 és AA5754 jelű lemezeket használtunk, az előbbieket vastagsága 0,3 mm volt, az utóbbiaké 2,5 mm. A vékony lemezből mélyhúzott csészék készültek, az AlMg3 ötvözetből pedig komplex alakú lemezalkatrészek. Mindkét ötvözet több adagjából két-két mintát választottam az eredmények szemléltetésére, amelyek összetételben és intermetallikus részecsketartalomban különböztek. Az elemzésbe bevont lemezek fő ötvözőinek összetételét, valamint az intermetallikus fázis térfogatarányát (f%) és a részecskék 1 mm²-re eső számát (Db/mm²) a 4.24. táblázat mutatja.

		Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	f%	Db/mm ²
AA3104	A1	0,194	0,522	0,212	0,807	1,26	1,73	3011
	A2	0,201	0,448	0,170	0,827	1,17	1,40	1272
AA5754	M1	0,135	0,261	0,011	0,161	3,70	1,27	4050
	M2	0,065	0,128	0,001	0,369	3,76	0,69	1570

4.24. táblázat. A vizsgált anyagok kémiai összetétele és részecske jellemzői

A részecskék kvantitatív sztereológiai jellemzőit polírozott csiszolatokon határoztuk meg Carl Zeiss Axio Imager M1 típusú mikroszkóppal és a hozzá kapcsolt digitális képfeldolgozó rendszerrel. Előzetes vizsgálatokat végeztünk 10×-es, 20×-os és 50×-es objektívekkel, ezek összehasonlítása alapján legjellemzőbbnek a 20×-os objektívvel végzett mérést találtuk, így a közölt kvantitatív jellemzők ehhez köthetők. Az Axio Vision 4.8 értékelő szoftver minden látómezőhöz teljes adatsort közölt a részecske területekről, számokról és a Feret-átmérőkről, ezáltal különféle statisztikákat lehetett készíteni a méret szerinti eloszlásról és egyéb jellemzőkről. Ennek alkalmazását a festett mintázatok értékelésére a 4.2. pontban már részben bemutattam. Egy vizsgálat során 20 látómezőt elemeztünk, ez 7,3 mm² területet jelentett, ebből számítottuk az 1 mm²-re eső jellemzőket. Előzetesen több látómezőt mértünk és abból határoztuk meg, hogy 20 látómezőnél az átlagok már stabilizálódnak. Egy jellegzetes szövetképet és a hozzá tartozó intermetallikus részecske elrendeződést a 4.52. ábra mutat.



4.52. ábra. Szövetszerkezeti vizsgálat jellegzetes képei

A töretek Hitachi 3400 pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk és a hozzá kapcsolt Bruker EDS-elemzővel határoztuk meg a részecskék összetételét, illetve készítettük az elem térképeket. A szakítóvizsgálatokat optikai extenzométerrel felszerelt

2 kN, illetve 100 kN erőhatárú Instron szakítógépeken, a csészehúzó és Erichsen-vizsgálatokat hidraulikus lemezvizsgáló berendezésen végeztük.

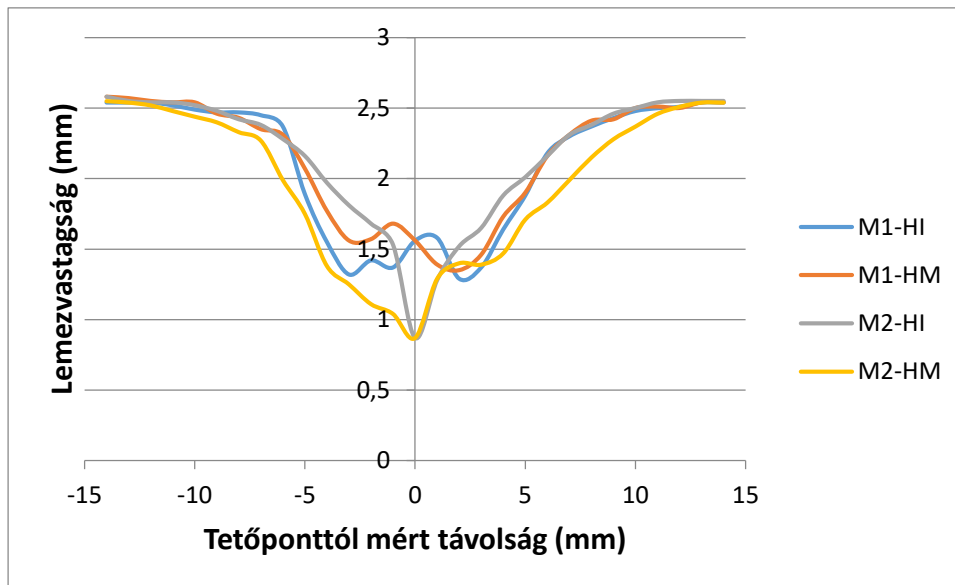
Eredmények és értékelésük

A hengerlési irányban kivett próbatestek szakítóvizsgálatából nyert anyagjellemzőket, valamint az Erichsen-számot (IE) és a csészehúzó vizsgálatból kapott mélyhúzási viszonyt (LDR) összefoglalóan mutatja a 4.25. táblázat. Ebből látható, hogy a nagyobb intermetallikus fázisarányt mutató A1 és M1 adagok alakíthatósági tulajdonságai kissé elmaradnak a kedvezőbb fázisarányú A2 és M2 lemezektől, de a különbségek nem jelentősek, a 3...12% tartományban mozognak. A nyúlási jellemzők alig térnek el egymástól, az Erichsen-szám és a mélyhúzási viszony egy fokozattal mutat jobb adatot a kisebb részecsketartalmú lemezek javára. Ez is igazolja, hogy a hagyományos jellemzőkkel nehéz különbséget kimutatni az alakíthatóságban, ugyanakkor a gyártási tapasztalatok az irodalommal összhangban mindkét lemezminőség esetében azt mutatták, hogy a selejtarány a több intermetallikus fázist tartalmazó lemezeknél nagyobb volt.

ANYAG		R _{P0,2}	R _M	A _G	A ₅₀	R ₀	N ₀	IE	LDR
AA 3104	A1	88	183	16,4	16,9	0,55	0,30	6,49	1,76
	A2	91	187	17,1	18,3	0,63	0,26	7,35	1,82
AA 5754	M1	155	249	15,4	17,6	0,64	0,24	10,5	1,82
	M2	156	256	15,7	19,0	0,72	0,25	11,8	1,88

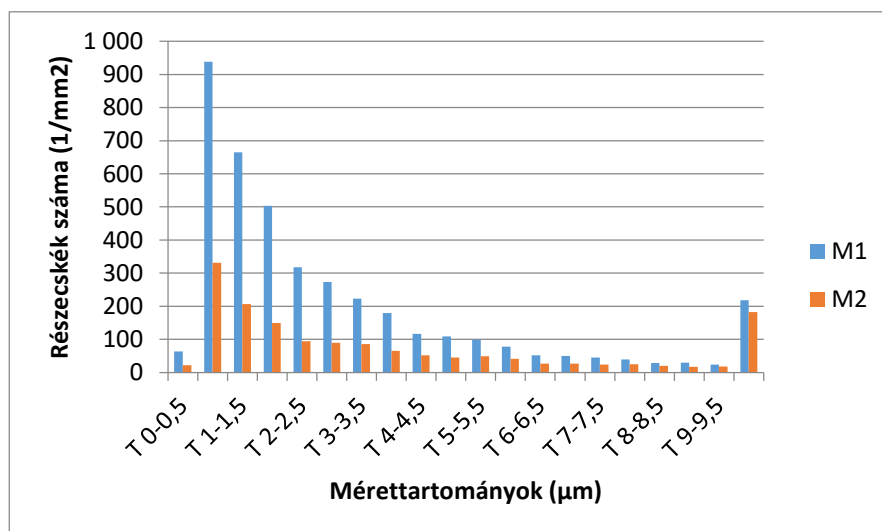
4.25. táblázat. Lemezek mechanikai és technológiai tulajdonságai

A szakirodalom a töréshez tartozó alakváltozás intenzívebb növekedését jelzi a Fe-tartalom függvényében [68]. Ilyen jellemző lehet az Erichsen-vizsgálathoz hasonló mélyítő próba esetében a lemezvastagság-változás az alakított lemez hengerlés irányú (HI) és arra merőleges (HM) köríve mentén. Egy 30 mm-es gömbbel végzett alakítás vastagságeloszlását mutatja a 4.53. ábra. Látható, hogy az M2 lemez vékonyodása sokkal intenzívebb, mint az M1-é. A töréskor mért vastagságból számított logaritmikus méretcsökkenés az M1-es lemeznél 0,58, míg az M2-es lemeznél 1,05, amely jelentős különbség az alakíthatóságban az M2 lemez javára.



4.53. ábra. Mélyítő vizsgálat során deformált lemez vastagságeloszlása

A továbbiakban a fémtani jellemzőkre kiterjesztett elemzést mutatom be. Az már a 4.24. táblázatból is látható volt, hogy a nagyobb területarány lényegesen nagyobb területegységre eső részecskeszámmal (Db/mm^2) párosult. Ezért látszik célszerűnek a részecskék méret szerinti eloszlását vizsgálni, ahogy a 4.54. ábra mutatja a két AA5754 ötvözetre.



4.54. ábra. Intermetallikus részecskék méret szerinti eloszlása

A 4.54. ábrából egyértelműen látszik, hogy a több intermetallikus fázist képező ötvözt tartalmazó M1 minta minden mérettartományban lényegesen több részecskét tartalmaz, mint az M2-es jelű. A tudományos irodalomban hasonló információk kevésbé találhatók ezekre a lemezekre, viszont az Alcan alumíniumgyártó által publikált prezentáció tartalmaz hasonló diagramot a 3xxx sorozatra, amely jól egyezik az itt

bemutatottal [71]. A 0–0,5 μm tartomány elsősorban az Mg_2Si részecskéket reprezentálja, utána azonban megjelennek az α - és β -fázisú intermetallikus részecskék. Ezekből az eredményekből igazolható, hogy a mechanikai tulajdonságoknál sokkal erőteljesebb különbségek mutatkoznak az egyes adagok között az intermetallikus részecskék kvantitatív mikroszkópai jellemzőiben.

4.4.2. A fázisok mennyiségét befolyásoló tényezők elemzése

Az itt szerzett információkra támaszkodva egy szélesebb adatbázist állítottam össze, mely tartalmazza a vizsgált AlMg3 ötvözetű lemezek összetételét, kvantitatív mikroszkópai jellemzőit és a mechanikai tulajdonságait. Ennek összetételre és kvantitatív mikroszkópai jellemzőkre vonatkozó részletét a 4.26 táblázat mutatja. A táblázat első két oszlopa azonosítja a vizsgált adagokat, ezután következnek az összetételre jellemző oszlopok, majd az utolsó négy oszlopban rendre az 1 mm^2 -re eső részecskeszám, a részecskék terület %-a, átlagos területe és a közöttük lévő átlagos szabad úthossz.

		SI	FE	MN	MG	CU	ZN	CR	DB/ MM ²	F%	T, MM ²	Λ , MM
AA5754	K0-1	0,133	0,27	0,159	3,51	0,026	0,025	0,022	4050	1,27	3,13	15,7
	K0-2	0,134	0,266	0,16	3,52	0,026	0,027	0,021	4170	1,73	4,15	15,5
	K1-1	0,178	0,262	0,156	3,01	0,037	0,022	0,027	3640	2,23	6,12	16,6
	K1-2	0,170	0,230	0,180	3,41	0,037	0,018	0,021	3463	1,35	3,88	17,0
	K2-1	0,045	0,110	0,33	3,30	0,001	0,003	0,001	1932	0,51	2,66	22,8
	K3-1	0,150	0,230	0,340	2,82	0,027	0,022	0,013	2609	1,10	3,79	19,6
	K4-1	0,062	0,127	0,362	3,57	0,002	0,010	0,004	1570	0,69	4,39	25,2
	K4-2	0,059	0,144	0,363	3,50	0,002	0,010	0,004	1539	0,70	4,57	25,5
AA5018	K5-1	0,100	0,29	0,520	3,42	0,021	0,018	0,150	2754	1,54	6,08	19,1
	K5-2	0,100	0,270	0,460	3,46	0,042	0,033	0,140	2607	1,67	5,92	19,6
AA5182	K6-1	0,090	0,110	0,250	4,69	0,061	0,013	0,015	1736	0,83	4,79	24,0

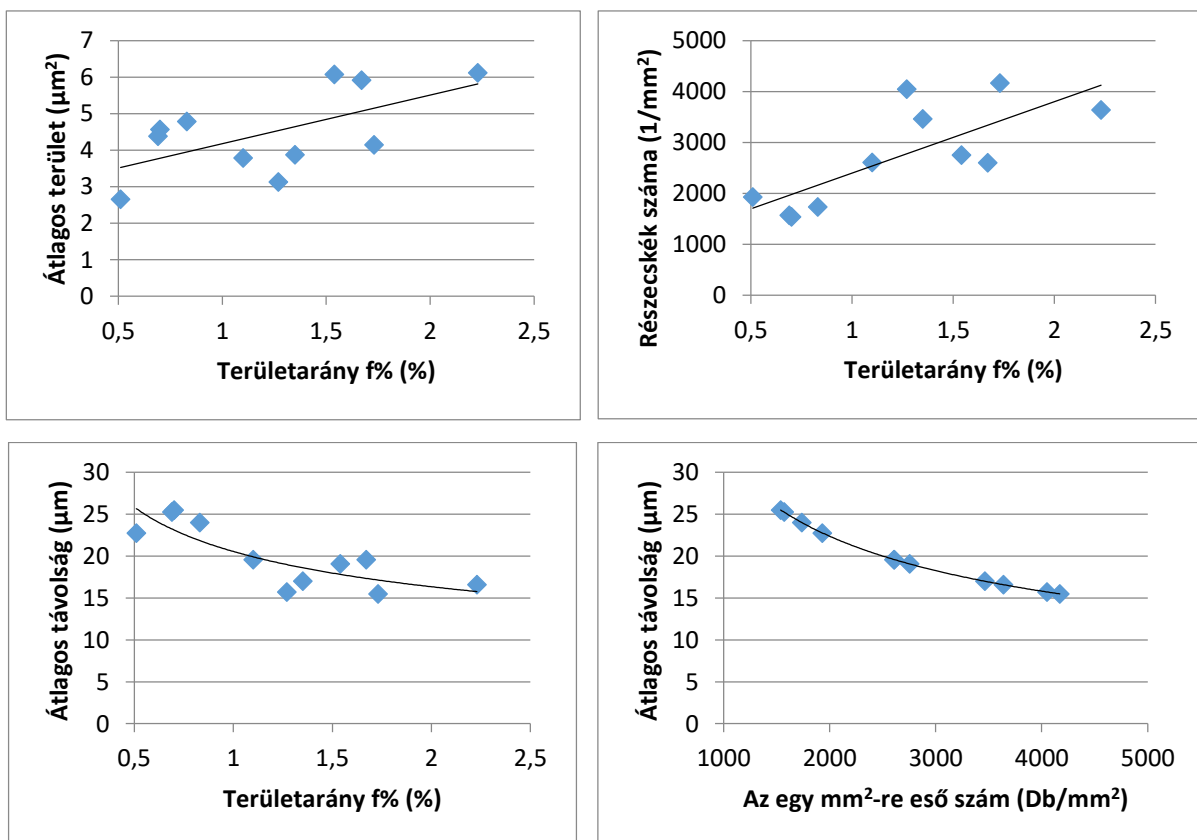
4.26. táblázat A vizsgált ötvözetek összetétele és részecske jellemzői

A 4.27. táblázat tartalmazza az egyes jellemzők közötti kapcsolatra jellemző korreláció mátrixot. Ebből látható, hogy a területarányra és a részecskeszámra a legerősebb hatása a vasnak és a szilíciumnak van, amely igazolja a korábban ismertetett irodalmi megállapításokat erre az ötvözet csoportra, amely az AA5754-en kívül tartalmaz AA5018 és nagyobb magnézium tartalmú AA5182 ötvözeteket is. A korreláció mátrix a Zn hatását is erősnek mutatja, ennek súlya azonban a kis előfordulási százalék miatt nem jelentős.

	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Cr	Db/ mm ²	f%	T, μm ²	λ, μm
Si	1,00										
Fe	0,70	1,00									
Mn	-0,57	-0,06	1,00								
Mg	-0,37	-0,46	-0,06	1,00							
Cu	0,54	0,29	-0,29	0,43	1,00						
Zn	0,64	0,85	-0,13	-0,21	0,53	1,00					
Cr	0,02	0,59	0,65	-0,05	0,25	0,50	1,00				
Db/mm ²	0,80	0,80	-0,62	-0,28	0,35	0,69	0,10	1,00			
f%	0,76	0,85	-0,25	-0,33	0,48	0,78	0,47	0,76	1,00		
T, μm ²	0,15	0,32	0,35	0,16	0,45	0,35	0,65	-0,04	0,56	1,00	
λ, μm	-0,84	-0,84	0,52	0,31	-0,44	-0,73	-0,22	-0,98	-0,80	-0,02	1,00

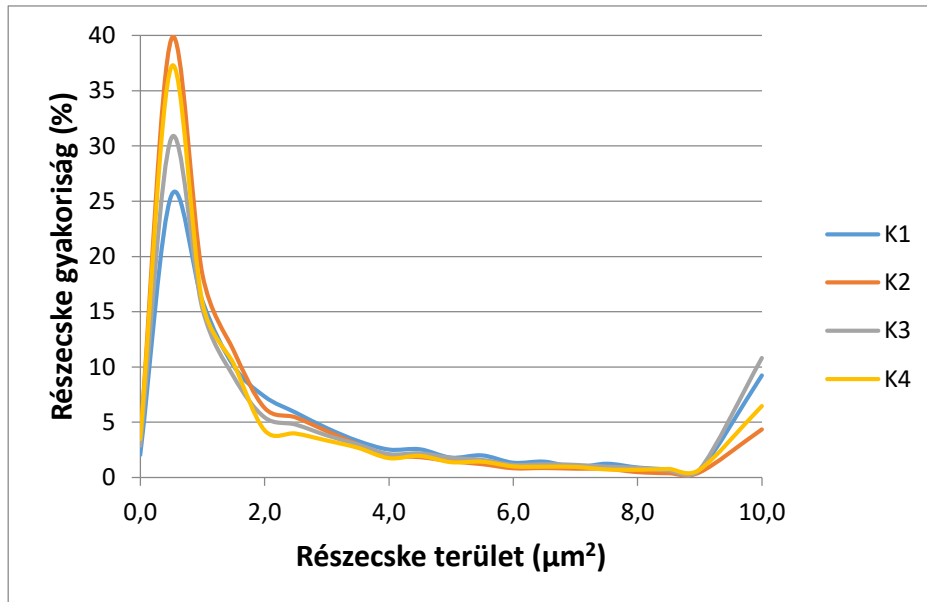
4.27. táblázat. Vizsgált jellemzők korreláció mátrixa

A részecskék átlagos területe enyhén, a részecskék száma erőteljesebben emelkedő tendenciát mutat a területarány növekedésével. A részecskék közötti átlagos távolság a területarány növekedésével csökken. Ezeket a kapcsolatokat szemlélteti a 4.55. ábra.



4.55. ábra. Összefüggések a részecske jellemzők között

Az intermetallikus részecskék legfontosabb jellemzője a gyakorisági görbe, amely megmutatja a méret csoportokat. Ezt tartalmazza a 4.56. ábra a K1-K4 kísérleti adagok egy-egy jellemző összetételére, melyek mindegyike AA5754 ötvözet, de Fe-tartalomban jelentősen különböznek.

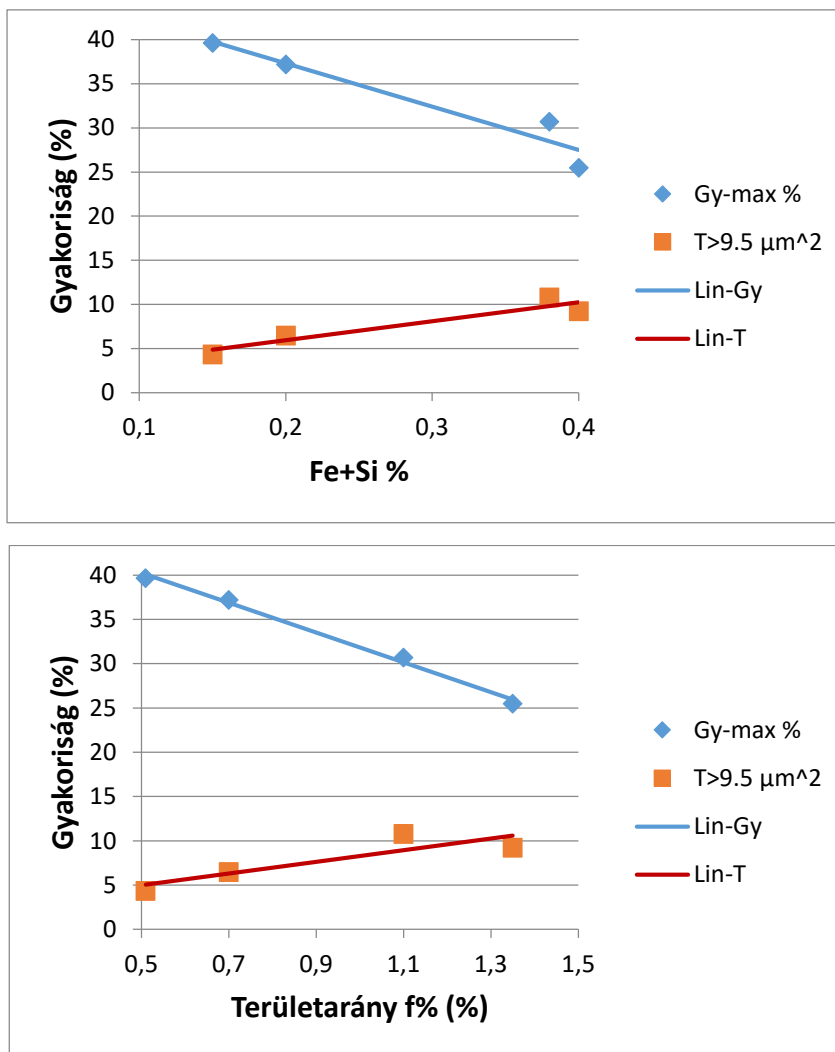


4.56. ábra. Részecskék méret szerinti eloszlásának szemléltetése

A részecske gyakoriság vizsgálatok során a következő volt megállapítható:

- A részecskék méret szerinti eloszlása azt mutatja, hogy az $1 \mu\text{m}^2$ közelébe esik a relatív gyakoriságok maximuma
- Legnagyobb a gyakoriság maximum a K2 és K4 lemezek esetében, amelyek a legkevesebb Si-t és Fe-t tartalmazzák és a részecskék területaránya is itt a legkisebb (0,51 illetve 0,7%)
- A gyakoriság maximum értéke csökken a területarány növekedésével
- A K2 és K4 lemezekben kisebb a $9,5 \mu\text{m}^2$ feletti részecskék aránya
- Hasonló összefüggés van a Fe+Si% és a gyakorisági paraméterek között is.

Ezeket a megállapításokat igazolja a 4.57. ábra, amely a négy ötvözetre mutatja a gyakoriság maximumokat és a $9,5 \mu\text{m}^2$ feletti részecskék arányát.

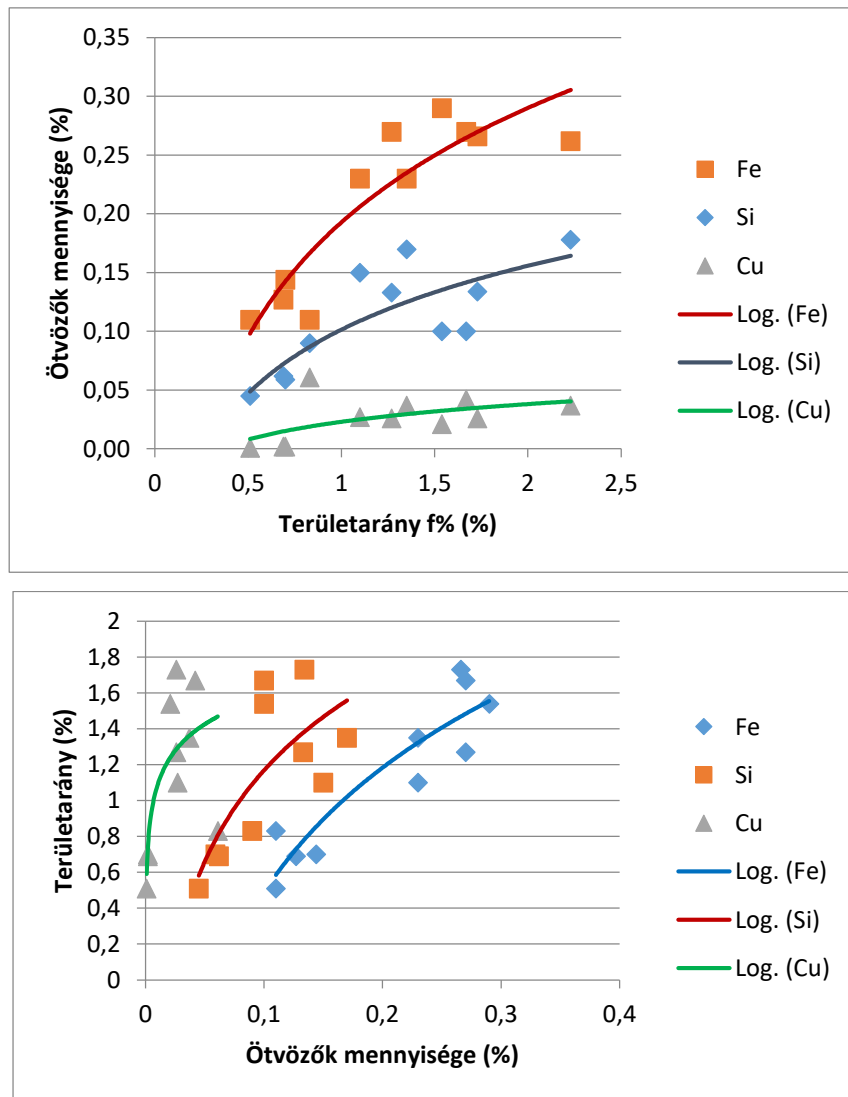


4.57. ábra. A részecske gyakoriság kapcsolata a vas és szilícium tartalommal, valamint a részecske területhányaddal

A korreláció mátrix kimutatta, hogy a részecske területarány és a Fe, Si között mutatható a legszorosabb kapcsolat, de a Cu is mutat enyhe korrelációt. Megállapítható, hogy a mért értékek között logaritmikus összefüggés van, a korrelációs együttható négyzete a Fe esetében a legmagasabb, ezt követi a Si és a Cu. A közelítő egyenleteket a 4.28. táblázat, az ötvöző%-f% és az f%-ötvöző% kapcsolatokat a 4.58. ábra mutatja.

Cu	$f\% = 0,2135\ln(\text{Cu}) + 2,0649$	$R^2 = 0,528$
Si	$f\% = 0,7345\ln(\text{Si}) + 2,8594$	$R^2 = 0,543$
Fe	$f\% = 1,0008\ln(\text{Fe}) + 2,7939$	$R^2 = 0,833$

4.28. táblázat. Közelítő függvények



4.58. ábra. Az ötvözők hatásának elemzése (Fe, Si, Cu)

A 4.58. ábrából látható, hogy legerőteljesebben a réz növeli a területarányt, amelynek oka az lehet, hogy a réz stabilizálja az intermetallikus fázis lamellás szerkezetét és ezzel gyakorol hatást a feldolgozott lemezben megjelenő fázisok mennyiségére. A mennyiségi arányokból következik, hogy a szilícium és a vas jelenléte meghatározó a részecskék összetételében. Tehát amennyiben az alakíthatóságot kívánjuk javítani, akkor a saját kísérleteinkkel összhangban a 0,7% területarányal metszve az összetétel görbéket a Si arányát 0,07%, a vasat 0,14% és a rézet 0,005% alatt célszerű tartani, mert ekkor a várható részecskearány kisebb lesz 0,7%-nál, tehát az alakíthatóság is kedvező lesz.

További megfigyelés, hogy a kedvezőbb alakíthatóságú K4 jelű lemezekben a Mn nagyobb arányban szerepel, mint a K0 és K1 összetételekben, ezért a K2 kísérletnél

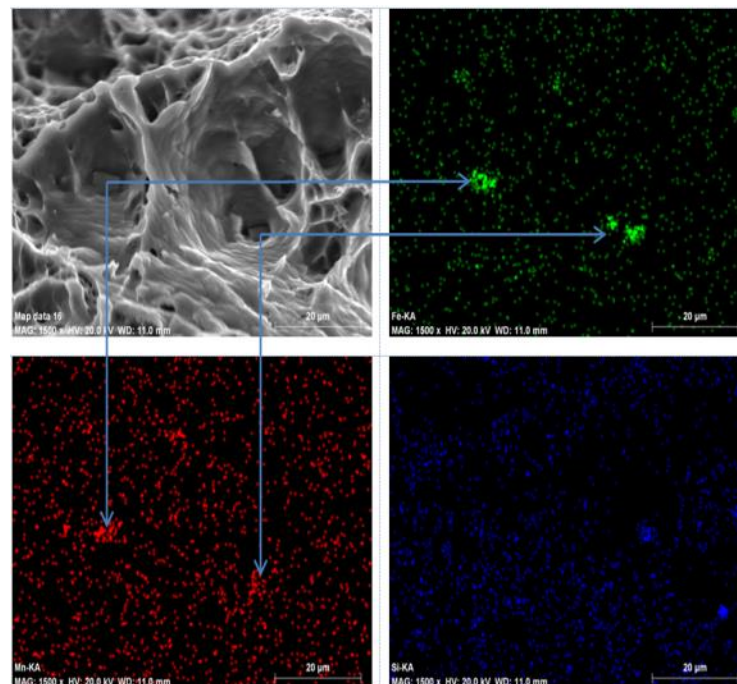
növelt Mn tartalmú ötvözet készült. Az intermetallikus fázisokban jelen van a Mn, ennek ellenére úgy tűnik, hogy a Mn tartalom növekedése csökkenti azok mennyiségét.

További információk szerezhetők az ötvözők és a részecske területarányról a közöttük lévő többváltozós lineáris regressziós kapcsolatok elemzésével. Ennek érdekében AlMg ötvözeteket vizsgáltam jellemzően 3% körüli Mg-tartalommal és változó mennyiségű Fe, Si, Mn ötvözőkkel. A számítások azt mutatták, hogy az $f\%$ -kal a legszorosabb a kapcsolat akkor, ha mindhárom ötvöző, a Fe, Si és Cu is szerepel az összefüggésben ($R^2=0,800$), de önmagában a Fe és Si szerepe is lényeges, ekkor a regressziós együttható négyzete csak 0,775-e csökken. Érdekes, hogy a Mn egyáltalán nem mutat erős kapcsolatot az intermetallikus részecske aránnyal, a korrelációs együttható 0,29. Ez azzal magyarázható, hogy az $Al_x(Fe,Mn)$ fázisban a Fe helyettesíti a Mn-t, a fennmaradó Mn pedig a mátrixban oldódik. A hivatkozott többváltozós lineáris regressziós számításokkal meghatározott egyenletek a következők:

$$f\% = -0,177 + 2,416 \cdot S_i + 4,877 \cdot F_e + 4,821 \cdot C_u \text{ illetve}$$

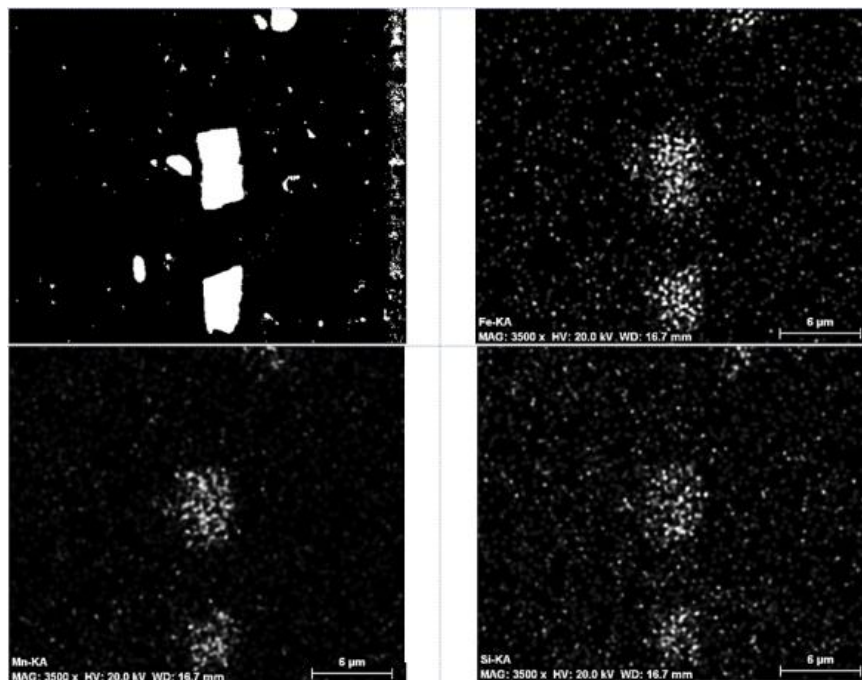
$$f\% = -0,251 + 3,281 \cdot S_i + 5,269 \cdot F_e \quad (18)$$

Az elemzett ötvözőknek a törésre gyakorolt hatását pásztázó elektronmikroszkópos felvételek is igazolják, ahogy ezt a 4.59. ábra mutatja AA5754 lemezre.



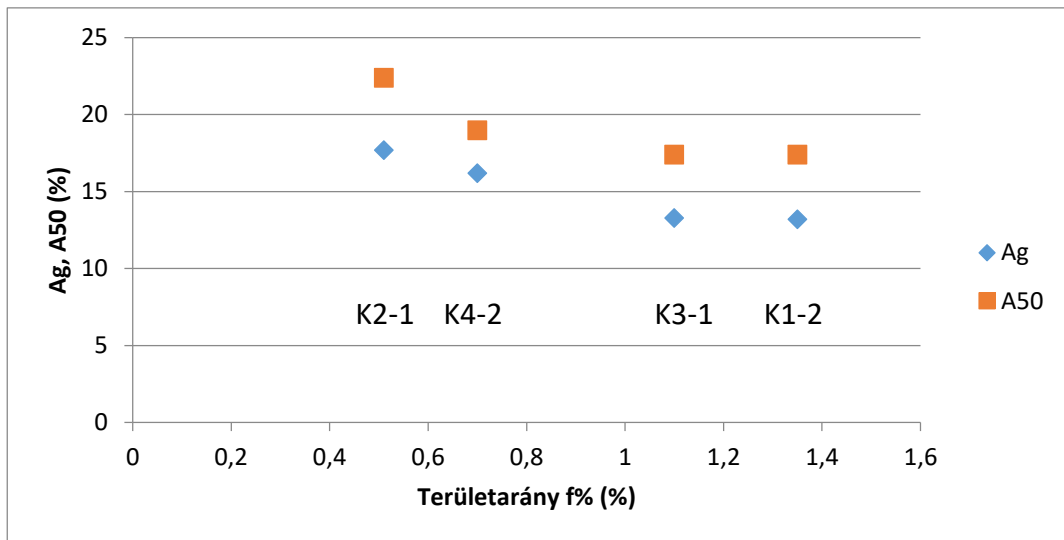
4.59. ábra. AA5754 lemez töretképe és elem térképei

Jól látható a töretképen, hogy a kagyló alakú üreg alján egy intermetallikus részecske helyezkedik el, az EDS elemzéssel meghatározott összetételre vonatkozó információkat pedig a három elemtérkép mutatja. A bal oldali üreg mélyén lévő részecske Al(Fe,Mn) típusú, mert ennek a helyén nem jelenik meg szilícium. Hasonlóan a Fe és Mn sűrűsödése látható az elemtérképek jobb oldali harmadában, ami egy másik intermetallikus részecskével hozható kapcsolatba. Ugyanígy képet mutat a 4.60. ábra az AA3104 lemezre, ahol viszont a csiszolaton látható részecskékkel azonos helyeken a Fe, Mn és Si is megjelenik, tehát ezek α -típusú intermetallikus fázisok.



4.60. ábra. AA3104 lemez töretképe és elemtérképei (fekete-fehér kontraszt)

Az első kísérletsorozatban, az A és M jelű lemezek összehasonlításakor megállapítottam, hogy a szakítóvizsgálatból és technológiai próbákból meghatározott alakíthatósági jellemzők nem mutatnak jelentős különbséget a részecske hányad függvényében. Ezért vizsgáltam ott a töréshez tartozó alakváltozást a félgömbbel végzett alakítás során. A most elemzett nagyobb adatbázis pontosítja a korábbi megállapítást, és mutat némi különbséget a részecske arány és a nyúlások között, ahogy ezt a 4.61. ábra mutatja. Az is jól látható az ábrából, hogy a korábban említett $f=0,7\%$ -os kedvező alakíthatósági határ itt is jelentkezik, ez alatt nagyobb nyúlás értékek mutathatók ki, mint a $0,7\%$ feletti tartományban.



4.61. ábra. A részecske területarány hatása a nyúlásra

A kutatási eredményeket összefoglalva az alábbi következtetések vonhatók le:

- Az alumínium-magnézium ötvözetek alakíthatóságát döntően az α - $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ és β - $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ intermetallikus fázisok térfogataránya, méret szerinti eloszlása és a részecskék közötti átlagos távolság határozza meg.
- Az intermetallikus fázisok mennyisége elsősorban a kémiai összetételtől függ, a vas, szilícium és króm a részecskék térfogatarányát növeli. Az ötvözők mennyisége és a részecske térfogatarány között logaritmikus összefüggés van.
- A részecskék méret szerinti eloszlásának maximuma $1 \mu\text{m}^2$ közelébe esik. Az intermetallikus részecskék térfogatarányának növekedése a gyakoriság maximum értékét csökkenti, ezzel ellentétben a nagyobb méretű részecskék arányát növeli. Hasonló összefüggés van a vas és szilícium százalékos arányának összege és a gyakoriság maximumok között is.
- Az alakíthatóság és az intermetallikus részecske tartalom közötti kapcsolat szakítóvizsgálati jellemzőkkel korlátozottan mutatható ki. Ezzel szemben az Erichsen vizsgálat során végzett lemezvastagság eloszlás mérésével meghatározott törési nyúlás szelektívebben jellemzi az alakíthatóságot, összhangban a konkrét alkatrészek gyártási tapasztalataival.

- A mérések igazolták, hogy az AA5754 ötvözetek esetében az irodalmi eredményekkel összhangban 0,7% részecske arány alatti lemezek jól alakíthatók, az ennél magasabb, 1-1,5% közötti intermetallikus részecske tartalom viszont a gyártásra való alkalmasságot kérdéseessé teszi, ezek a lemezek csak alárendelt alakításokra felelnek meg. Ezen eredményekre támaszkodva megállapítottam, hogy az alakíthatósági korlátokhoz rendelt összetétel határok szerint a Si arányát 0,07%, a vasat 0,14% és a rezet 0,005% alatt célszerű tartani a kedvező alakíthatóság érdekében.
- Az intermetallikus részecskék méret szerinti eloszlásának maximuma 1 μm^2 közelébe esik. Az intermetallikus fázis térfogatarányának növekedése a gyakoriság maximum értékét csökkenti, ezzel ellentétben a nagyobb méretű részecskék arányát növeli. Hasonló összefüggés van a vas és szilícium százalékos arányának összege és a gyakoriság maximumok között is

5. Összefoglalás

Kutatói pályám elejétől fogva kiemelten foglalkoztam a jármű karosszéria anyagok vizsgálatával és alkalmazási lehetőségeinek elemzésével. Kezdetben a nagyszilárdságú acélok álltak a vizsgálatok középpontjában, majd az Egyetem és az Arconic Kft együttműködésének eredményeként már több éve vizsgálom az alumíniumötvözetek, ezen belül az 5xxx sorozatú magnéziumötvöztetésű lemezek alakíthatósági tulajdonságait. Ez egybeesett a jármű karosszéria anyagok fejlődési tendenciájával, mert az utóbbi évtizedben az alumínium alkalmazása ugrásszerűen megnőtt a járműiparban.

A kutatások kezdetén fő feladat az Arconic termékválasztékának világpiacon való pozícionálása volt, melynek során a lemezek mechanikai tulajdonságait és az alakíthatósági határgörbéit vizsgáltam. A céggel közösen felmértük, hogy a lemezek alakíthatósága nem felel meg nemzetközi elvárásoknak, ezért a figyelem a termékfejlesztésre irányult. Így vált a téma tudományos kutatássá, mert ebben a fázisban már nem csupán a lemezek minősítése, hanem az alakíthatóságot befolyásoló tényezők részletes elemzése és annak alapján új ötvözet típusok kifejlesztése volt a cél. Ekkor kapott kiemelt szerepet a digitális képkorrelációs technika, amely a rutin vizsgálatokon túlmenően az AlMg3 ötvözetekre jellemző helyi alakváltozások tanulmányozását tette lehetővé a PLC effektus újszerű leírása, valamint a diffúz és lokális kontrakció határának pontosabb kijelölése révén.

Ezen területek fejlesztése során először a DIC eljárás vizsgálótechnikai elemzését végeztem el, hogy a gyártó cég által kínált megoldások rutinszerű elfogadásán túl saját információim is legyenek a kiértékelés pontosságáról és azt befolyásoló tényezőkről. Ebben a témakörben az alakváltozások detektálására használt mintázatok részletes elemzését végeztem el, új minősítési eljárást dolgoztam ki a mintázatok számszerű jellemzésére, majd ezeket paraméterként használva minősítettem a vizsgálatok pontosságát.

A szakítóvizsgálat egyenletes alakváltozási és kontrakciós szakaszát együttesen, komplexen vizsgáltam a DIC technika alkalmazásával. A folyáshatártól a szakítószilárdságig terjedő szakaszban a PLC-effektus által keltett lokális nyúlás-változásokat elemeztem és új mérőszámokat dolgoztam ki a PLC nyúlás és

sávszélesség meghatározására. Kimutattam, hogy ezek kapcsolatban vannak az alakíthatósággal.

A termékfejlesztés csúcspontját képezte annak a felismerésnek a következetes alkalmazása, hogy az AlMg3 lemezek alakíthatóságát döntően befolyásolja az intermetallikus fázisok mennyisége és eloszlása. Az irodalmi eredményekre támaszkodva kijelölhető volt az a fejlesztési irány, hogy elsősorban a vas és szilícium koncentráció csökkentésével javítható az alakíthatóság. Ezt az értekezésben szereplő, módosított összetételű K2 jelű ötvözetek segítségével sikerült igazolni, majd több kísérleti gyártású adaggal megerősíteni. A különböző összetételű lemezek részletes elemzése azt eredményezte, hogy sikerült kapcsolatot találni az összetétel, az intermetallikus részecske arány és az alakíthatóság között. Ennek a megállapításnak a tudományos értékén túl gyakorlati eredménye is volt, mert a partner cég a termékfejlesztésben tudta hasznosítani.

Az értekezés e három témakör irodalmának áttekintésével, a vizsgálati anyagok és módszerek bemutatásával, valamint az eredmények értékelésével foglalkozik. Az új tudományos eredmények minden fejezet végén következtetés formájában jelennek meg, és ezt tartalmazza részletesebben a téziszűzet.

Összefoglalva megállapítható, hogy az értekezés célkitűzéseit sikerült megvalósítani a megjelölt három területen.

Az új tudományos eredmények összefoglalva

A bemutatott kutatási eredményekre alapozva a következő téziseket fogalmaztam meg:

1. tézis A különböző festési módszerek minősítésére a szabványos festés minősítési eljárásokon és a festés viselkedését jellemző technológiai próbákon alapuló komplex minősítő eljárást dolgoztam ki. A festés minősítésére a tapintás vizsgálatot, fogásbiztos száradás vizsgálatot és rácsvágásos vizsgálatot alkalmaztam. A festett felület technológiai alkalmasságát hajlító próbával és Erichsen vizsgálattal értékeltem, az eredményeket GOM Aramis rendszerrel igazoltam. A komplex festés minősítő vizsgálatok alapján a festés környezeti paraméterei a hőmérséklet szempontjából a 10 és 20 °C a legkedvezőbbek, száradási idő szerint legjobb a 24 órás, de a 3 és 12 órás száradás minősége is elfogadható. Páratartalom szempontjából az AlMg3 minták

esetében a 20 és 50RH% a megfelelő.

Megállapítottam, hogy a komplex festék minősítési vizsgálataim alapján AIMg3 lemezekhez alapozóként a vízbázisú univerzális felhasználási célú matt fehér, RAL9010 színekódú lakkfesték a legjobban használható szakító és alakíthatósági vizsgálatok alapozásához a festéstől számított 3 és 24 óra közötti időintervallumban, 20°C és 50RH% környezeti paraméterek mellett [84].

2. tézis A digitális képkorrelációs (DIC) vizsgálatokhoz előkészített véletlenszerű mintázatok jellemzésére a vizsgáló ablak technikán alapuló irodalmi eredmények adott feladatra való adaptálásával egy morfológiai paraméter együttest dolgoztam ki. A paraméterekből komponált képi jellemzők vektora tartalmazza a kép fedettségét, átlagos szabad úthosszát, egységnyi felületre eső foltszámát, a foltok átlagos átmérőjét és az átlagos távolságot a foltok között. A kidolgozott paraméter együttes minősítéséhez a különböző technikákkal előállított mintázatú próbatestek húzóvizsgálatát hajtottam végre, összehasonlítva az hagyományos és a DIC technikával mért nyúlást. A kapott eredményekből megállapítottam, hogy a 1,5% alatti eltérést a 0,2...0,5 fedettségű, 50...250 1/mm² közötti foltszámú értékekkel rendelkező mintázat biztosítja. Ezekhez kiválasztottam a megfelelő festék minőséget és szórás technológiai változatokat. [85]

3. tézis A digitális képkorrelációs technika és a mechanikai vizsgálatok együttes figyelembevételével elemeztem az AIMg3 ötvözetekben jelentkező PLC effektus által létrehozott nyúlásképeket. A PLC-sávok jellemzésére két új típusú lokális alakváltozási mérőszámot dolgoztam ki, egyik az egyenletes alakváltozás tartományában a lokális alakváltozás maximális és átlagértékének különbségként definiált PLC-nyúlás, másik pedig a maximális és minimális értékek különbségéből származtatható lokális alakítási egyenetlenség. Mindkét mérőszám esetében az értékek az átlagnyúlás függvényében lineárisan nőnek, ezért az adott ötvözetre jellemző paraméter meghatározásához az elemzést a teljes egyenletes nyúlás tartományra kiterjesztve a mért pontokat közelítő egyenesek meredekségéből származtatható az adott lemezminőségre jellemző inhomogenitási paraméter. Definíció szerint ez a PLC effektusra jellemzően az átlagnyúlás-PLC nyúlás koordinátarendszerben ábrázolt ϵ PLC pontokra illesztett

egyenes mPLC meredeksége.

Megállapítottam továbbá, hogy a próbatesten észlelhető pontszerű helyi alakváltozások szélsőértékeinek mérési hibából adódó esetleges meghatározási bizonytalansága miatt az $\text{átlag} \pm 2\sigma$ tartomány stabilabb értéket ad a minimumra illetve a maximumra, ugyanakkor egyértelműen jellemzi a nyúlás lokalizáció mértékét.

Elemeztem a PLC sávok szélességének lehetséges meghatározási módjait és az irodalomban ismertetett megoldásoktól eltérően azt állapítottam meg, hogy a sáv szélesség a valóságos nyúlásokkal összhangban a nyúlás vonalnak az átlagnyúlással való metszék hosszok átlagaként pontosabban definiálható AlMg3 ötvözetek esetében, mint a korábban kidolgozott módszerek [83, 85].

4. tézis A szakítóvizsgálat során mért adatok és a digitális képkorrelációs technika együttes értékelése alapján folyamatában, az idő függvényében vizsgáltam az AlMg3 ötvözetekben jelentkező diffúz és lokális kontrakció megjelenési formáit, valamint kidolgoztam a diffúz és lokális alakváltozás határának újszerű meghatározását. A szakadási folyamat során felvett DIC képek összehasonlítása és számszerű jellemzése alapján megállapítottam, hogy mely képek tekinthetők a diffúz és lokális kontrakció határainak.

Az átlagnyúlás függvényében ábrázolt nyúlás maximumok pontjait két szakaszra bontva – a lapos diffúz kontrakcióra és a meredeken emelkedő lokális kontrakcióra – a rájuk illesztett egyenesek metszéspontjaként határoztam meg a diffúz és lokális kontrakció határát. Ez a határérték közvetlenül a mérési eredményekből származtatható és jól egyezik az irodalomból ismert, deriváláson alapuló módszerekből kapott eredményekkel [85, 86].

5. tézis A kontrakciós folyamat elemzéséhez AlMg3 ötvözeteken végzett szakító vizsgálatok során a szakadás előtti utolsó felvétel lokális alakváltozás függvényét vettem alapul, és ebből következtettem a lokális alakváltozás kezdetére, valamint az ott jellemző nyúlás értékére. Megoldásként a törés előtti legnagyobb alakváltozási helyen áthaladó metszési vonalon mérhető egyenértékű alakváltozásokra 4 paraméteres Gauss-függvényt illesztettem, és ennek együtthatói segítségével határoztam meg a diffúz és lokális kontrakció határát. A szakítóvizsgálati

eredményekkel igazoltam, hogy ez a megoldás azonos eredményre vezet a 4. tézisben bemutatott időfüggő eljárásból meghatározott értékekkel. A megoldás helyességét az alakíthatósági határgörbe jellemző alakváltozásainak felvételére is igazoltam AlMg3 ötvözeteken. Megállapítottam, hogy különösen a súrlódás hatásaként fellépő kettős maximumú nyúlásképek esetében a Gauss-függvény illesztésén alapuló megoldás stabilabb eredményt szolgáltat, mint a szabvány által javasolt értékelés [85, 86].

6. tézis Az alumínium-magnézium ötvözetek komplex vizsgálata alapján megállapítottam, hogy azok alakíthatóságát döntően az α -Al₆(Fe, Mn)₃Si₂ és β -Al₆(Fe, Mn) intermetallikus fázisok térfogataránya, méret szerinti eloszlása és a részecskék közötti átlagos távolság határozza meg. Szakítóvizsgálattal és Erichsen-teszttel kimutattam, hogy a vizsgált AlMg3 ötvözetek esetében az irodalmi eredményekkel összhangban 0,7% intermetallikus fázisarány alatti lemezek jól alakíthatók. Az ötvözők mennyisége és a részecske térfogatarány közötti összefüggés alapján megállapítottam, hogy az AlMg3 ötvözeteknél a kedvező alakíthatóság érdekében a Si arányát 0,07%, a Fe arányát 0,14% és a Cu arányát pedig 0,005% alatt célszerű tartani. [87]

6. Irodalomjegyzék

- [1] European Aluminium Association: Design-Design with Aluminium, The Aluminium Automotive Manual, European Aluminium Association, 44p., 2011, <https://www.european-aluminium.eu/media/1508/aam-design-2-design-with-aluminium.pdf>
- [2] Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H. W., & Reu, P. (2012). Introduction to digital image correlation: Best practices and applications. *Experimental Techniques*, 36(1), 3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00798.x>
- [3] Dong, Y. L., & Pan, B. (2017). A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 57(8), 1161–1181. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0283-1>
- [4] Gualtieri, S. (2012) Novel technique for DIC speckle pattern optimization and generation. Thesis, POLITECNICO DI MILANO
- [5] Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11), 1132–1145. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.004>
- [6] Alessandro Freddi, Giorgio Olmi, Luca Cristofolini: Experimental Stress Analysis for Materials and Structures - Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies, Springer, 2015, 509p., DOI 10.1007/978-3-319-06086-6
- [7] Correlated Solutions: Application Note AN-1701 – Speckle Pattern Fundamentals, Correlated Solutions, 2018, 13p., <https://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?/Knowledgebase/Article/View/80/1/speckle-pattern-fundamentals>
- [8] Reu, P. (2014). All about speckles: Aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5), 1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12111>
- [9] Reu, P. (2015). All about speckles: Speckle density. *Experimental Techniques*, 39(3), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12161>
- [10] Reu, P. (2015). All about speckles: Edge sharpness. *Experimental Techniques*, 39(2), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12139>
- [11] Reu, P. (2013). Calibration: A good calibration image. *Experimental Techniques*,

- 37(6), 1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12059>
- [12] Reu, P. (2015). Points on Paint. *Experimental Techniques*, 39(4), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12147>
- [13] Reu, P. (2014). Speckles and their relationship to the digital camera. *Experimental Techniques*, 38(4), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12105>
- [14] Reu, P. (2015). Virtual Strain Gage Size Study. *Experimental Techniques*, 39(5), 1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12172>
- [15] Reu, P. (2015). All about speckles: Contrast, *Experimental Techniques*, 39(1), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12126>
- [16] Reu, P. (2014). All about speckles: Speckle Size Measurement. *Experimental Techniques*, 38(6), 1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12110>
- [17] Crammond, G., Boyd, S. W., & Dulieu-Barton, J. M. (2011). Speckle pattern characterisation for high resolution digital image correlation. *Applied Mechanics and Materials*, 70, 261–266. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.261>
- [18] LePage, W. S., Shaw, J. A., & Daly, S. H. (2017). Optimum Paint Sequence for Speckle Patterns in Digital Image Correlation. *Experimental Techniques*, 41(5), 557–563. <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0192-3>
- [19] Correlated Solutions: CSI Application Note AN-525 – Speckle Pattern Fundamentals, *Correlated Solutions*, 2014, 8p., <http://www.correlatedsolutions.com/wp-content/uploads/2014/New%20Customer%20Docs/AN525%20-%20Speckle%20Pattern%20Fundamentals.pdf>
- [20] Lionello, G., & Cristofolini, L. (2014). A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation. *Measurement Science and Technology*, 25(10). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/107001>
- [21] Jennifer L.W. Carter, M. D. Uchic, M. J. Mills. (2013) Impact of speckle pattern parameters on DIC strain resolution calculated from in-situ SEM experiments. https://engineering.case.edu/groups/msl/sites/engineering.case.edu.groups.msl/files/403_car.pdf
- [22] Bomarito, G. F., Hochhalter, J. D., Ruggles, T. J., & Cannon, A. H. (2017). Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern

- optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 91(May 2016), 73–85.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.005>
- [23] Pan, B., Lu, Z., & Xie, H. (2010). Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4), 469–477.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.010>
- [24] Reu, P. (2015). THE ART AND APPLICATION OF DIC DIC: A Revolution in Experimental Mechanics. *Experimental Techniques*, 39(6), 1–2.
<https://doi.org/10.1111/ext.12173>
- [25] Portevin A and Le Chatelier F 1923 Sur un phenomene observe lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* 176 pp 507-510
- [26] McCormick P G 1988 Theory of flow localization due to dynamic strain ageing *Acta Metall* 36 pp 3061-3067
- [27] Jiang H, Zhang Q, Chen X, Chen Z, Jiang Z, Wu X and Fan J 2007 Three types of Portevin-Le Chatelier effects: experiment and modelling *Acta Mater* 55 pp 2219-2228
- [28] Halim H, Wilkinson D S and Niewczas M 2007 The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy *Acta Mater* 55 pp 4151-4160
- [29] Benallal A, Berstad T, Børvik T, Hopperstad O S, Koutiri I and Nogueira de Codes R 2008 An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin-Le Chatelier effect *Int. J. Plast.* 24 pp 1916-1945
- [30] Kang J, Wilkinson D S, Embury J D, Jain M and Beaudoin A J 2005 Effect of type-B Portevin–Le Chatelier bands on the onset of necking in uniaxial tension of strip cast AA5754 sheets *Scr. Mater.* 53 pp 499–503
- [31] Yuzbekova D, Mogucheva A, Zhemchuzhnikova D, Lebedkina T, Lebyodkin M and Kaibyshev R 2017 Effect of microstructure on continuous propagation of the PortevinLe Chatelier deformation bands *Int. J. Plast.* 96 pp 210-226
- [32] Mazičre M and Dierke H 2012 Investigations on the Portevin–Le Chatelier critical strain in an aluminum alloy *Comput. Mater. Sci.* 52 pp 68-72
- [33] Casarotto L, Dierke H, Tutscha R and Neuhauser H 2009 On nucleation and

- propagation of PLC bands in an Al–3Mg alloy Mater. Sci. Eng:A 527 pp 132–140
- [34] Shabadi R, Kumar S, Roven H J and Dwarakadasa E S 2004 Characterisation of PLC band parameters using laser speckle technique Mater. Sci. Eng:A 364 pp 140–150
- [35] Nguyen V T, Kwon S J, Kwon O H and Kim Y S 2017 Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method Procedia Eng. 184 pp 381-389
- [36] Tong W and Zhang N 2007 *J. Eng. Mater. Technol.* 129 pp 332-341
- [37] Sene N A, Balland P and Bouabdallah K 2018 Arch. Civ. Mech. Eng. 18 pp 94-102
- [38] Sevillano, J. G.: Plastic anisotropy, formability and strain localisation. TECNUN, Materials Engineering.
<http://www4.tecnun.es/asignaturas/estcompmec/documentos/thinsheets.pdf>
- [39] Hill, R.: On the discontinuous plastic states, with a special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 5. pp. 153-161.
- [40] Choung, J. M. and Cho, S. R.: Study on true stress correction from tensile tests. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (2008) 1039~1051
- [41] Korhonen, A.S., Manninen, T., Larkiola, J.: Comparison of forming and fracture limits of cold rolled high-strength austenitic stainless steels. IDDRG 2010, Graz, p.535-543
- [42] D. Zhemchuzhnikova, M. Lebyodkin, D. Yuzbekova, T. Lebedkina, A. Mogucheva, R. Kaibyshev: Interrelation between the Portevin Le-Chatelier effect and necking in AlMg alloys. *International Journal of Plasticity* November 2018, Pages 95-109
- [43] Tisza Miklós, Gál Gaszton, Kiss Antal, Kovács Péter Zoltán, Lukács Zsolt: A klasszikus lemezalakíthatósági vizsgálatok nagyszilárdságú lemezek minősítésénél. *Miskolci Egyetem Közleményei, Multidiszciplináris Tudományok*, 4. kötet (2014) 1. sz. pp. 39-48.
- [44] J.A.H. Ramaekers: A criterion for local necking. *Journal of Materials Processing Technology*, 103 (2000) 165-171
- [45] S. Coppieters, J.-H. Kim, K. Denys, S. Cooreman, D. Debruyne: On Complete Solutions for the Problem of Diffuse Necking in Sheet Metal. *Procedia Engineering* 207 (2017) 2012–2017

- [46] J.-H. Kim, A. Serpantié, F. Barlat, F. Pierron, M.-G. Lee: Characterization of the post-necking strain hardening behavior using the virtual fields method. *International Journal of Solids and Structures* 50 (2013) 3829–3842
- [47] Nicolas Tardif, Stelios Kyriakides: Determination of anisotropy and material hardening for aluminum sheet metal. *International Journal of Solids and Structures* 49 (2012) 3496–3506
- [48] Van-Thuong Nguyen, Seong-Jin Kwon, Oh-Heon Kwon and Young-Suk Kim: Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method. *Procedia Engineering* 184 (2017) 381 – 389
- [49] J. Kang, D.S. Wilkinson, M. Jain, J.D. Embury, A.J. Beaudoin, S. Kim, R. Mishra, A.K. Sachdev: On the sequence of inhomogeneous deformation processes occurring during tensile deformation of strip cast AA5754. *Acta Materialia* 54 (2006) 209–218
- [50] H. Halim, D. S. Wilkinson, M. Niewczas: The Portevin–Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy. *Acta Materialia* 55 (2007) 4151–4160
- [51] M. Merklein, A. Kuppert, M. Geiger: Time dependent determination of forming limit diagrams. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 295–298
- [52] O. Engler, K. Kuhnke, J. Hasenclever: Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents. *Journal of Alloys and Compounds* 728 (2017) 669–681.
- [53] N. Moulin, E. Parra-Denis, D. Jeulin, C. Ducottet, A. Bigot, E Boller, E Maire, C. Barat H. Klöcker: Constituent Particle Break-Up During Hot Rolling of AA 5182. *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* 2010, 12, No. 1–2.
- [54] Yulin Li, Lei Luo, Chaofei Han, Liangyun Ou, Jijie Wang, Chunzhong Liu: Effect of Fe, Si and Cooling Rate on the Formation of Fe- and Mn-rich Intermetallics in Al–5Mg–0.8Mn Alloy. *Journal of Material Science and Technology*, Vol 32, Nr. 4, April 2016, pp. 305–321.
- [55] Y.J. Li, L. Arnberg: Solidification structures and phase selection of iron-bearing eutectic particles in a DC-cast AA5182 alloy. *Acta Materialia* 52 (2004) 2673–2681
- [56] Y.J. Li, L. Arnberg: A eutectoid phase transformation for the primary intermetallic particle from $Alm(Fe,Mn)$ to $Al_3(Fe,Mn)$ in AA5182 alloy. *Acta Materialia* 52 (2004)

- [57] Gaofeng Li: Effect of trace elements V and Ni on Fe intermetallic phases formation and distribution in DC cast 5XXX series Al ingots, Université du Québec à Chicoutimi, Thesis, January 2012
- [58] Livhuwani Tessa Magidi: The study of intermetallic particles in aluminium alloy AA3401 canbody stock during homogenization. University of Cape Town. Masters Dissertation 2017.
- [59] D. T. L. Alexander & A. L. Greer: Nucleation of the $Al_6(Fe, Mn)$ -to- $\alpha-Al-(Fe, Mn)-Si$ transformation in 3XXX aluminium alloys. II. Transformation in cast aluminium alloys. *Philosophical Magazine*, Vol. 84. 2004, 28.
- [60] G. Mrówka-Nowotnik, J. Sieniawski, M. Wierzbińska: Analysis of intermetallic particles in AlSi1MgMn aluminium alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol 20, 1-2.
- [61] ZHANG Yonghao, ZHANG Zhiqing, Robert E. SANDERS, LIU Qing STUDY OF THE PHASE TRANSFORMATION FROM $(Fe, Mn)Al_6$ TO $\alpha-Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$ IN AA3401 ALUMINUM ALLOY DURING HOMOGENIZATION, *Acta Metallurgica Sinica*, Mar. 2012 pp.351–356
- [62] Livhuwani Tessa Magidi: The study of intermetallic particles in aluminium alloy AA3401 canbody stock during homogenization. University of Cape Town. Masters Dissertation 2017.
- [63] A. Bacha, D. Daniel, H. Klocker: Crack deviation during trimming of aluminium automotive sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1885–1897
- [64] A. Jenab, D. E. Green, A. T. Alpas: Microscopic investigation of failure mechanisms in AA5182-O sheets subjected to electro-hydraulic forming. *Materials Science & Engineering A* 691 (2017) 31–41.
- [65] R. Ravindran, K. Manonmani, R. Narayanasamy: An analysis of void coalescence in AL 5052 alloy sheets annealed at different temperatures formed under different stress conditions. *Materials Science and Engineering A* 507 (2009) 252–267
- [66] Xiaohua Hu, David S. Wilkinson, Mukesh Jain, Raja K. Mishra: The influence of particle shape, volume fraction and distribution on post-necking deformation and fracture in uniaxial tension of AA5754 sheet materials. *International Journal of*

Solids and Structures 46 (2009) 2650–2658

- [67] J. Sidor, K. Decroos, R. H. Petrov, L. A.I. Kestens: Evolution of recrystallization textures in particle containing Al alloys after various rolling reductions: Experimental study and modeling. *International Journal of Plasticity* 66 (2015) 119–137
- [68] K. Spencer, S.F. Corbin, D.J. Lloyd: The influence of iron content on the plane strain fracture behaviour of AA 5754 Al–Mg sheet alloys. *Materials Science and Engineering A325* (2002) 394–404.
- [69] K. Spencer, S.F. Corbin, D.J. Lloyd: Notch fracture behaviour of 5754 automotive aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A332* (2002) 81–90
- [70] J. Sarkar, T.R.G. Kutty, K.T. Conlon, D.S. Wilkinson, J.D. Embury, D.J. Lloyd: Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys . *Materials Science and Engineering A316* (2001) 52–59
- [71] A. Bacha, D. Daniel, H. Klockner: On the determination of true stress triaxiality in sheet metall. *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (2007) 273–287
- [72] Dr. Havovy Cama: Intermetallics and Aluminium for (Beverage) Cans. Alcan International Limited, Banbury Laboratory <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2002/havovy/hec.htm>
- [73] Szaltikov, Sz. A.: *Sztereometriceszkie metallografia*. Metallurgizdat, Moscow, 1958
- [74] DeHoff, R.T., Rhines, F.R.: *Quantitative microscopy*. McGraw Hill, New York 1968
- [75] Underwood, E.E.: *Quantitative Stereology*, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, Massachusetts (1970).
- [76] Gácsi Z. et al.: *Sztereológia és képelemzés*, Well-Press Kiadó Kft, 2001
- [77] Correlated Solutions: Speckle Generator, <https://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?/Knowledgebase/List/Index/13/utilities>, 2019.03.01
- [78] Réti T.: Mikroszkópos szövetképek alakotani hasonlóságának minősítése képelemzési eljárással. *BKL – Kohászat* 116. évf. (1983) 1. szám, 17-25.
- [79] Czinege I., Réti T.: Simple computerized methods for evaluation of orientation in digitized microscopic images. *Acta Stereologica* (1987) Dec. Vol. 6. Suppl. 3. p.579/584.
- [80] Czinege I.: Heterogén rendszerek kvantitatív mikroszkópiai jellemzőinek

értékelése. GÉP (1987) Nr.3. p.112/114.

- [81] **Szalai Sz.**; Czinege I.: Digital Image Analysis of Sheet Metal Testing and Forming. In: Viharos, Zs J (szerk.) 15th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics, Budapest, Magyarország: International Measurement Confederation (IMEKO), (2017) pp. 176-180.
- [82] **Szalai Sz.**, Czinege i. Dogossy G.: Nagyszilárdságú karosszéria lemezek alakíthatóságának vizsgálati lehetőségei, In: Dr. Csibi, Vencel-József (szerk.) OGÉT 2013 XXI Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Kolozsvár, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2013) pp. 367-371. , 5 p.
- [83] Harangozó Dóra, **Szalai Szabolcs**, Kozma István, Dogossy Gábor, Czinege Imre: Szakítóvizsgálat kontrakciós szakaszának kísérleti vizsgálata, Anyagvizsgálók lapja, 2021/I lapszám, ISSN 1215:8410, elfogadva
- [84] **Szalai Sz.**, Dogossy G.: Speckle pattern optimization for DIC technologies, Acta Technica Jaurinensis, elfogadva, <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00573>
- [85] **Szalai Sz**; Harangozó D; Czinege I: Characterisation of Diffuse and Local Necking of Aluminium Alloy Sheets Using DIC Technique. ACTA TECHNICA JAURINENSIS 12: 3 pp. 191-204. (2019)
- [86] **Szalai Sz**, Harangozó D, Czinege I.: Characterisation of Inhomogeneous Plastic Deformation of AlMg Sheet Metals During Tensile Tests. XII. Országos Anyagtudományi Konferencia (2019. október 13-15) kiadványa
- [87] **Szalai Sz.**; Czinege I.; Csizmazia Fné: Intermetallikus fázisok hatása az alumíniumlemezek alakíthatóságára. Bányászati és Kohászati Lapok-Kohászat 152: 2 pp. 27-31. (2019)