



ÓBUDAI EGYETEM
OBUDA UNIVERSITY

Anyagtudományok és
Technológiák Doktori Iskola

HABILITÁCIÓS ELJÁRÁS – TÉZISFÜZET

**Lágyacél szalagok törésvonalasságának kialakulása, jellemzői és kapcsolata a
nem folytonos rugalmas-képlékeny átmenettel**

Készítette: Dr. Mucsi András
egyetemi docens

Budapest, 2026.

Tartalom

I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI.....	3
Bevezető	3
A nem folytonos rugalmas-képlékeny átmenet jellemzői	3
A folyási jelenség kapcsolata a lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalassággal ...	6
A tématerület eddigi eredményei és a habilitációs dolgozat célkitűzései.....	11
II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	12
A lefejtőgörgő és a szalagfeszítés hatásainak kísérleti vizsgálata	12
A makroszkópikus törésvonalak keletkezésének mechanizmusai.....	14
A makroszkópikus és mikroszkópikus törésvonalak jellemző megjelenési formái	18
A makroszkópikus törésvonalak felülettopográfiai jellemzői	20
A mikroszkópikus törésvonalak tulajdonságai	24
Összefoglalás.....	27
Tézispontok	28
III. A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA.....	29
IV. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA	30
V. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	31
VI. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	32

I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

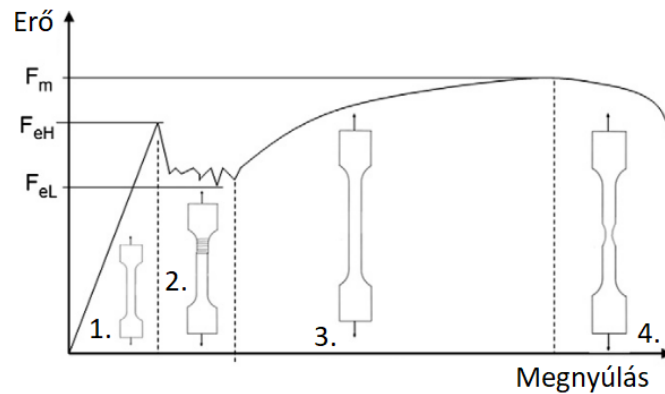
Bevezető

A nem folytonos rugalmas-képlékeny átmenetet mutató anyagok képlékeny alakításakor lokalizált deformációs sávok, ún. folyás- vagy törésvonalak jöhetnek létre. Jelen tanulmány a melegen hengerelt lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalasságra fókuszál. Az acélszalagok feldolgozása, bevonatolása és a késztermék gyártása során esztétikai hibának minősülnek a lokális alakváltozási sávok, emiatt kiemelt szerephez jut kialakulásuk megelőzése. A felületi alakváltozási sávok a lágyacélokra jellemző nem folytonos rugalmas-képlékeny megfolyási mechanizmus (továbbiakban folyási jelenség) jelenléte miatt alakulnak ki. Keletkezésük a melegen hengerelt acéltekercs lefejtésekor illetve a lefejtett szalag gyártósoron belül egyes gépegységeken való áthaladása közben történik. A törésvonalak makroszkópikus megjelenési formájukat tekintve eltérő szélességű és hosszúságú, váltakozó fényes-matt sávok, melyek nagyrészt keresztirányban, a hengerlési irányra merőlegesen helyezkednek el. A matt sávokon belül erőteljesen lokalizált mikroalakváltozási sávok, ún. mikro-törésvonalak helyezkednek el. Jelen dolgozatban a törésvonalak geometriai és topográfiai jellemzőit elemzem, valamint vázolom a lehetséges keletkezési mechanizmusokat. A dolgozatban található információk, adatok és megfigyelések az MSZ EN 10111:2008 szerinti DD11-14, MSZ EN 10130 szerinti DC01 és DC03 valamint az MSZ EN 10025-2:2019 szerinti S235JR+N minőségek vizsgálatai alapján születtek. Az S235 minőség ugyan nem a lágyacélok csoportjába, hanem a szerkezeti acélokéba tartozik, de a tapasztalatok alapján nagyon hasonlóan viselkedik, mint a lágyacél minőségek. A tárgyalt jelenségek ugyanakkor átültethetők nem európai szabványnak megfelelő, de hasonló kémiai összetételű és gyártástechnológiájú melegen valamint hidegen hengerelt és lágyított állapotú acélszalagokra is.

A nem folytonos rugalmas-képlékeny átmenet jellemzői

Egyes fémek anyagok rugalmas-képlékeny átmenetére jellemző folyási jelenséget először több, mint 120 évvel ezelőtt megjelent publikációkban közölték [Piobert és tsai, 1842], [Lüders, 1860], [Hartmann, 1896]. A jelenség leglátványosabb formában szakítóvizsgálat során figyelhető meg. Lágyacélok tekintetében a jelenség magyarázatát először kielégítően Cottrell és Bilby [Cottrell és Bilby, 1949] adta meg. A jelenség hátterében a diszlokációkat rögzítő interstíciós atomok jelenléte, illetve a megfolyás pillanatában a diszlokációk ezen rögzítőatomokról való leszakadása van. A dolgozatban tárgyalt lágyacélok tipikus szakítódiagramja az 1. ábrán látható. A vizsgálat során a rugalmas szakasz (1. ábra, 1. szakasz) lineárisnak tekinthető, a felső folyási határ elérése előtt (1. ábrán F_{eH} erőérték) viszont már egy nagyon kismértékű nemlinearitás is megfigyelhető, mely a maradandó diszlokációmozgás eredménye. A felső folyási pont elérése után egy hirtelen erőcsökkenés majd a próbatest

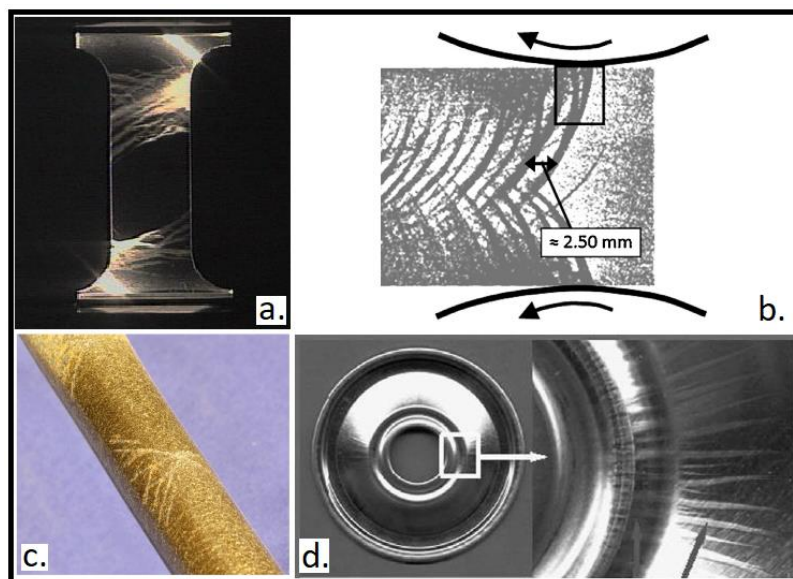
lokalizált alakváltozása/megfolyása történik (2. szakasz). Ez a lokalizált alakváltozási jelenség addig folytatódik, amíg a próbatest teljes egészében képlékenyen meg nem folyt.



1. ábra: Lágyacélok szobahőmérsékleten végzett szakítóvizsgálatának tipikus erő-megnyúlás diagramja

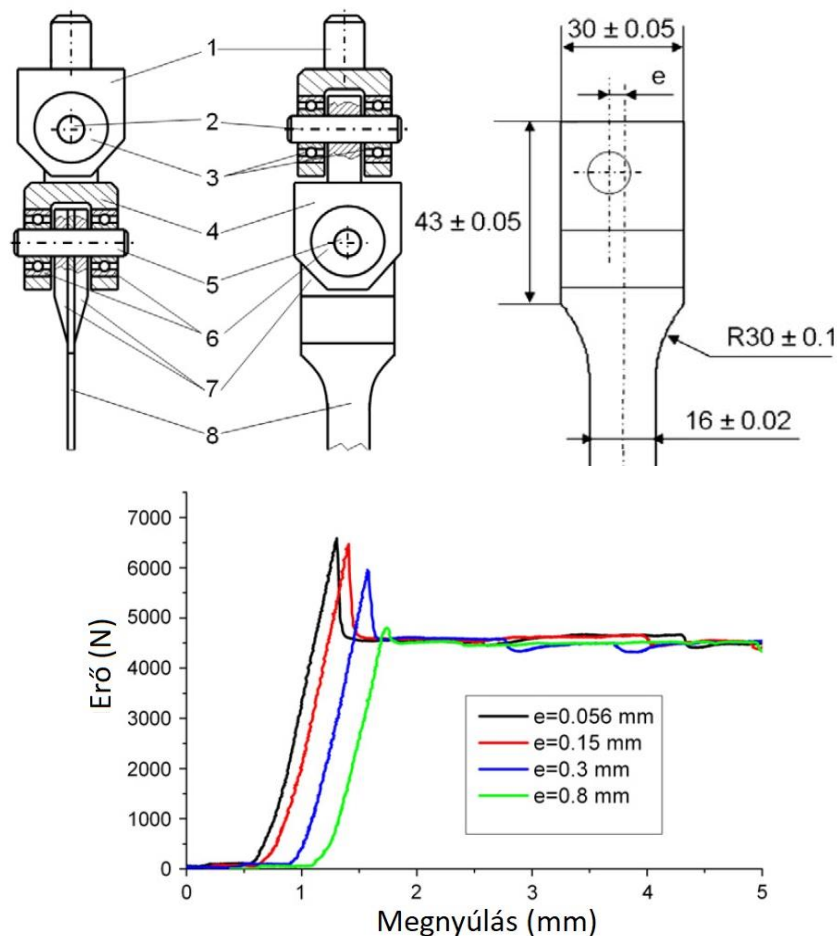
A még rugalmas állapotban lévő térfogatrészek képlékeny megfolyását a rugalmas és képlékeny térfogatrész közti geometriai eltérésből adódó feszültségkoncentráció eredményezi, mely látszólag az F_{eL} -nél valamivel nagyobb erőértékeknél, de az abból számolt egytengelyű feszültségnél nagyobb lokális feszültség szinten történik meg. A próbatest teljes mérőszakaszának képlékeny átmenete után elkezdődik az egyenletes alakváltozás szakasza (3. szakasz).

A szakítóvizsgálat során tapasztalt folyási jelenség más képlékenyalakító műveleteknél is megfigyelhető. A lokális alakváltozási sávok jelenléte a legtöbb esetben kerülendő, mert az esetek döntő többségében esztétikai hibának minősülnek vagy akár mechanikai károsodás kiindulópontjaként is kifejtetik hatásukat.



2. ábra: A folyási jelenség miatt kialakult lokális alakváltozási sávok szakítóvizsgálat (a.) [Meier, 2026], dresszírozó hengerlés (b.) [Giarola és tsai., 2015], csőhajlítás (c.) [Hallai és Kyraikides, 2011] valamint nyújtvahúzás (d.) [Barisic és tsai., 2008] során

Meg kell jegyezni, hogy a folyási jelenség körüli jelenségek tisztázását nagyban árnyalja az a tény, hogy a szakítóvizsgálatból megállapítható felső folyáshatár értéke függ a terhelésátadás centrikusságától [Davis, 2004], [Docherty és Thorne, 1931], [Gray és McCombe, 1992], [Hutchinson, 1957], [Sun és tsai, 2006]. Emiatt meglehetősen nehéz olyan vizsgálati körülményeket biztosítani, melyek segítségével tiszta képet kaphatunk a törésvonalasság és a szakítóvizsgálati jellemzők alakulása között [Hutchinson, 1957], [1]. A jelen kutatás előzményeként tekinthetünk a lemez formájú szakító-próbatestek tiszta, egytengelyű igénybevételt lehetővé tévő befogórendszer kifejlesztésére és az azzal végzett mérésekre. Ezt a befogórendszert, valamint a vele végzett mérési eredményeket a következő ábra foglalja össze.



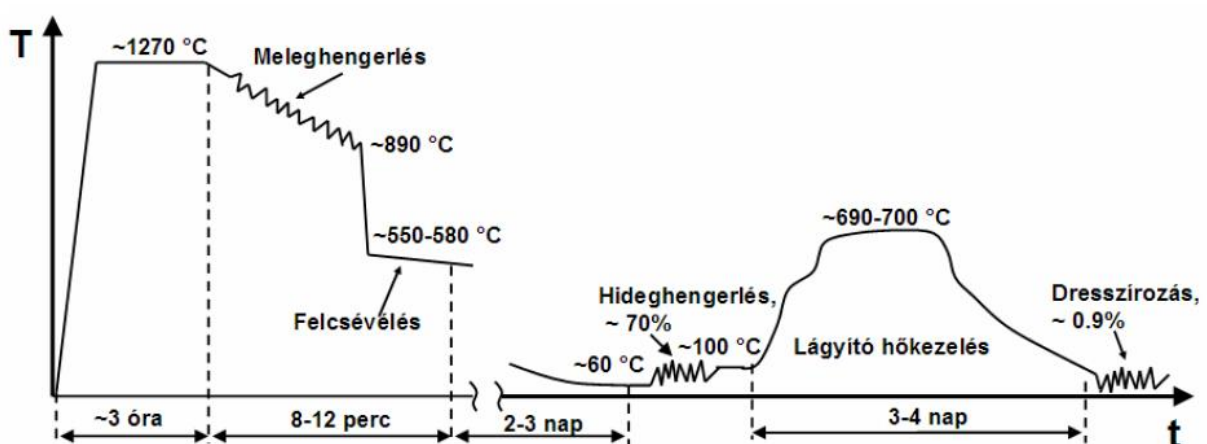
3. ábra: Lemez próbatestek felső folyási határának pontos mérésére kifejlesztett befogórendszer, a terhelési excentricitás definíciója valamint hatása a szakítódiagram kezdeti szakaszára [1]

A befogórendszer működésének lényege, hogy a szakítógépet és a próbatest között a terhelésátadás nem súrlódással, hanem a próbatestre ragasztott ékes terhelésátadó lemezekkel, azaz adhéziós kötéssel keresztül történt. Ezenkívül a gép befogókészüléke és a próbatestre ragasztott terhelésátadó lemezek között egy kétszeres kardáncsukló biztosította a próbatestben

a gyakorlatilag hajlítófeszültség mentes felterhelést. Amennyiben a 3. ábrán látható „e” excentricitás értéke zérus, akkor gyakorlatilag tiszta húzóigénybevétel keletkezik mellett történik a vizsgálat. Ugyanakkor ahogyan az az ábrán is látható, az „e” terhelési excentricitás növelésével a mért felső folyási erő (ezzel a számolt felső folyáshatár is) jelentős mértékben csökken. Ez annak hatására következik be, hogy a terhelésátadás excentrikusságának növelésével hajlítófeszültség keletkezik, mely a próbatest egyik oldalán hozzáadódik, míg a másik oldalán levonódik a húzófeszültség értékéből. Így zérustól különböző „e” excentricitás esetén a felső folyási erőből számolt feszültségnél jóval nagyobb keletkezik a próbatest megfolyásának környezetében. A próbatest megfolyása után annak szimmetriatengelye a nagy képlékeny alakváltozás miatt nagyrészt beáll a húzás tengelyébe.

A folyási jelenség kapcsolata a lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalassággal

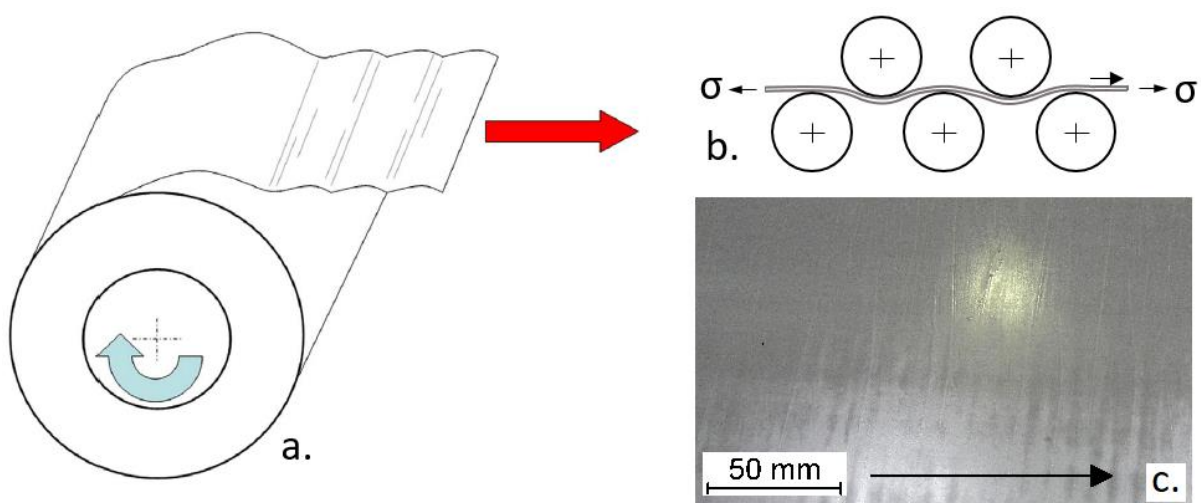
A folyási jelenség meghatározó szerepet tölt be a melegen hengerelt acélszalagok feldolgozása során is, mert az ehhez köthető technológiai folyamatok során előfordulhat az acélszalag bizonyos részeinek lokális alakváltozása. Az acéltekercsek főbb gyártási lépései a nyersvas és acélgyártás, folyamatos öntés, meleghengerlés illetve ezt követően a melegen hengerelt acéltekercs feldolgozása. Ez lehet melegen hengerelt állapotban történő darabolás vagy hasítás, a tekercs pácolása majd pácolt állapotban darabolás, hasítás, bevonatolás illetve hideghengerlés. Az acélszalag hidegen hengerelt állapotban történő felhasználása viszonylag ritka, de nem kivételes. Hidegen hengerelt állapotban lágyítás, lágy állapotban történő felhasználás illetve bevonatolás is történhet. A lágyacél szélesszalagok tipikus gyártási technológiájának összefoglaló idő-hőmérséklet diagramja az alábbi ábrán látható.



4. ábra: A lágyacél szélesszalagok gyártástechnológiájának tipikus idő-hőmérséklet függvénye [2]

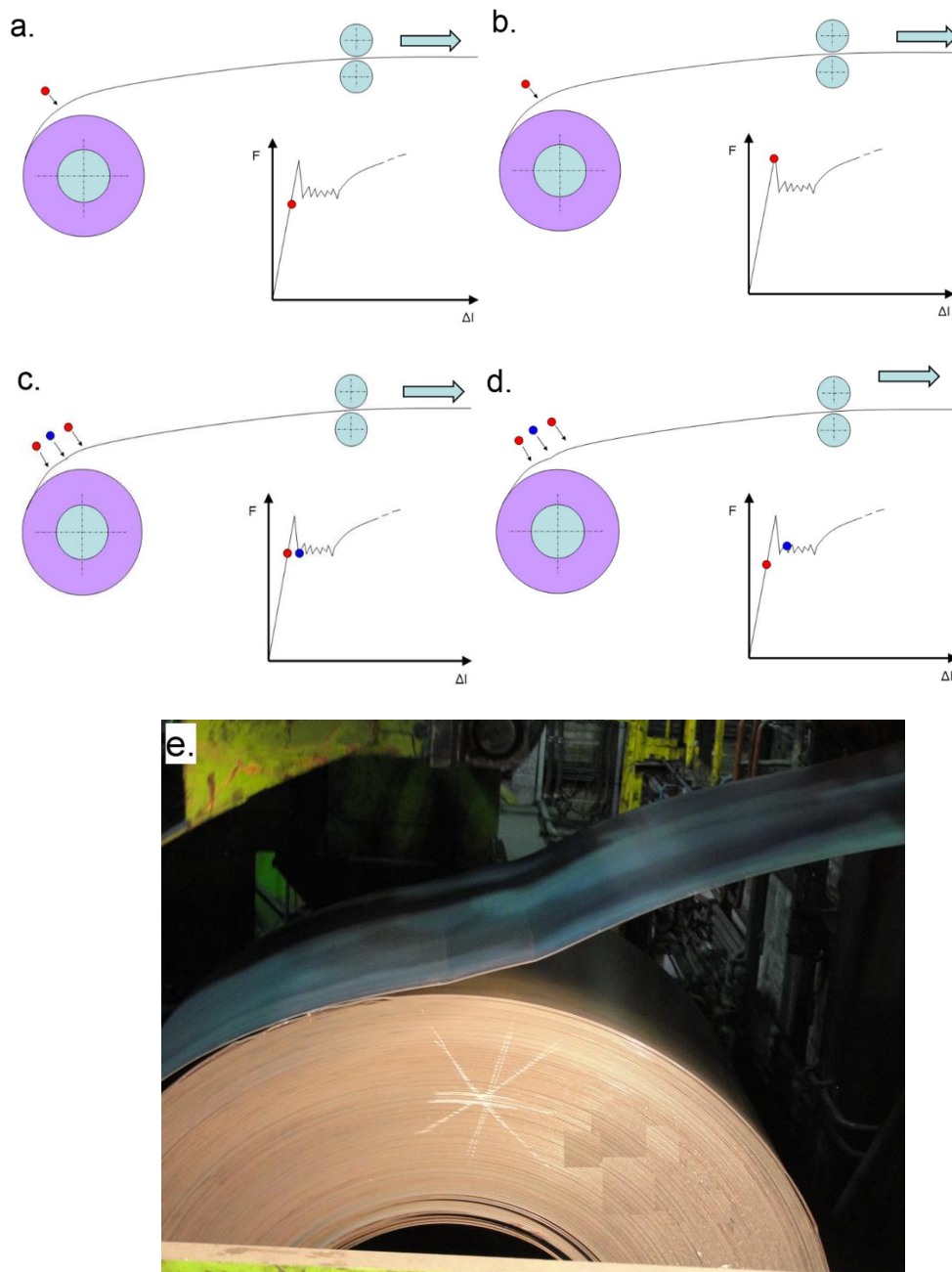
A folyamatosan öntött brammákat gáztüzelésű kemencékben 1230-1250 °C-os hőmérsékletre hevítik, melyhez kb. 2-3 óra hevítési idő tartozik. A brammák tipikus méretét 200-250 mm vastagság, 800-2000 mm szélesség és 8-10 m hossz jellemzi. Az előmelegítés után a brammák előnyújtása következik, melynek során 20-30 mm közötti vastagságra hengerlik 5-13 szúrásban (a szúrásszám szélességtől, minőségtől és az előnyújtó berendezés műszaki képességeitől függ). Az előnyújtás végén az előhengerelt szalag 1050-1100 °C-os hőmérsékletű, a hossza elérheti a 70-80 métert. Ebben az állapotban egyrészt helytakarékoság, másrészt hőmérsékletkiegyenlítés céljából az előhengerelt szalagot felcsévélik az előlemez felcsévélőben, melyet üzemi körülmények között az idegen nyelvű elnevezéssel egyezően „coil box”-nak neveznek. A felcsévélést követően kb. 10-20 másodperccel megkezdődik a szalag lefejtése, és a készrehengerlő sorban 5-7 egymás után elhelyezett hengerállványban a szalag készméretre hengerlése. A készrehengerlés során 1020-1050 °C-os kezdő, majd 830-890 °C-os véghőmérséklet jellemző. Az utolsó hengerállványból kilépő szalagot nem a hengerlési véghőmérsékleten csévélik fel, hanem a hengerállványból kilépve a szalag alsó és felső felületét vízszugárral hűtve 500 és 750 °C közötti hőmérsékleten. Ezzel az ausztenit-ferrit átalakulást befolyásolva a szövetszerkezet, ezáltal a mechanikai és egyéb tulajdonságokat (pl. zománcozhatóságra való alkalmasság) szabályozzák. A kimondottan képlékeny alakításra szánt minőségeknél tipikusan 600 °C alatti a csévélési hőmérséklet.

A technológiai folyamatok közül a melegen hengerelt, ritkábban a lágyított tekercs lefejtése (darabolás, hasítás vagy pácolás céljából) illetve görgős egyengetése az, amely lokalizált alakváltozási sávok, ún. törésvonalak létrejöttéhez vezet. Ahogyan a 2. ábrán bemutatott alakítási műveleteknél, úgy ezeknél is felületi egyenetlenség formájában és esztétikai hibaként jelentkezik a lokalizált alakváltozás. A tekercs lefejtésének és görgős egyengetésének elvi vázlatja az 5. ábrán látható.



5. ábra: A tekercs lefejtése (a.) [3] görgős egyengetése (b.), a törésvonalak melegen hengerelt pácolt és olajozott felületű szalagon (c.). Az ábrázolt nyilak a hengerlési irányba esnek.

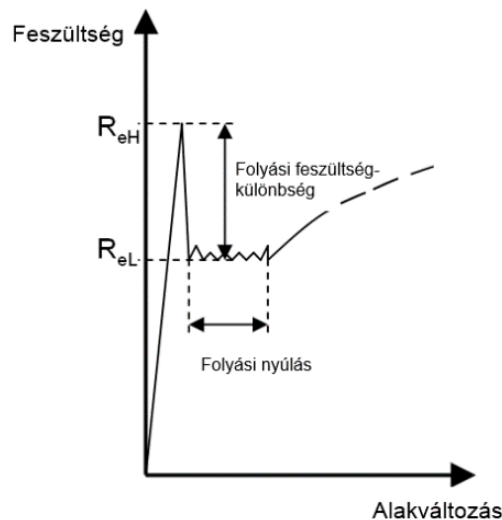
A dolgozatban tárgyalt törésvonalak a hengerlési irányra közel merőleges, a szalag egy részén, vagy akár teljes szélességében jelentkező matt-fényes sávok sokasága, melyek optikai és geometriai különbözőséget mutatnak. A törésvonalak olyan anyagoknál alakulhatnak ki, melyek markáns, nem folytonos rugalmas-képlékeny átmenettel rendelkeznek, azaz a felső-alsó folyáshatár közt jelentős (minimum 20-30 MPa) különbség van. A törésvonalak kialakulásának részfolyamatait a tekercs szabad lefejtése során az alábbi ábrásorozat mutatja [4].



6. ábra: A törésvonalassági hiba keletkezésének egyik mechanizmusa a tekercs szabad lefejtése során (a.-d.) [4], a jelenség ipari körülmények között (e.)

A szalag lecsévélése során a szalag próbálja megtartani eredeti görbületét. Megjegyzendő, hogy a szalag eredeti görbülete több tényezőtől függ, a legjelentősebb faktorok a meleghengerlés végén alkalmazott csévélési hőmérséklet, a lemezvastagság és az aktuális menet pozíciója a tekercsen belül. A szalagot általában néhány (5-10) MPa előfeszítés mellett csévélik le. A szalag kiegyenesedését okozó hajlítófeszültség egy adott keresztmetszetben, a felületi rétegben eléri a felső folyási feszültséget. Ebben a pillanatban a felülettől indulva az lemez középvonala felé haladva egy kis sávban az anyag megfolyik, kiszélesedik, azaz lokális alakváltozás történik. Ezek után a megfolyt sáv már az alsó folyási feszültség hatására is alakváltozni képes, az alakváltozást pedig külső terhelés és a környező térfogatrészek rugalmas alakváltozási energiája tartja fenn. Az alakváltozott térfogatrész ún. képlékeny csuklóként viselkedik a továbbiak során, tehát az alakváltozás elindításához és fenntartásához szükséges feszültség kisebb, mint a környező térfogatrészekben. A szalag további lefejtésekor a képlékeny csukló eltávolodik a tekercstől, és egy újabb, rugalmas alakváltozás alatt lévő tekercszakasz kerül a helyére, miáltal folytatódhat az instabil rugalmas-képlékeny alakváltozási folyamat. Az 5. b. ábra szerinti húzvaegyenesítés során hasonló részfolyamatok mennek végbe, a még meg nem folyt térfogatrészek kis rádiuszon (gyakorlatban 60-100 mm) történő többszöri meghajlítása apróbb törésvonalak kialakulásához vezet.

A törésvonalak keletkezésének szükséges, de nem elégséges feltétele, hogy az acél folyási jelenséget mutasson. A 7. ábrán bemutatott lágyacélokra jellemző szakítódigram kezdeti szakaszán a folyási jelenség két legfontosabb paramétere, a felső-alsó folyáshatár közti különbség, valamint a folyási nyúlás látható [4].



7. ábra: A folyási jelenség két fő paramétere lágyacél szakítódigramján értelmezve [4]

A folyamat természetét tekintve annál intenzívebb törésvonal képződésre lehet számítani, minél nagyobb a felső-alsó folyáshatár közti különbség és minél nagyobb a folyási nyúlás mértéke. A két paraméter közül a felső-alsó folyáshatár közti különbség a meghatározó, ugyanis a képlékenyen megfolyt sáv alakváltozását a környező térfogatrészek rugalmas alakváltozási

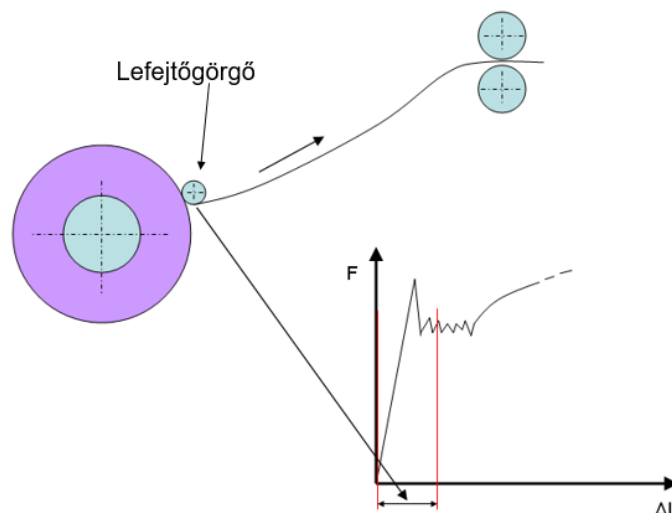
energiája biztosítja. Ez utóbbi viszont arányos a felső-alsó folyáshatár közti különbséggel. Kis felső-alsó folyáshatár közti különbségnél a rugalmas-képlékeny átmenet folytonosabb, egy-egy feszültségesség után kismértékű képlékeny deformáció jön létre. A felső-alsó folyási feszültség közti különbséget az acél interszticiós ötvözőtartalma, szemcseszerkezete, szemcsemérete valamint a szövetszerkezet inhomogenitása határozza meg.

A törésvonalak egy-egy acéltekercsen belül változó geometriai méretekkel, sűrűséggel és vizuális megjelenéssel rendelkeznek. Kialakulhatnak a szalag hossza mentén bárhol, vagy akár a szalag teljes hossza mentén. A szalagon keresztirányban is változó eloszlást mutathatnak, viszont meg kell jegyezni, hogy a szalagok szélső 20-40 mm-es sávjában ritkán fordulnak elő. Ennek oka több tényező együtteseként alakul ki, de főként annak köszönhető, hogy ebben a régióban a szalag belsőbb részeihez képest nagyobb folyáshatár, nagyobb diszlokáció sűrűség, vegyes (erősen eltérő méretű kristallitokból álló) szemcseszerkezet és kisebb képlékenységgű alapanyag a jellemző, melyet a szalag szélének meleghengerlés közbeni lehülése eredményez.

A törésvonalasság mint felületi hiba kialakulásának megelőzésére többféle technika adódik. A megelőzési módszerek három csoportra oszthatók:

1. metallurgiai illetve hengerléstechnológiai úton olyan szövetszerkezet a létrehozása, melynek rugalmas-képlékeny átmenete folytonos, vagy közel folytonos, továbbá törekvés a szalag és tekercs alakhibáinak minimalizálására;
2. mechanikai úton, melynek során a tekercs lefejtése közben egy úgynevezett lefejtőgörgővel (processz-, vagy ACB-görgőnek is nevezik az angol anti-coil break roll kifejezés rövidítéseként) folytonossá, vagy közel folytonossá teszik a lemez alakváltozását.

Az ipari gyakorlatban az alumíniummal csillapított lágyacél szalagoknál a metallurgiai módszerek korlátozottan alkalmazhatók, mert a folyási nyúlás megszüntetésével/minimalizálásával járó metallurgiai eljárásoknak vagy jelentős gyártási többletköltsége, vagy alkalmazásuk eredményeképp nemkívánatos mechanikai tulajdonságváltozás lép fel (a lemezanyag alakíthatósága csökken, különösen a szalag széleinél). Emiatt az ipari gyakorlatban a mechanikai úton történő megelőzést alkalmazzák, melynek sajnos a metallurgiai módszerekhez hasonlóan műszaki és technológiai korlátai vannak. A mechanikai úton történő megelőzés abból áll, hogy a tekercs lefejtése közben az éppen lefejtés alatt lévő tekercsszakaszra közvetlenül a lemez tekercstől való elválásának pozíciójába egy kis átmérőjű (100-150 mm) lefejtőgörgőt helyeznek. Erre a kis átmérőjű görgőre ráfeszítve a szalagot egy olyan mértékű folytonos alakváltozást hoznak létre, hogy a továbbiakban erőteljes alakváltozás lokalizációra a folyási szakasz csökkenése miatt már nem lesz lehetőség. Ennek elvét a 8. ábra mutatja.



8. ábra: A melegen hengerelt tekercs lefjtésekör keletkező törésvonalasság megszüntetését célzó lefjtőgörgő elhelyezése és hatása

A tématerület eddigi eredményei és a habilitációs dolgozat célkitűzései

A tématerület kidolgozása során az alábbi vizsgálatokat végeztem, melyek közül a terjedelmi korlátokat és a munka tudományos jellegét figyelembe véve a jelen dolgozat keretén belül az alábbiakban felsoroltak közül csak néhány kerül kiemelésre:

1. A törésvonalasság és az acélminőség kapcsolatának elemzése.
2. Kémiai összetétel hatásának elemzése, kísérletek mikroötvozőkkel (Ti, B), ezek hatásának elemzése.
3. A meleghengerlés technológiai paramétereinek elemzése, előmelegítés, előnyújtás hőmérsékleteinek, fogyásainak hatása, előhengerelt lemez készrehengerlési hőmérsékleteinek és fogyásainak elemzése, kísérletek végrehajtása, metallurgiai és alakítástechnológiai módszerek tesztelése.
4. A melegen hengerelt tekercs és szalag geometriai jellemzőinek (vastagság, szélesség, csévélési hőmérséklet, sebesség és szalagfeszítés, lefjtett szalag geometriai hibáinak) vizsgálata.
5. Logisztikai paraméterek, a gyártásütemezés (tekercshőmérsékletek) feldolgozási időpontok, különböző gyártósorok és azok jellemzőinek vizsgálata.
6. A törésvonalasság detektálási módszereinek, a minősítés megbízhatóságának és ez utóbbi valamint a gyártási paraméterek összefüggésének vizsgálata.
7. Elektronikus eszköz fejlesztése és tesztelése a törésvonalak optikai reflexióképessége alapján történő detektálására.
8. Szoftver és detektálási algoritmus fejlesztése a gyártósori felületellenőrző rendszer által alkotott felvételek elemzésére.

9. A gyártósorok paramétereinek (gépészeit jellemzők, szalagfeszítés, sebesség, ACB görgő beállítás és vezérlés, húzvaegyengetés paramétereinek) vizsgálata. Gyártósori módosítások végrehajtása, ACB görgő gépészeti módosítása, vezérlés kiépítése.
10. A lefejtési folyamat végeselemes szimulációja homogén anyagszerkezet mellett a folyási jelenség időfüggő jellemzőitől eltekintve.
11. Kísérleti lecsévélő berendezés készítése, a vizsgálatok módszertanának kidolgozása és a kísérletek végrehajtása. A keletkezési mechanizmusok vizsgálata.
12. Törésvonalas mintalemezek makro és mikroszkópi vizsgálata, felülettopográfia felvétele és elemzése, kapcsolata a gyártási jellemzőkkel és a kialakulás mechanizmusával, az alakváltozás lokalizációjának vizsgálata, mikro törésvonalak vizsgálata.

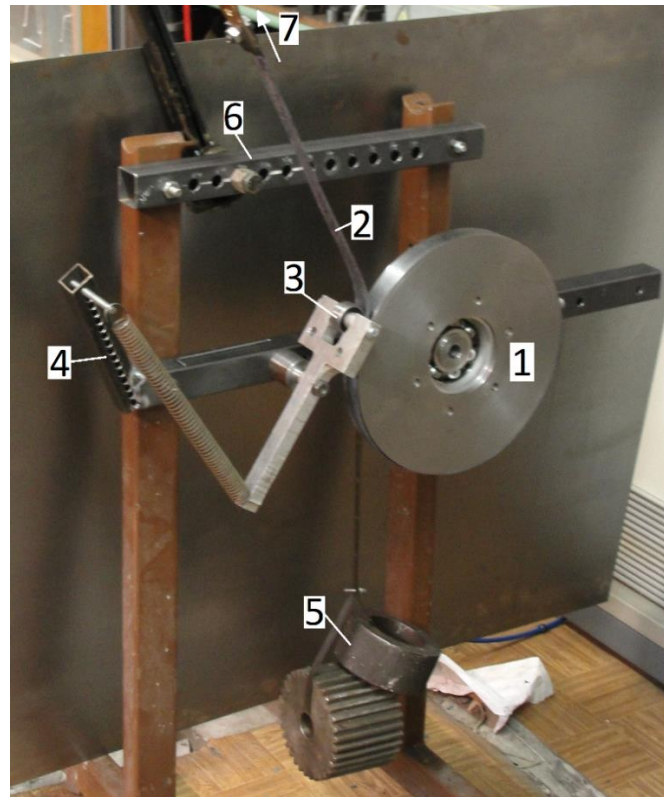
A jelen dolgozatban a felsorolt tématerületek közül a 11. és 12. pontban leírtakat részletezem. Tekintettel a bevezetőben már definiált DD11-14, S235JR valamint ezekkel ekvivalens minőségek globális acélpipari keresletére az itt feltüntetett adatok nagyrészt a 2,50-3,20 mm-es lemezvastagság tartományban, valamint az 1000-1500 mm-es szalagszélesség tartományban voltak vizsgálva. Megjegyzendő, hogy nagyon hasonló mechanizmusok és jelenségek figyelhetők meg a 1,20-2,50 mm-es valamint a 3,20-4,50 mm-es lemezvastagság tartományban, természetesen a lemezvastagság okozta mikroszerkezeti és alakváltozási jellemzők eltéréseket okoznak.

II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

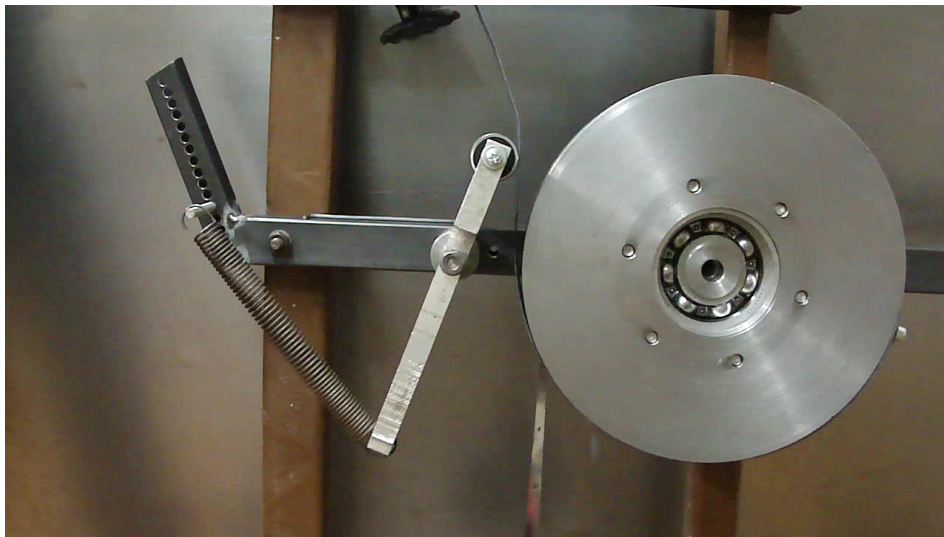
A lefejtőgörgő és a szalagfeszítés hatásainak kísérleti vizsgálata

A tekercs lefejtése közben történő alakváltozás fizikai modellezésére egy kísérleti lecsévélő berendezést építettem, melynek segítségével egy melegen hengerelt tekercs lefejtése közben történő törésvonal képződés mechanizmusait tudtam feltárni. A későbbiekben, 12-14. ábrán bemutatott mechanizmusok a kísérleti lecsévélő segítségével végzett kísérletek videofelvételeinek és helyszíni megfigyelések alapján kerültek megfogalmazásra. A kísérleti lecsévélő minden tekintetben a valóságos méretek harmadrészében készült el, emiatt a valóságos folyamatok nem tökéletesen, csupán azok meglehetősen jó reprezentációjaként követhetők le vele. A kísérleti lecsévélő berendezés valamint az egyik kísérleti lemezcső lecsévélés közben a 9. ábrán látható. Legfőbb szerkezeti része a tekercs testét jelentő 300 mm átmérőjű tárcsa (1), melynek homloklapfelületére rögzítjük a tekercs külső menetét reprezentáló, lefejtendő lemezívet (2). A lefejtés közbeni alakváltozások modellezése 1 mm vastag, 30 mm széles és 400-600 mm hosszú lemezcsíkokat használtam. A lemezcsíkok egy hidegen hengerelt DC01 alapanyagból hengerlési irányba lettek kimunkálva, ezután a tekercset reprezentáló tárcsa

ívének megfelelően meghajlítva, majd ebben a hajlított állapotban kilágyítva 650 °C 20 perces hőkezelés segítségével. Így a kísérleti lemezcsíkok termomechanikai állapota egy éppen lefejtés alatt lévő, melegen hengerelt és felcsévélt alapanyagot közelített meg.



9. ábra: A kísérleti lecsévélő berendezés



10. ábra: A kísérleti lecsévélő berendezés lecsévélés és törésvonal képződés közben

Az ACB görgő feladatát egy 40 mm átmérőjű, 30 mm széles csapágy látta el (3), melyet egy változtatható előfeszítésű (4) rugó karos áttételen keresztül szorított a lefejtés alatt lévő lemezszalaghoz. A rugó előfeszítésének változtatásával lehetett az ACB görgő nyomását változtatni. A lefejtendő szalag feszítését a tekercset reprezentáló lefejtőtárcsa belső kerületén

elhelyezett acélszalag által lecsévélés közben felemelt súlyterhelés (5) jelentette. A súlyterhelés a kép alsó részén látható furatokkal ellátott acélszalagon volt felfüggesztve. A lemezív lefejtési szögét, ezzel az ACB görgőn való érintkezés ívét a lefejtést végző lineáris csavarorsós mechanizmus pozíciója határozta meg, melynek helyzetét a (6) furatokkal ellátott zártszelvényben való rögzítéssel lehetett beállítani. A lineáris csavarorsós mechanizmushoz a szalag a (7) állítható csavaros kötésnél csatlakozott és biztosította a lefejtési szög közel állandó értékén tartását.



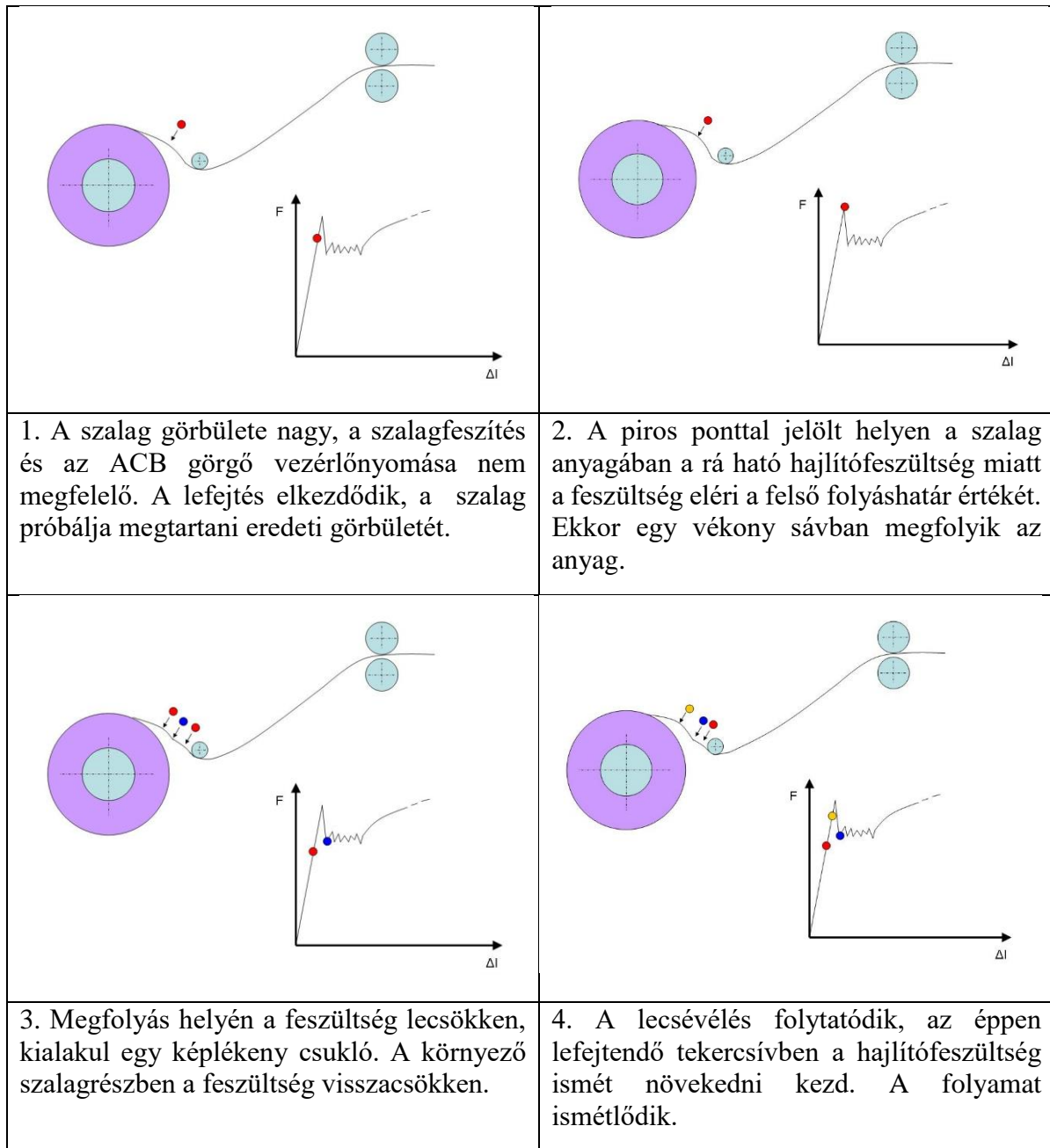
11. ábra: A kísérleti lecsévélővel lecsévélte törésvonalas kísérleti lemezcsík

A kísérleti lecsévélő berendezés segítségével kikísérleteztem azokat a paraméterkombinációkat, mely a lefejtendő lemezív folytonos alakváltozását biztosítja. Ezeket a megfigyeléseket az ipari gyakorlatba átültetve eredményesen sikerült a törésvonalassági hiba mértékét csökkenteni. A kísérleti lecsévélő nem csupán a téma műszaki tartalmának felgöngyölítésére, hanem oktatási célú videofelvételek készítésének célját is szolgálta.

A makroszkópikus törésvonalak keletkezésének mechanizmusai

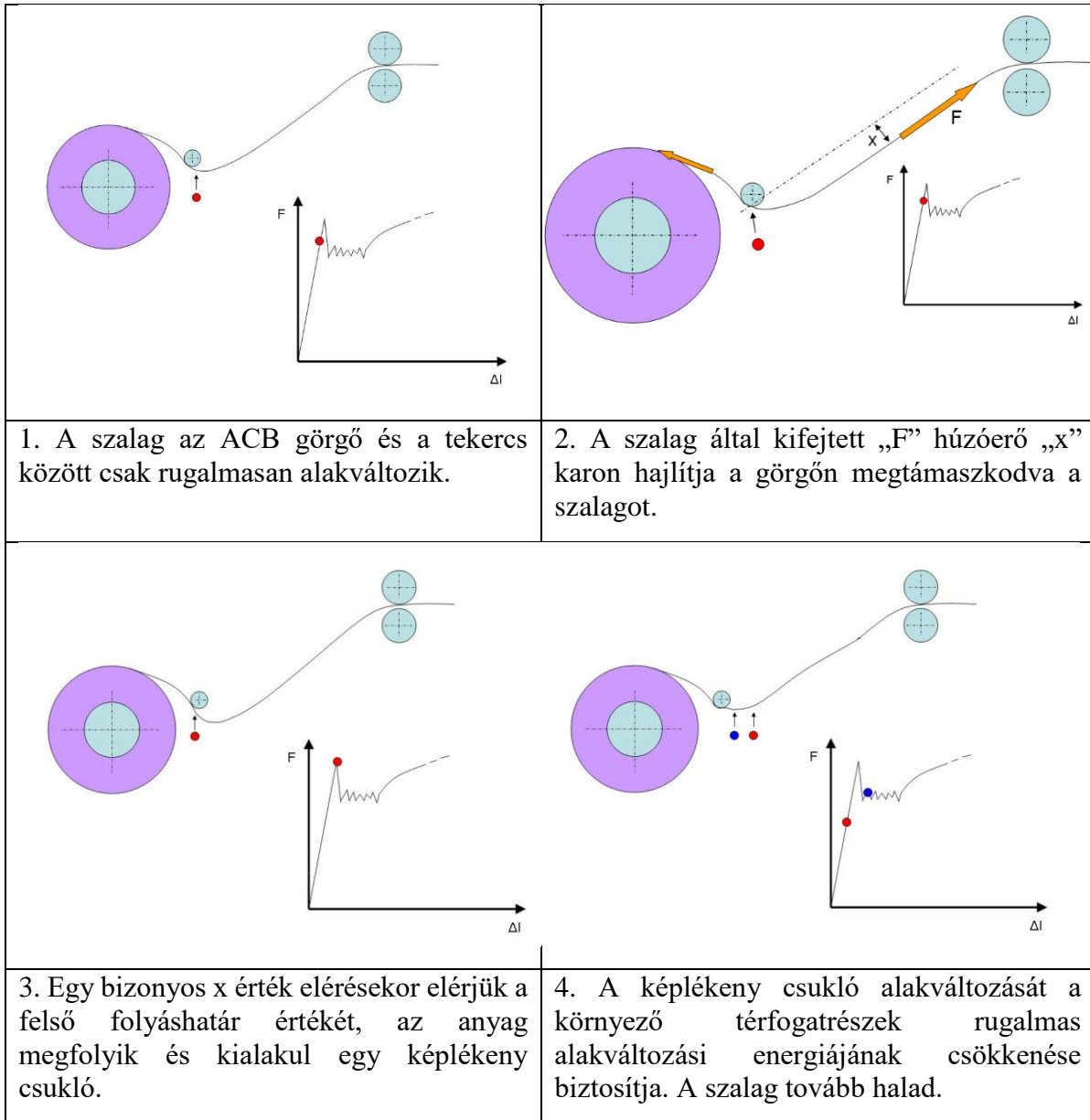
A kísérleti lecsévélővel végzett vizsgálatok tapasztalatai alapján három féle mechanizmust sikerült megkülönböztetni. A mechanizmusokat a szalagfeszítés és a lefejtőgörgő leszorítóereje alapján lehet csoportokba sorolni. A lefejtőgörgő alkalmazása a 8. ábra szerinti elrendezésben viszonylag ritkán oldható meg, gondolva itt arra a lényeges körülményre, hogy gépészeti szempontból nem mindig oldható meg a görgő szalag elválási pontjába azaz tekercs felületére történő rászorítása. Egyrészt azért, mert a tekercs felpörgetésekor a szalag haladásából adódó tömegeerők a görgőt elnyomják a felülettől, habár ez megfelelő szabályzással kezelhető lenne. Másrészt inkább abból a nem elhanyagolható tényből, hogy a tekercs geometriája és csévélési pontossága nem egy geometriailag tökéletes hengert reprezentál, melynek eredménye az, hogy a lefejtés közben jelentős radiális és axiális rezgések, ütések, periodikus és nem periodikus mechanikai igénybevételek lépnek fel. Emiatt a lefejtőgörgőt a tekercs felületétől 20-200 mm-es távolságban tartva történik a lefejtés. Ebben a pozícióban is előfordulhat a törésvonalak képződése, az alábbi ábráknak megfelelő mechanizmusok szerint. A 12. ábrán azt az esetet vizsgáljuk meg, amikor a szalag görbülete meglehetősen nagy, a szalagfeszítés viszont a

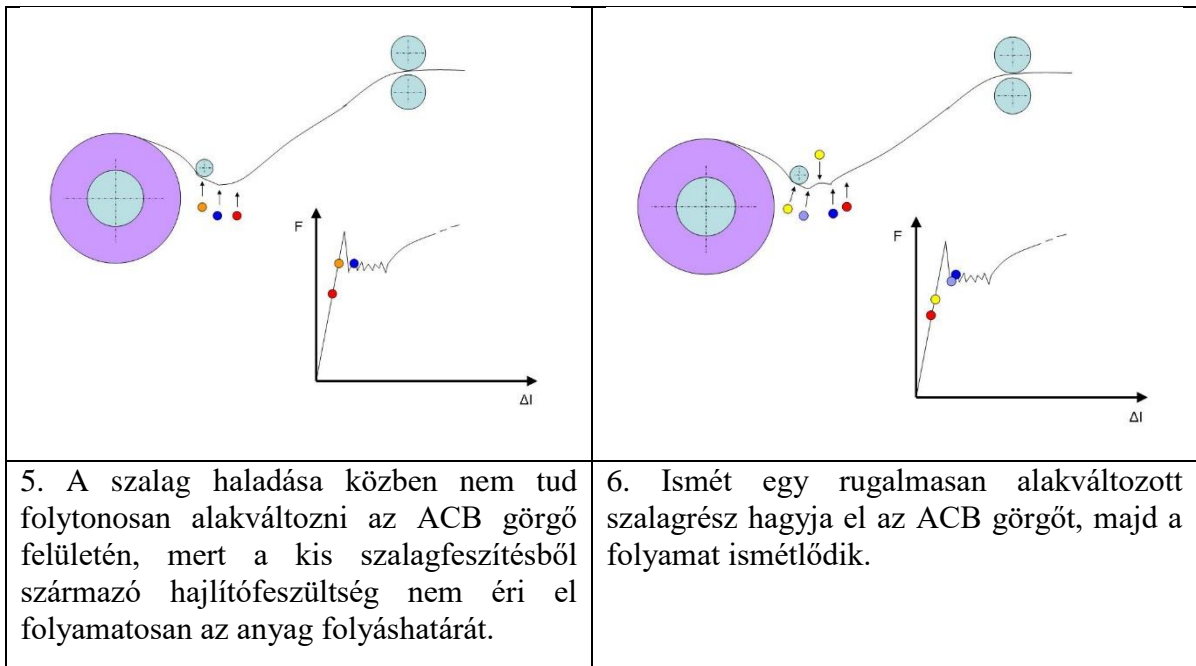
szokásosnál (5-10 MPa) kisebb, valamint az ACB görgőt vezérlő nyomás is kicsi (ez a nyomás az alkalmazott hidraulikus munkahenger átmérőtől függ). A nagy kezdeti szalaggörbület akkor áll elő, ha a melehengerlést követően a szalag nagy csévélési hőmérsékleten (650 °C felett) volt felcsévélve, ekkor a felcsévélésnél és az azt követő lehűlésnél jelentős alakváltozást szenved a szalag. Ez abban nyilvánul meg, hogy a tekercs görbületét ugyan nem teljesen, de nagymértékben leköveti a szalag, és ezt a lecsévélésnél megtartani igyekeznek.



12. ábra: A nagy csévélési hőmérsékletű melegen hengerelt szalag kis szalagfeszítés és ACB nyomás mellett létrejövő törésvonalak [5]

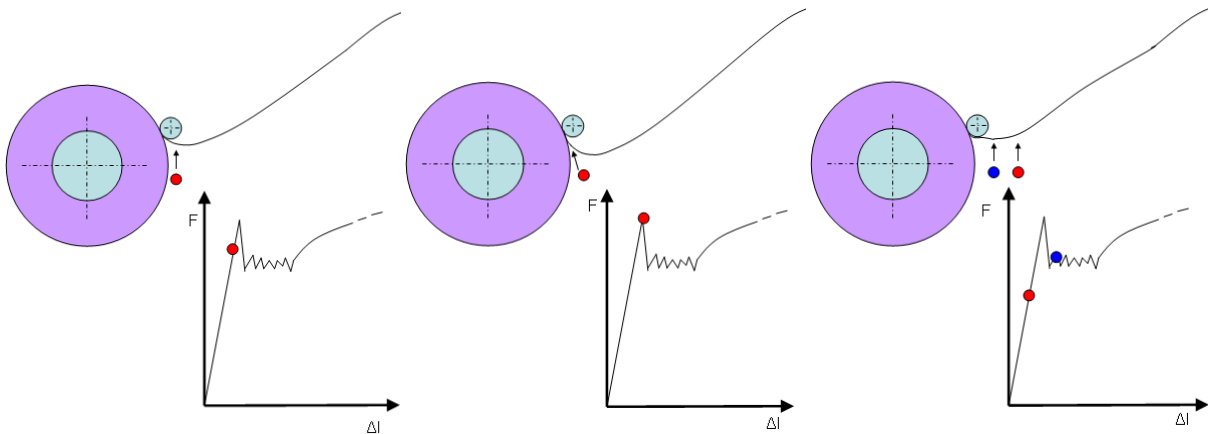
Amennyiben az éppen lefejtett szalagrész nem rendelkezik a tekercs pillanatnyi külső menetéhez hasonló görbülettel (ez inkább 600 °C alatti meleghegerlés utáni csévélési hőmérséklet esetén áll fenn), akkor a tekercs és az ACB görgő között nem érjük el a felső folyáshatár értékét, azaz ezen a szakaszon nem képződik törésvonal. Nem megfelelő szalagfeszítés esetén viszont az ACB görgő és a behúzógörgő között kialakulhatnak a lokális alakváltozási sávok.





13. ábra: A törésvonalak keletkezése az ACB görgő és a továbbító görgőpár közötti szakaszon [5]

A 14. ábra szerinti mechanizmusnál ugyan a lefejtőgörgő megfelelően nagy nyomással gyakorlatilag a tekercs külső menetére szorul, a nem megfelelő szalagfeszítés miatt az ACB görgőt elhagyva alakul ki törésvonalasság.

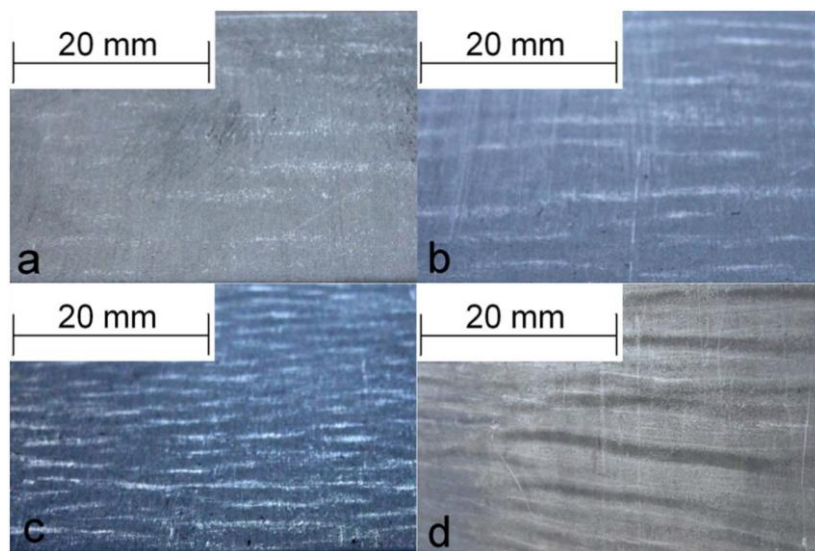


14. ábra: Az ACB görgő a tekercs külső menetére feszül, de a nem megfelelően nagy szalagfeszítés ismétlődő lokalizált alakváltozást hoz létre [5]

A dolgozatban a lágyacél szalagok pácolósoron történő feldolgozása során keletkező makroszkópikus és mikroszkópikus törésvonalak geometriai jellemzőit részletezem, érintve azok kialakulási mechanizmusait és mikroszerkezeti jellemzőit is.

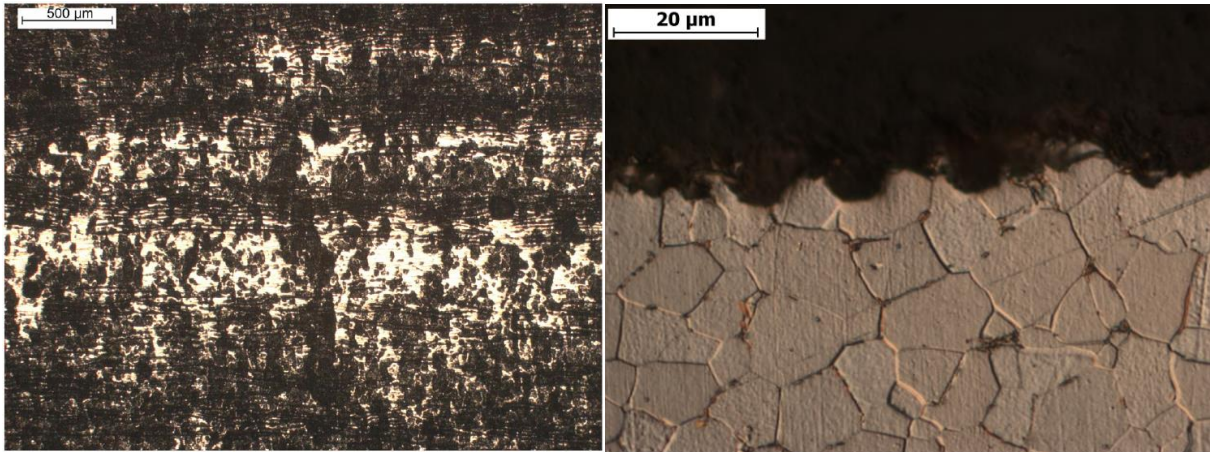
A makroszkópikus és mikroszkópikus törésvonalak jellemző megjelenési formái

A felületi hibák detektálására a legtöbb hengerműben illetve szélesszalag feldolgozó üzemben automatizált kamera- és szoftverrendszereket használnak. Ennek oka az, hogy a legtöbb gyártósoron a szalag haladási sebessége nem teszi lehetővé az emberi szem számára a detektálást és a minősítést. Kiemelten igaz ez a törésvonal hibára, mely a legtöbb esetben csak oldalfény mellett, bizonyos szögből látható mind az emberi szem, mind digitális képfelvevő eszköz számára. Mindemellett a hibák automatikus, szoftver által történő felismerése is nehézkes, mert periodikus fényes-matt sávokat okozhat egyéb technológiai tényező is, például egy szögletesre kopott továbbító henger. A törésvonalasság mértékét az általam vizsgált pácoilósori feldolgozás során általában négy fokozatba sorolják, melyek jellemző fényképei a 15. ábrán láthatók.



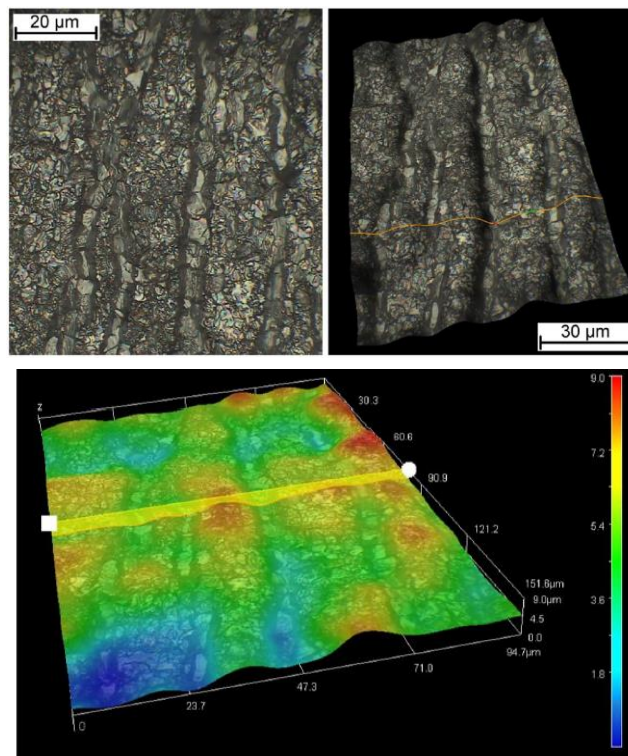
15. ábra: Törésvonalas mintalemezek fotói, 1. fokozat (a.), 2. fokozat (b.), 3. fokozat (c.), 4. fokozat (d.) [3]

A korábban bemutatott keletkezési mechanizmus alapján ismert, hogy a lemez alakíthatósága ebben az állapotban inhomogén. Az ábrákon jelentkező fényes sávok a nagyrészt rugalmasan, a közöttük lévő matt sávok pedig a nagyrészt képlékenyen alakváltozott részek. A 15. ábrán bemutatott matt sötét alakváltozási sávok az ún. makroszkópikus törésvonalak, míg a 16. ábrán bemutatott 3-10 μm széles lokális alakváltozási vonalak az ún. mikroszkópikus törésvonalak. A képlékeny alakváltozás tulajdonképpen nagyrészt ezen mikroszkópikus törésvonalakban, kisebb mértékben azok környezetére lokalizálódik.



16. ábra: Pácolt felületű szalagon jelen lévő mikro-törésvonalak fénymikroszkópos felvételei a felületen [3] és keresztmetszeti csiszolaton

A 16. ábrán egy 4-es fokozatú törésvonalas lemez felületéről fénymikroszkóppal készült felvétel látható. A makroszkópikus törésvonalakat mutató 15. ábra fényes területei a 16. ábra középső részének környezetében lévő fényesebb részekkel feleltethetők meg.



17. ábra: A mikrotörésvonalakról készült domborzati térkép (Hirox RH-2000 3D digitális mikroszkóp) [3]

A 17. ábrán látható domborzati felvétel 20 fokozatosan eltolt fókusz távolságú kép összeillesztése és fókuszhelyzettel való megfeleltetése során jött létre. Az ábrákon látható, hogy a mikrotörésvonalak jellemzően 5-8 μm szélesek és 2-4 μm mély sávok [3-6]. A mikrotörésvonalak keresztmetszetben történő transzmissziós elektronmikroszkópi vizsgálati megtörténtek, melynek kiértékelése és publikálása még folyamatban van.

A makroszkópikus törésvonalak felülettopográfiai jellemzői

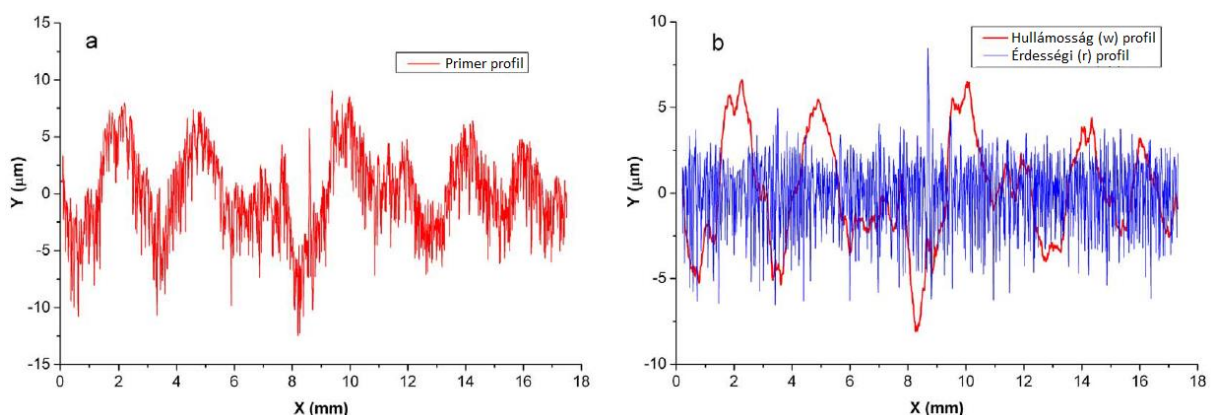
A továbbiakban a makroszkópikus törésvonalak felülettopográfiai jellemzői kerülnek bemutatásra. Az egyes törésvonalassági fokozatokra jellemző, 15. ábrán bemutatott mintalemezeket finomtapintó érdességmérő használatával hosszmenti profilanalízisnek vettem alá. A felületi topográfia Mitutoyo SurfTest PJ-301 érdességmérő segítségével lett rögzítve, minden mintalemezen egy 1,5x16 mm-es terület feltérképezésének eredményeként. A finomtapintó hengerlési irányba mozgott, mely egybe esett a felvett területet jelentő téglalap 16 mm-es oldalával és a hengerlési iránnyal. Minden egyes mintalemezen 20 párhuzamos mérést végeztem, 0,05 mm-es hengerlési irányra merőleges lépésközzel. A felvett érdességprofilok tartalmazták a felületi érdesség, valamint a felületi hullámosságból adódó felület normális irányú kiemelkedéseket is, azaz a primer mérési görbe (p) a hullámossági (w) és érdességi (r) profil összegeként állt elő. Az érdességmérések primer eredménye tehát a hengerlési irányba vett hossz függvényében a felület letapogatott pontjainak felületnormális irányú koordinátái. A felületi topográfia jellemzőinek korrekt kiértékeléséhez a hullámossági és érdességi profilt szét kellett választani egymástól, mely a primer profil mozgóátlagolásával történt:

$$w_i = \frac{1}{2j} \sum_{i-j}^{i+j} p_i$$

ahol w_i a hullámosság profil i -ik adatpontjának értéke, p_i a mért primer profil i -ik adatpontjának értéke, j pedig a mozgóátlag képzési tartományának fele. Az érdességi profil i -ik adatpontja megkapható a primer profil i -ik és a hullámossági profil i -ik adatpontjának különbségeként:

$$r_i = p_i - w_i$$

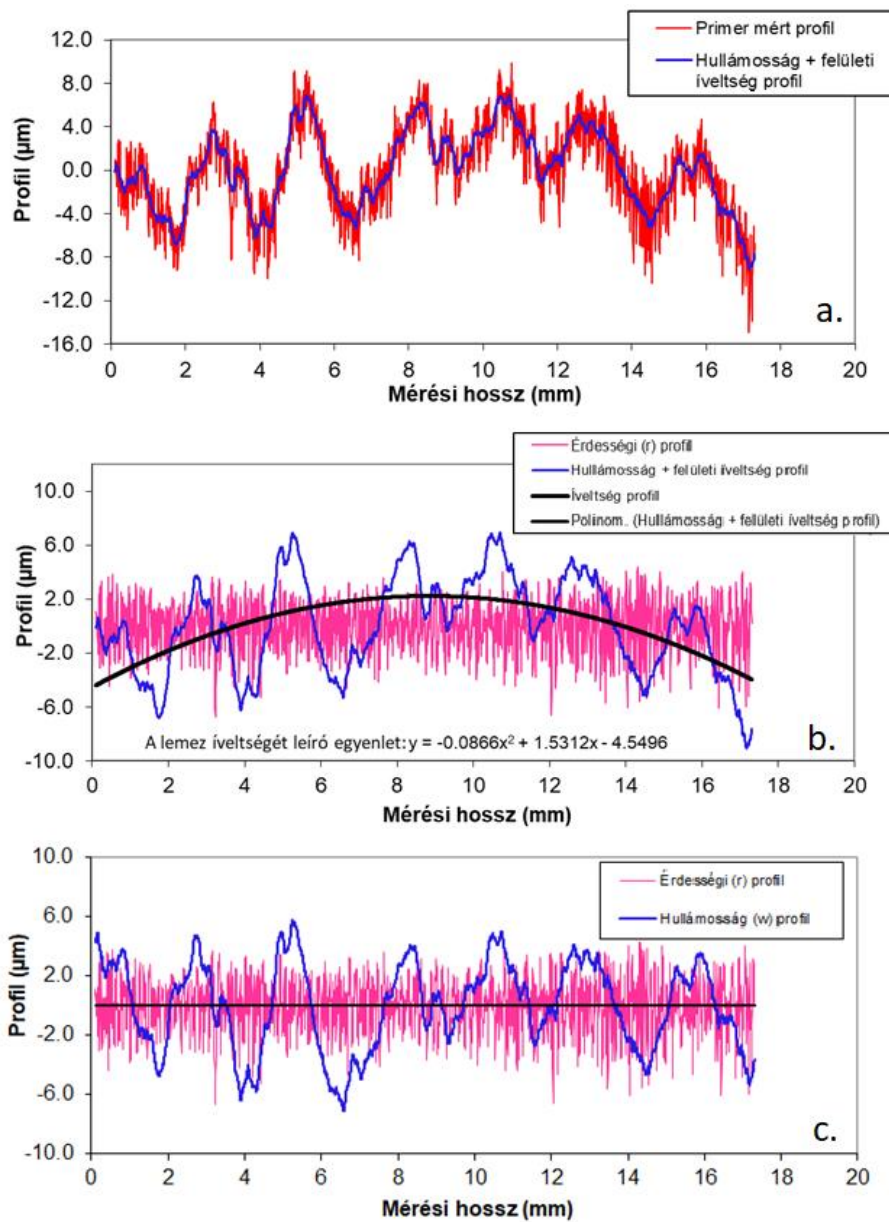
Egy tipikus primer, hullámossági és érdességi profilt a következő ábra mutat.



18. ábra: A törésvonalas mintalemezek jellegzetes primer (a.), és az ebből szétválasztott hullámossági (w) és érdességi (r) profil [3]

Az érdességi és hullámossági profil szétválasztása $j=20$ paraméterrel történt, azaz a mozgóátlag kiszámítása 40 primer adatpont felhasználásával történt. A szétválasztás j paraméterét előzetes tesztek alapján állapítottam meg, $j < 15$ esetén még észlelhető volt az érdességi profilban a hullámosság profil fluktuációja, $j > 30$ alkalmazásával viszont már a hullámossági profil lokális maximum és minimumértékei is torzultak, emiatt az optimálisnak tűnő $j=20$ érték volt alkalmazva.

A primer mérési profil szétválasztása néhány esetben nem volt ilyen egyszerű. A minalemezek közül 2 (az 1. és 2. fokozat) kismértékben görbült volt, azaz a primer görbe burkológörbét jelentő alapvonal nem egy vízszintes egyenesként, hanem egy görbeként jelent meg. Ez a hullámossági profilon látszódott meg. A 19. a. ábra egy ilyen primer és torzult hullámossági görbét mutat.



19. ábra: A lemez íveltségével terhelt primer és hullámosság profil (a.) a leválasztott érdesség profil és a lemez íveltségével terhelt hullámosság profil (b.) érdességi és a korrigált hullámosság profil (c.)

A lemez íveltségét a primer és az érdességi profil különbségére illesztett másodfokú polinommal vettem figyelembe. A másodfokú polinom adott mérési pozícióhoz tartozó értékét kivonva a primer és az érdességi profil ugyanazon pozícióhoz rendelt különbségéből megkaphatjuk a hullámossági profilt. A végső, analízisre alkalmas hullámossági profilra egy példa a 19.a. ábrán bemutatott mérési eredményt alapul véve a 19.c. ábrán látható. A primer profil szétválasztását mindegyik mintalemez öt egymástól 0,15 mm távolságra lévő mérési eredményénél végeztem el, majd ezek átlagos értékét tekintettem az adott profilra jellemző paraméternek. A hullámossági és érdességi profil kiértékelését az 1. táblázatban látható paraméterekre végeztem el az [MSZ EN ISO 4287:2002], [MSZ EN ISO 21920-2:2022] szabványok illetve a [Galla és Kis, 2008] egyetemi jegyzet felhasználásával.

Paraméter	Számítási mód
Profil közepes eltérése, átlagos érdesség és hullámosság, R_a , W_a	$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i $, $W_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i $
Közepes egyenetlenség magasság, R_z , W_z	$R_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{zi}$, $W_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{zi}$, (N=5)
Profil közepes mértani eltérése, simasági mérőszám, R_q , W_q	$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z_i]^2}$, $W_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [w_i]^2}$
Profil maximális csúcsmagassága R_p , W_p	$R_p = \max[z_i]$, $W_p = \max[w_i]$
Profil maximális völgymélysége R_v , W_v	$R_v = \min[z_i]$, $W_v = \min[w_i]$
Ferdeségi mérőszám, R_{sk} , W_{sk}	$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z_i]^3$, $W_{sk} = \frac{1}{W_q^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [w_i]^3$
Lapultsági mérőszám, R_{ku} , W_{ku}	$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z_i]^4$, $W_{ku} = \frac{1}{W_q^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [w_i]^4$
Egyenetlenségek közepes hullámhossza, R_{Sm} , W_{Sm}	$R_{Sm} = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^N x_{r,i}$, $W_{Sm} = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^N x_{w,i}$

1. Táblázat: A profilok kiértékelte paramétereinek definíciói [3]

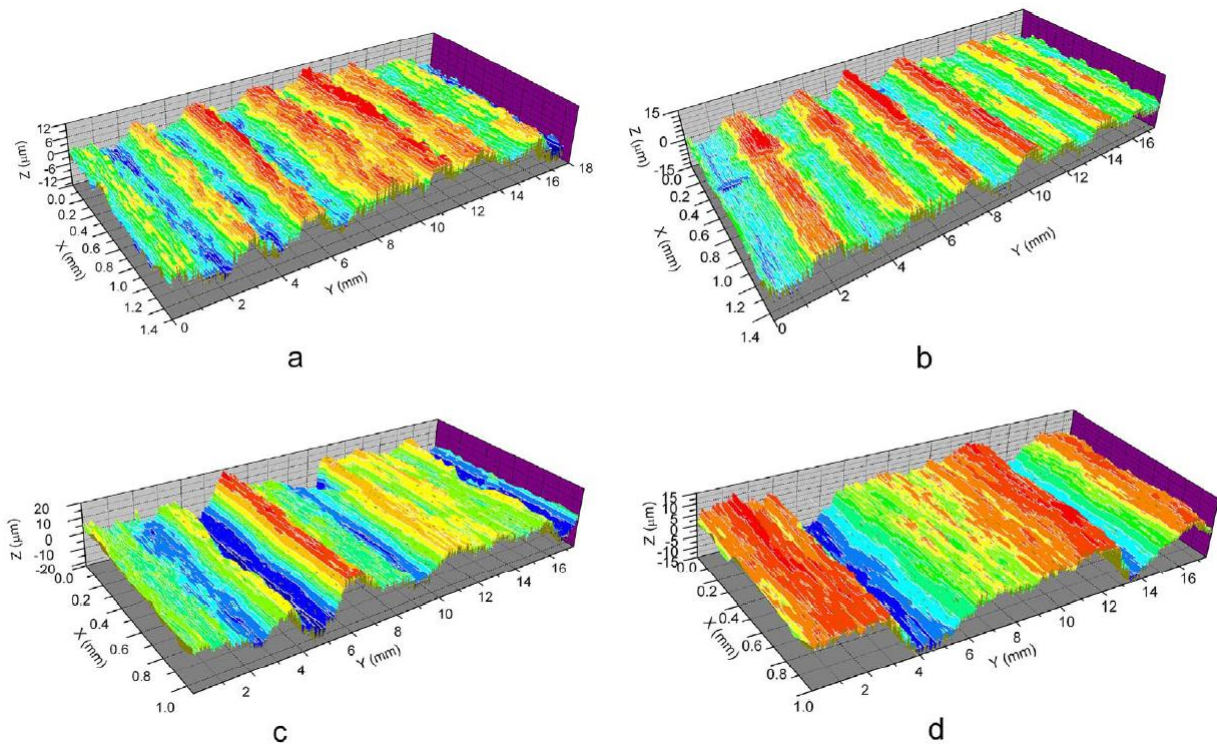
A kiértékelés eredményeként megkapott adatok a 2. Táblázatban láthatók. A felületi érdességprofilok elemzése kapcsán észrevehető, hogy az átlagos felületi érdesség (R_a) a törésvonalasság fokozatszámának növekedése mellett csökken. Ez annak köszönhető, hogy az intenzívebb törésvonalasság magasabb hullámhegyein a szalagtovábbító görgők az érdességi profilok csúcsait lekoptatják. Hasonló okra vezethető vissza az érdességi profilok ferdeségi (R_{sk}) mérőszámának negatív értéke, azaz a profil az alapvonalától felületnormális irányba van kismértékben eltérülve, ami a felületnormális irányba eredetileg kimagasodott érdességcsúcsok lekopásának eredményeként jött létre. A hullámossági profilok W_{sk} ferdeségi paraméterének negatív értéke inkább a törésvonalak makroszkópikus keletkezési mechanizmusával van összefüggésben. A hullámossági csúcsok többé-kevésbé a lemez eredeti sík felületének szintjét alkotják, a matt alakváltozott részek viszont anyagirányba lesüllyedtek, a környezetük hengerlési irányba kismértékben megnyúlt. A matt alakváltozási vonalak szélességének összege adott hosszön rövidebb, mint a fényes csúcsok hosszának összege. Az intenzíven

alakváltozott részek a lemez kiegyenesedése során nyomófeszültséget gyakorolnak a környező nagyrészt rugalmas szakaszokra, valamint ez utóbbi térfogatrészek még magukban hordozzák a tekercs ívének görbületét is. Emiatt plató-szerű a hullámossági csúcsok alakja, amit a W_{ku} lapultsági mérőszám 3 alatti értéke is magában hordoz. A hullámossági csúcsok kifényesedésének oka szintén azok gyártósori szalagtovábbító hengerek felületével való érintkezésében és azok koptató hatásában keresendő.

Paraméter	Törésvonal fokozat							
	1		2		3		4	
	R-profil	W-profil	R-profil	W-profil	R-profil	W-profil	R-profil	W-profil
R_a, W_a (μm)	1,47	2,12	1,42	2,52	1,20	4,27	0,92	4,62
R_z, W_z (μm)	11,08	12,91	15,01	14,80	12,74	23,44	8,07	24,14
R_q, W_q (μm)	1,72	2,91	1,76	3,09	1,53	5,46	1,17	5,71
R_p, W_p (μm)	4,35	5,78	8,46	6,68	4,89	10,32	3,66	8,95
R_v, W_v (μm)	-6,73	-7,12	-6,55	-8,11	-7,85	-13,12	-4,40	-14,19
R_{sk}, W_{sk}	-0,31	-0,28	-0,42	-0,12	-0,43	-0,61	-0,05	-0,79
R_{ku}, W_{ku}	3,09	2,12	3,38	2,50	3,70	2,94	3,20	2,64
R_{sm} (μm), W_{sm} (mm)	25,4	2,6	24,5	3,1	23,4	3,7	23,8	7,0

2. Táblázat: A törésvonalas mintalemezek profiljainak jellemző paraméterei [3]

A nyers primer profilok egymás mellé helyezésével és ábrázolásával készült a törésvonalas mintalemezek topográfiája, mely a 20. ábrán látható.

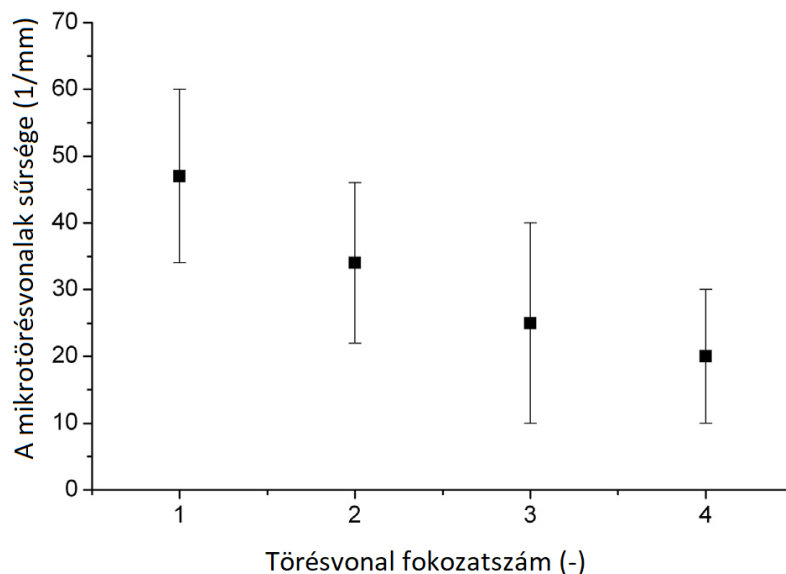


20. ábra: A törésvonalas mintalemezek felülettopográfiájának reprezentációja. 1. fokozat (a.), 2. fokozat (b.), 3. fokozat (c.), 4. fokozat (d.) [3]

A makroszkópikus törésvonalak hullámossági profiljának völgymélysége és csúcsmagassága a fokozatszám növelésével nő. A hullámmagasság a mért hosszon 12 és 25 μm közötti értéket képvisel, ezzel párhuzamosan az átlagos hullámosság (W_a) is 2,12 μm -ról 4,62 μm -re nő a fokozatszám növekedésével.

A mikroszkópikus törésvonalak tulajdonságai

A makroszkópikus törésvonalak matt sávjaiban helyezkednek el a rendszerint 5-8 μm széles mikroszkópikus törésvonalak. Ezek vizsgálata méretük és szintbeli különbségük miatt nehézkes, de nem lehetetlen feladat. A mikro-törésvonalak elhelyezkedését metallográfiai vizsgálat segítségével elemeztem. Az felületi elhelyezkedésükre kiterjedő elemzés a hengerlési irányba vett (azaz a törésvonalakra merőlegesen számított) sűrűségük becslését foglalta magába. Ez fénymikroszkópos felvételek segítségével történt, adott hengerlési irányba felvett szakaszon a szakaszt metsző mikro-törésvonalak megszámlálásával. Az eredmények meglehetősen nagy szórást mutattak, ennek ellenére a fokozatszám növelésével egyre ritkuló és nagyobb, markánsabb mikro-törésvonalak keletkezése jellemző.

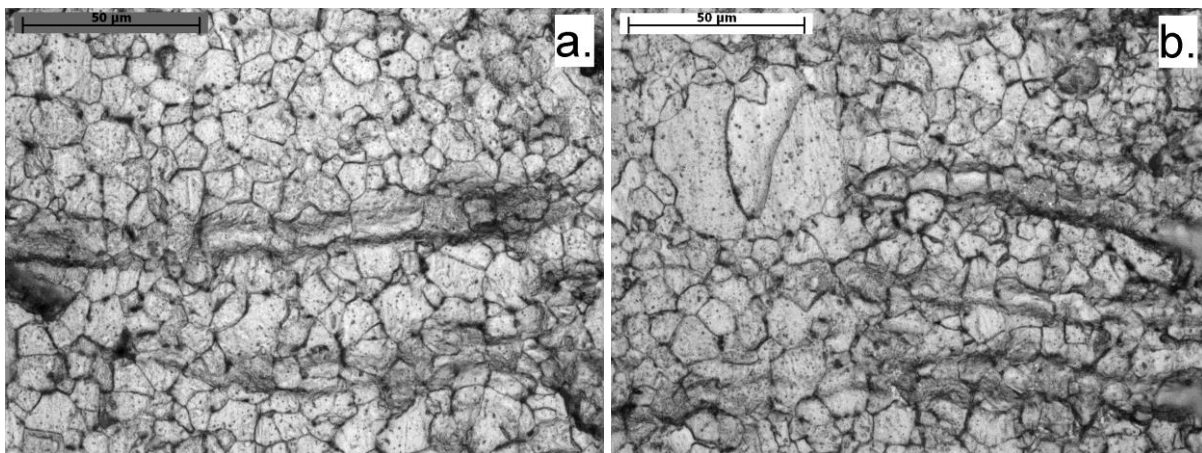


21. ábra: A mikro-törésvonalak sűrűsége a törésvonal fokozatszám függvényében [3]

A mikro-törésvonalak elhelyezkedése, sűrűsége és a keletkező makroszkópikus törésvonalak intenzitása (azaz fokozatszáma) több technológiai és anyagminőséget jellemző paraméterrel mutat összefüggést. Az egyik legfontosabb a melegen hengerelt szalag csévélési hőmérséklete. Ez nem csupán a szalag mikroszerkezetét befolyásolja, de a lecsévéléskor és az egyenetlés során elszenvedett első maradó képlékeny alakváltozás mértékét is befolyásolja. A melegen hengerelt szalagot a meleghengerlés utolsó hengerállványából kilépve 550 és 730 $^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékletre hűtik le és ezen a hőmérsékleten tekerceslik fel. A szalag feltekerceselés közben

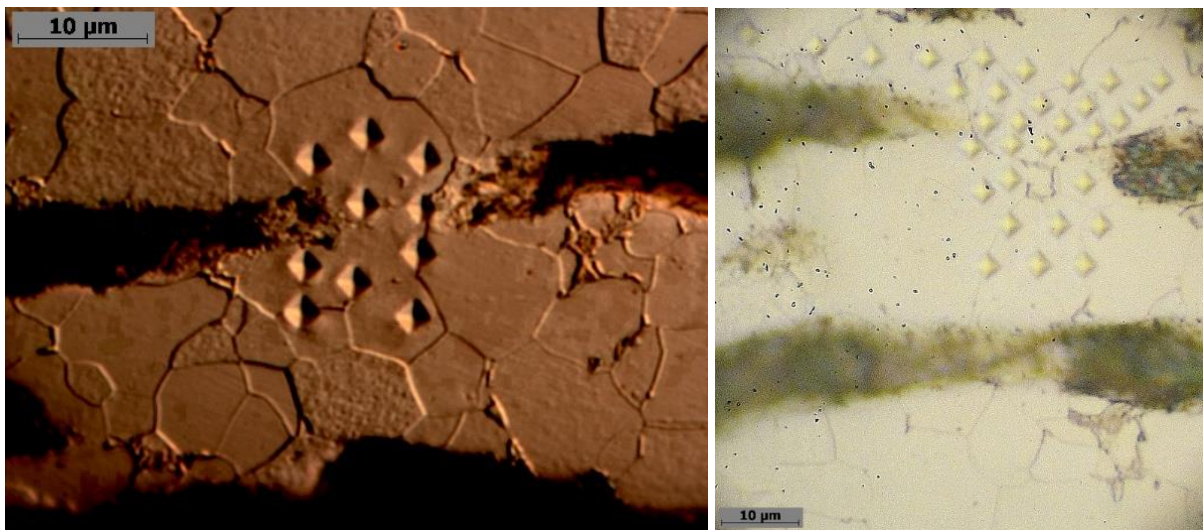
a lemezvastagságtól, a pillanatnyi átmérőtől és a pillanatnyi hőmérséklettől függően maradó és részben rugalmas alakváltozást szenved. A tekercs több napos lehűlése közben a meghajlított lemez rugalmas alakváltozásának egy része maradó alakváltozássá alakul, a kúszásra jellemző alakváltozási mechanizmusokkal. Ennek mértéke természetesen a tekercs aktuális átmérőjétől és a lemezvastagságtól erőteljesen függnék. A meleghegerlés után a tekercsek meneteit a tekercs egész kerülete mentén, a szalag középvonalába húzódó kötözőszalaggal rögzítik. A kötözőszalagot 3-4 nap hűlés után elvágva azt tapasztaljuk, hogy a kis, 550-600 °C-on felcsévéltek tekercs órarugóhoz hasonló módon „szétugrik”, legalábbis a külső 5-10 menet (de természetesen nem egyenesedik ki síkszerű alakra a lemez a teljes lecsévéléskor). Ezzel ellentétben a 700-750 °C-on felcsévéltek tekercsek külső 1-2 menete alig-alig távolodik el eredeti helyzetétől. Ez egyben azt is jelenti, hogy a kis csévélési hőmérsékletű tekercs maradó görbülete jóval kisebb, mint a nagy csévélési hőmérsékletűé, emiatt a szalag lefejtésekor, kiegyenesítésekor kisebb alakváltozást kell elszenvednie.

A mikro-törésvonalak felületi és közvetlenül a felület alatti rétegének fénymikroszkópos vizsgálata során többféle módszerrel is eljárhatunk. A pácolt törésvonalas szalag felületének jelentős szintkülönbségei miatt a mikroszkópi kép csak a felvétel egy részén éles, emiatt több, eltolt fókuszú éles kép digitális összeillesztésével kaphatunk megfelelő felvételt. A pácolt állapotú törésvonalas lemezek felületén a szemcseszerkezet kirajzolódik. A mikroszkópon egy-egy mikro-törésvonalat végigpásztázva jól kivehető, hogy szinte kivétel nélkül egy-egy szemcsesoron haladnak keresztül, a vonalra merőleges irányba a környező szemcséknek csak egy része „mélyed” bele a mikro-törésvonal árkába. Ez megfigyelhető a mikroszkóp fókuszát mozgatva, a lokális alakváltozási sáv mellett közvetlenül elhelyezkedő szemcse belseje felé mintegy 1-2 µm-es távolságban okoznak geometriailag érzékelhető deformációt. Több helyen megfigyelhető, hogy a mikro-törésvonal nem tud minden pozícióban a szemcseszerkezeten keresztülhaladni. A 22.b. ábra egy olyan mikro-törésvonalat mutat, melynek vége szakad egy a környező szemcsénél sokkal nagyobb kristallit határán. Feltételezhető, hogy ez a nagyobb kristallit olyan orientációval rendelkezett mely nem tette lehetővé a szemcse belsejében a megfolyást.



22. ábra: A mikro-törésvonalak pácolt, polírozott acéllemez felületén

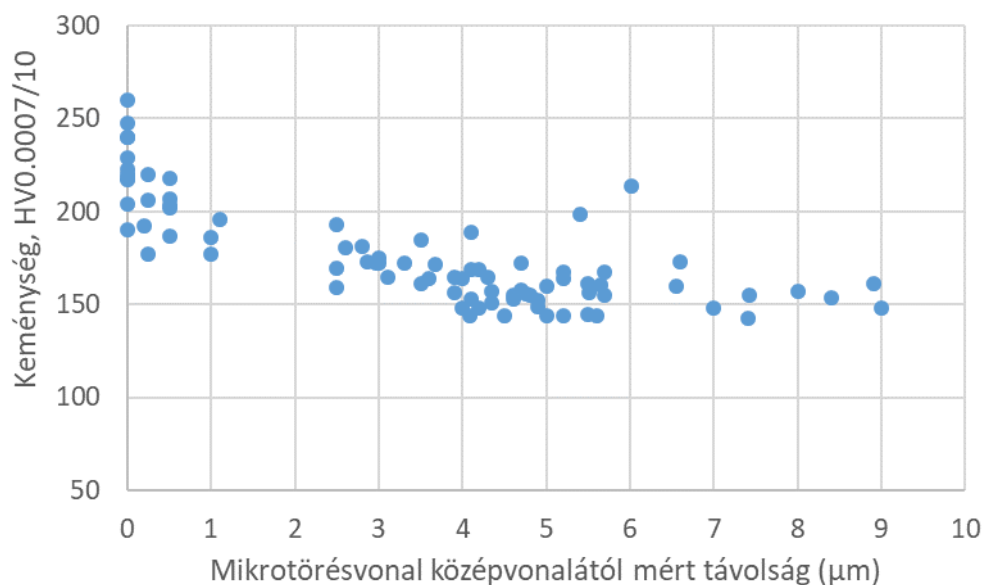
A mikro-törésvonalak környezetének mikroszerkezetét metallográfiai vizsgálattal, a lokális alakváltozási sávok és környezetük felkeményedését mikro-Vickers eljárással vizsgáltam. A vizsgálatok során az alábbi megfigyelések születtek. A vonal irányára merőlegesen a szemcsék határát kiterjedten nem lépik át, a mikroszkóp fókuszát mozgatva azt lehet érzékelni, hogy a vonal mellet közvetlenül elhelyezkedő szemcse belseje felé mintegy 1-2 μm -es távolságban okoznak geometriailag érzékelhető deformációt. Tehát a szemcsehatárok akadályként szolgálhatnak az vonalak képződésekor, ez az eddigi elméletek alapján (pl. Hall-Petch egyenlet) talán érthető is. A mikro-törésvonalas mintát a felületén polírozva azt az állapotot is sikerült elérni, amikor néhány mikrotörésvonal mélyedése éppen felpolírozódott, viszont a sáv eredeti helye is látszódik. Ebben az állapotban történtek a mikrokeménység-mérések, a vonal eredeti pozíciójában illetve a vonalra merőlegesen attól néhány mikrométerre. A 23. ábra két ilyen méréssorozat felvételét mutatja.



23. ábra: A mikrokeménység-mérés módja részlegesen felpolírozott törésvonalas mintalemezen [4]

Tekintettel arra, hogy a mérési eredmények bizonytalansága a terhelés csökkenésével nő, valamint maga a keménység értéke is terhelésfüggő (Béres és Weltsch, 2019), az alábbiakban inkább a vonalban és az a melletti területre helyezett lenyomatok összehasonlító jellegű vizsgálatát prezentálom. A Vickers lenyomatokat mikroszkópi képeken elemezve az állapítható meg, hogy a felpolírozódott mikro-törésvonalban a Vickers-nyomatok ugyanazon terhelés (0,7 illetve a kezdeti próbálkozásoknál 0,5 g) mellett kimutathatóan kisebbnek bizonyultak, mint az alakváltozási sáv melletti szemcsékben. Kb. 80 ilyen mérést elvégezve megállapítható, hogy átlagosan 30-60 HV_{0.0007/10} keménységkülönbség tapasztalható a mikro-törésvonal és az őt körülvevő alakítatlan szemcsék között: a szemcsék mellett 140-160 HV_{0.0007/10}, a mikro-törésvonal vonalában 180-250 HV_{0.0007/10} keménység tapasztalható. A kapott eredmények ugyanakkor nem tekinthetők az ISO 6507-1 szabvány által előírtakkal kompatibilisnek. Ennek oka, hogy a szabvány nem javasolja a 10 μm -nél kisebb lenyomatátló használatát a mérések kiértékeléséhez. Ugyanakkor, tekintettel arra, hogy ezek az alakváltozási

vonalak ahogyan az a 23. ábrán látható, kb. 3-10 μm szélességűek, a keménység változását 0,7 g-nál nagyobb terheléssel csak elmosódottan lehetett volna kimutatni. Az alkalmazott terhelőerőből és 2,3-3 μm -es lenyomatméretből következik, hogy a keménységmérések bizonytalansága meglehetősen nagynak bizonyult (kb. $\pm 10\text{-}20$ HV0.0007/10). A bizonytalanságot tovább növelte az a tény, hogy nem minden mérés esetén sikerült a lenyomatok középpontjának távolságát a szabvány által javasolt $>2,5d$ (d a lenyomatátló) távolságra elhelyezni. Emiatt azoknál a méréseknél, ahol ez a feltétel nem teljesült, csak az adott mérés előtt végzett mérés eredménye lett felhasználva. Ezen mérési anomáliákat mérlegelve ugyanakkor a 24. ábrán összefoglalt eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a mikro-törésvonal középvonala felé haladva a lenyomatok csökkennek, a keménység szignifikánsan növekszik.



24. ábra: A mikrokeménység eloszlása a mikro-törésvonal környezetében

Tekintettel arra, hogy a tárgyalt lágyacélok ilyen mértékű keménységnövekedést gyakorlatilag csak alakítási keményedéssel érhetnek el, kijelenthető, hogy a mikro-törésvonalak kialakulásakor nem csak a megfolyás pillanatában jelen lévő diszlokáció-leszakadás, hanem intenzív diszlokációképződés is történik. Jelen kijelentést megerősítették a mikro-törésvonalas mintákon végzett transzmissziós elektronmikroszkópi vizsgálatok, melyek inhomogén, helyenként meglehetősen nagy alakítottságra utaló diszlokációs szerkezetet mutatnak. A transzmissziós elektronmikroszkópi vizsgálatok kiértékelése és publikálása a dolgozat megírásakor még folyamatban van, emiatt ezen eredmények itt nem kerülnek tárgyalásra.

Összefoglalás

A törésvonalasságnak nevezett, lágyacél szalagokon jelen lévő hengerlési irányra közel merőleges lokalizált alakváltozási sávok jelenléte a lágyacélok rugalmas-képlékeny

átmenetének nem folytonos jellegéhez köthető. A törésvonalak leggyakrabban a melegen hengerelt lágyacél szalagok lefejtése illetve görgős egyengetése során képződnek. A törésvonalak tekintetében megkülönböztetünk makroszkópikus (szabad szemmel érzékelhető) és mikroszkópikus (mikroszkópi módszerekkel detektálható) törésvonalakat. A makroszkópikus lokális alakváltozási sávok felszíne az anyagba irányulóan néhány mikrométerrel bentebb helyezkedik el a lemez eredeti felszínéhez képest. Emiatt a megfolyt térfogatrészek közti nagyrészt rugalmasan alakváltozott sávok érintkeznek a gyártósori továbbító hengerekkel, melyek koptató hatása miatt sávokban türkröző felületet adnak. A makroszkópikus és mikroszkópikus törésvonalak keletkezési mechanizmusainak kísérleti és ipari környezetben történt vizsgálatai hasonló eredményeket mutattak. A törésvonal képződés elkerülésének leggyakrabban alkalmazott módja a tekercs lefcsevélésénél alkalmazott lefejtőgörgő használata. A lefejtőgörgő és a szalagfeszítés alapos beállítását és a gyártási paraméterekkel (tekercs aktuális átmérő, sebesség, anyagminőség, vastagság, szélesség) való összehangolása elengedhetetlen a törésvonalasság megszüntetése illetve csökkentése érdekében. A törésvonalas lemezek makrotopográfiáját tekintve érdekes eredménynek bizonyult a gyártósori továbbító hengerek törésvonalak érdességi mérőszámaira gyakorolt hatása, valamint a hullámossági mérőszámok és a vizuális fokozatszám közötti kapcsolat. A mikrotörésvonalak vizsgálatát tekintve a legfontosabb eredmények a következők. Vizuális megfigyeléseket alapul véve szinte kivétel nélkül egy szemcsesoron haladnak keresztül és bizonyos mikroszerkezeti elemek, pl. egy nagyobb szemcse vagy egy másik fázis megállíthatja a terjedésüket. A polírozott mintákon való mérések eredményeként elmondható, hogy a mikro-törésvonal középvonala felé haladva jelentős keménységnövekedés tapasztalható. Ez egyben azt is bizonyítja, hogy az alakváltozás ezekben a lokalizált sávokban olyan mértékű volt, hogy a folyás megindulásának pillanatában történő diszlokáció-leszakadás mellett jelentős diszlokációképződés is végbement.

Tézispontok

1. Tézis: A törésvonalas mintalemezek felülettopográfiáját jellemző érdességi profil R_a átlagos érdessége (1,47...0,95 μm) csökken, míg a hullámossági profil W_a átlagos hullámossága (2,12...4,62 μm) nő a vizuális megfigyeléssel megállapítható törésvonal fokozatszám növelésével.[3]

2. Tézis: A törésvonalas lemezek topográfiáját jellemző érdességi profil R_{sk} ferdeségi mérőszámának negatív értéke (-0,05...-0,43) a mintalemezek alapanyagául szolgáló szalagok gyártósori továbbító hengereken való koptató igénybevétel hatásaként jöttek létre. Hasonló jelenség okozza az 1. tézisben megfogalmazott érdességi profilokat jellemző R_a átlagos felületi érdesség csökkenését a törésvonal fokozatszámának növelésével. [3]

3. Tézis: A törésvonalas mintalemezek topográfiáját jellemző hullámossági profil egyenetlenségeinek magassága (W_z) 12 és 25 μm közötti, míg az egyenetlenségek közepes hullámhossza (W_{sm}) 2,6 és 7 mm között változik. Mindkét paraméter nő a törésvonalasság fokozatszámának növekedésével. [3]

4. Tézis: A vizsgált mintalemezek makroszkópikus törésvonalalaiban elhelyezkedő mikroszkópikus törésvonalak sűrűsége 15 és 65 1/mm között változik, a fokozatszám csökkenésével sűrűségük növekszik. [3]

5. tézis: A mikroszkópikus törésvonalak lokalizált alakváltozási sávjának középvonalaiban szignifikáns keménység-növekedés mérhető a mikro-törésvonal közvetlen környezetében lévő szemcsék keménységéhez képest. Ez arra utal, hogy a mikro-törésvonal képződésekor nem csupán a diszlokációk az őket rögzítő intersztíciós atomokról való leszakadása, hanem jelentős mértékű diszlokáció keletkezés is történt. [4], [6].

III. A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA

A kutatás eredményeként született publikációkra pozitív hangvételi hivatkozások születtek. Jelen fejezetben csak néhány, főbb hivatkozásokat kerülnek meg tárgyalásra. Az 1.-4. tézispontokban hivatkozott publikációra összesen kilenc hivatkozás született, melyből az öt legfontosabb az alábbiakban kerül felsorolásra.

1. Candan Şen Elkoca: The Application of Taguchi Experimental Design Methodology to the Removal of Coil Break Defect, 8th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 23-25 October 2020 (ISITES2020 Bursa - Turkey)
 - a. A cikkben felsorolás jelleggel hivatkoznak a megjelölt publikációra.
2. Xing Chen, Shuaijiang Yan, Chengsong Zhang, Guodong Cui, Chuan Yang: Failure Analysis of Insulator Iron Cap in Low Stress State, J Fail. Anal. and Preven. 18 (2018) 828–836.
 - a. A cikkben a pácolás által előtérbe kerülő felületi hibák kapcsán hivatkoznak a megjelölt publikációra
3. Jaehyun Kim, Do-Nyun Kim: Computational Studies for the Yield-Point Phenomenon of Metals, Multiscale Science and Engineering 2 (2020) 90–106.
 - a. A cikkben a hivatkozott cikkből ábrák kerültek reprodukcióra, illetve szöveges hivatkozás történt a törésvonalasság megnevezésére.
4. Chin Joo Tan, Haw Ling Liew: Investigation of coil-break formation during uncoiling of fully annealed low carbon steel sheet using FE simulation, Engineering Failure Analysis 120 (2021) 105112

- a. A cikkben említés szintjén kerülnek feltüntetésre a hivatkozott publikáció tartalmi elemei.
- 5. D. Ashkenazi, D. Cvikel: A journey into the microstructure: Using a multifocal 3D digital light microscope to study archaeological artefacts retrieved from shipwrecks, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 16, (2020) e00129
 - a. A cikkben felsorolás jelleggel hivatkoznak a megjelölt publikációra.

Az 5. tézispontban megjelenített publikációk magyar nyelven íródtak, ezekre hivatkozás a tézisfüzet elkészítéséig nem lehetséges.

IV. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

Barisic B. R., Pepelnjak T., Math M. D. (2008) Predicting of the Lüders' bands in the processing of TH material in computer environment by means of stochastic modelling, *Journal of Materials Processing Technology* 203, p.154-165.

Béres G., Weltsch Z. (2019) Estimation of Strength Properties from Microhardness Results in Dual Phase Steels with Different Martensite Volume Fraction, *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering* 47(3), p.206-212.

Cottrell A. H., Bilby B. H. (1949), Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron. *Proc. Phys. Soc. London Sect. A* 62, p.49-62.

Davis J.R. (2004) *Tensile Testing*, second ed., ASM International, USA.

Docherty J. G., Thorne F. W. (1931) The phenomenon of tensile yield in mild steel and iron, *Engineering* 132, p.295-297.

Giarola A.M., Pereira P.H.R., Stemler P.A., Pertence A.E.M., Campos H.B., Aguilar M.T.P., Cetlin P.R. (2015) Strain heterogeneities in the rolling direction of steel sheets submitted to the skin pass: A finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 216, p.234–247.

Gray T.G.F, McCombe A. (1992) Influence of specimen dimension and grip in tensile testing steel to EN 10 002., *J Iron and Steel Making* 19 p.405-409.

Hallai J. F., Kyriakides S. (2011) On the effect of Lüders bands on the bending of steel tubes. Part I: Experiments, *Int. J. Solids Struct.* 48 p.3275–3284.

Hartmann L. (1896) *Distribution des déformations dans les métaux soumis aux efforts*, Berger-Levrault & cie libraires-éditeurs, Paris.

Hutchinson M. M. (1957) High upper yield point in mild steel, J. Iron Steel Inst., 186, p.431-432.

J.né Galla, F. Kis: Gépipari minőség ellenőrzés, gyakorlati útmutató és segédlet, Budapesti Műszaki Főiskola, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag és Gyártástechnológia Intézet, Gépgyártástechnológiai Szakcsoport, Budapest, 2008.

Lüders W. (1860) Über die Äusserung der elasticität an stahlartigen Eisenstäben und Stahlstäben, und über eine beim Biegen solcher Stäbe beobachtete Molecularbewegung, Dinglers Polytech. J. 155. p.18-22.

Meier M. (2026) Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS), University of Cambridge, Lüders bands formation in steel, contributed by Mike Meier, University of California, Davis. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/metal-forming-3/plane_stress.php (2026.01.05.)

MSZ EN ISO 21920-2:2022, Termékek geometriai követelményei (GPS). Felületi érdesség: profil. 2. rész: Szakkifejezések, meghatározások és a felületi érdesség paraméterei (ISO 21920-2:2021, 2022. júniusi helyesbített változat)

MSZ EN ISO 4287:2002; Termékek geometriai követelményei (GPS). Felületminőség: Metszetalapintó eljárás. Fogalmak, meghatározások és felületminőségi jellemzők (ISO 4287:1997), Visszavonva: 2022.07.01.

Piobert G., Morin A.-J., Didion I. (1842) Commission des Principes du Tir, Mémorial de l'Artillerie 5, p.501-552, (505. oldal)

Sun H.-B., Kaneda Y., Ohmori M., Yoshida F. (2006) Effect of Stress Concentration on Upper Yield Point in Mild Steel, Materials Transactions 47 (1) p.96-100.

V. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Mucsi A. (2018) Analysis of coil break defects, Eng. Fail. Anal. 83, p.109-116.

Mucsi A. (2018) A lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalasság jellegzetességei, BKL Kohászat 151, p.5-8.

Mucsi A., Réger M. (2018) Törés- és folyásvonalak keletkezésének mechanikai és fémtani háttere, Szabó Gábor; Szűcs Máté (szerk.) XVI. Képlékenyalakító Konferencia Miskolc-Egyetemváros, Magyarország; Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, p.13-19.

VI. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [1] Mucsi A. (2013) Effect of gripping system on the measured upper yield strength estimated by tensile tests, Measurement 46, p.1663–1670
- [2]. Mucsi A. (2014) A képlékenyalakításra szánt, alumíniummal csillapított lágyacél szalagok gyártástechnológiájának fémtani háttere, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
- [3] Mucsi A. (2018) Analysis of coil break defects, Eng. Fail. Anal. 83, p.109-116.
- [4] Mucsi A. (2018) A lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalasság jellegzetességei, BKL Kohászat 151 5-8.
- [5] Mucsi A., Verő B., Portász A. (2016) Coil break formation in low carbon steel strips
In: Yvonne, Dworak; Bruno, Hribernik - Austrian, Society for Metallurgy; Materials, (ASMET) (szerk.) Rolling 2016 : 10th International Rolling Conference and the 7th European Rolling Conference - ROLLING 2016, Leoben, Ausztria : Austrian Society for Metallurgy and Materials (ASMET) (2016) 1,240 p. pp. 1043-1050.
- [6] Mucsi A., Réger M. (2018) Törés- és folyásvonalak keletkezésének mechanikai és fémtani háttere, Szabó, Gábor; Szűcs, Máté (szerk.) XVI. Képlékenyalakító Konferencia Miskolc-Egyetemváros, Magyarország; Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, p.13-19.