

LUKÁCS TAMÁS
TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

LUKÁCS TAMÁS
TDK DOLGOZAT

Üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozit anyagban delamináció vizsgálat digitális mikroszkóp segítségével

Témavezető:

Dr. Geier Norbert
Adjunktus

Témavezető:

Pereszlai Csongor
Doktorandusz

Budapest, 2021

Szerzői jog © Lukács Tamás, 2021.

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	vii
Jelölések jegyzéke	viii
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés	1
2. Szakirodalmi áttekintés	2
2.1. A szálerősítéses polimer (FRP) kompozit anyagok és forgácsolhatóságuk	2
2.2. A delamináció jelensége és keletkezése fúráskor.....	3
2.3. A delamináció lehetséges mérési módszerei és jellemző mérőszámai	3
2.3.1. Hagyományos delaminációs faktor (1).....	5
2.3.2. Módosított delaminációs faktor (%).....	5
2.3.3. Inverz delaminációs faktor (1)	5
2.3.4. Minimális delaminációs faktor (1).....	6
2.3.5. Területalapú delaminációs faktor (%).....	6
2.3.6. Területalapú delaminációs faktor (1)	6
2.3.7. Korrigált delaminációs faktor (1).....	7
2.3.8. Ekvivalens delaminációs faktor (1)	7
2.3.9. Háromdimenziós delaminációs faktor (1).....	8
2.3.10. Effektív egyenértékű delaminációs faktor (1).....	9
2.3.11. Finomított delaminációs faktor (1)	10
2.3.12. Sugáralapú delaminációs faktor (1)	10
2.3.13. Delamináció körkörössége (1).....	11
2.3.14. A delaminációs mérőszámok összefoglalása.....	11
3. A képfeldolgozó algoritmus bemutatása	13
3.1. Képek készítése a munkadarabról.....	13
3.2. Képek egymásra illesztése és a köztük lévő eltérés meghatározása	13
3.3. A furatba benyúló sorja eltávolítása.....	16
3.4. A kép zajszűrése.....	18
3.5. A szükséges geometriai jellemzők meghatározása.....	20
4. A kísérleti környezet és a felhasznált eszközök	21
4.1. Kísérletterv	21
4.2. Kísérleti környezet	22

5. Eredmények és értelmezésük	26
5.1. Forgácsolási erő	26
5.2. Delamináció	29
5.3. Diszkusszió és kitekintés	30
6. Összefoglalás	32
7. Felhasznált források	33
8. Summary	35

ELŐSZÓ

A szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek, kezdik leváltani a hagyományos szerkezeti anyagainkat. Nem is csoda, hiszen kiváló mechanikai jellemzőkkel bírnak, és mindemellett rendkívül alacsony sűrűséggel rendelkeznek. Ám ezen anyagok megmunkálása során számos nehézségbe ütközhetünk, ezért a mai napig kutatások tárgyát képezi ezen témakör.

* * *

Köszönettel tartozom a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék munkatársainak, különösképp témavezetőimnek, Geier Norbertnek és Pereszlai Csongornak, az értem tett erőfeszítéseikért, munkám segítéseért és kérdéseim készséges megválaszolásáért. Továbbá köszönöm Poór Dánielnek a kísérletek lebonyolításában nyújtott segítségét.

Köszönöm családomnak és barátaimnak, hogy támogatják az egyetemi munkámat.

Budapest, 2021.11.07.

Lukács Tamás

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk		
Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
f_z	fogankénti előtolás	mm/ford
v_c	forgácsolási sebesség	m/min
v_f	előtolási sebesség	mm/min
n	fordulatszám	1/min
p	laminált rétegek száma	1
A_{del}^k	k -adik réteghez tartozó delaminációs terület	mm ²
A_H	erősen sérült terület	mm ²
A_L	enyhén sérült terület	mm ²
A_{del}	delaminációs terület	mm ²
A_{max}	delaminációs zóna maximális átmérőjéhez (D_{max}) tartozó terület	mm ²
A_{nom}	furat névleges területe	mm ²
D_e	ekvivalens átmérő	mm
D_{ea}	ekvivalens átmérő a sérült zóna és a furat közös burkoló területére vonatkozóan	mm
D_{ep}	ekvivalens átmérő a sérült zóna kerületére vonatkozóan	mm
DF	területalapú delaminációs faktor	%
D_{max}	sérült zóna maximális átmérője	mm
D_{min}	delaminált zóna köré írható kör átmérője	mm
D_{nom}	furat névleges átmérője	mm
F_{DR}	finomított delaminációs faktor	1
F_a	területalapú delaminációs faktor	1
$F_{d,inv}$	inverz delaminációs faktor	1
F_d	hagyományos delaminációs faktor	1
F'_d	módosított delaminációs faktor	%
F_{da}	korrigált delaminációs faktor	1
F_{df}	delamináció körkörössége	1

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$FEED$	effektív egyenértékű delaminációs faktor	1
F_v	háromdimenziós delaminációs faktor	1
U	Feszültség	V
P_e	sérült zóna kerülete	mm
R_d	sugáralapú delaminációs faktor	1
R_{max}	sérült zóna maximális sugara	mm
R_{nom}	furat névleges sugara	mm
T_n	n-edik szerszám	1
F_{dmin}	minimális delaminációs faktor	1
F_{ed}	ekvivalens delaminációs faktor	1

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
max	legnagyobb (maximális) érték
nom	névleges (nominális) érték
min	legkisebb (minimális) érték

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkritikázések

“A szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok használata széleskörben elterjedt az ipar szinte minden területén. Kezdetben főként a tengerészeti alkalmazásokban vették nagy hasznukat, nem csupán kiemelkedő mechanikai tulajdonságaik miatt, hanem azért is, mert nem mágnesezhető anyagok lévén, a radarok ellen is védelmet biztosítanak. Ezenfelül jól ellenállnak a környezet káros behatásaival szemben is, így az árad tengeri körülmények között is jól alkalmazhatók. Később a járműgyártásban is egyre nagyobb teret hódított használatuk, és egészen odáig vezetett ez a tendencia, hogy ma már a szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok túlnyomó hányada ezen iparágban kerül felhasználásra. Hasonlóan nagy népszerűségnek örvendenek ezen anyagok a repülő-, energia-, sport- és úripar területén, illetve az utóbbi időben az építőiparban is egyre nagyobb szerepet kapnak. Széleskörű elterjedésük oka a rendkívül kedvező tulajdonságaikban rejlik: nagy fajlagos szilárdság, jó fáradási tulajdonságok és jó korrózióállóság. Mindemellett sajnos ezen összetett anyagok megmunkálása komplikált, számos nehézséggel kell szembenéznünk.” [1]

Dolgozatom célja az üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitok fúrásakor keletkező delamináció (rétegleválás) vizsgálata, továbbá egy digitális képfeldolgozáson alapuló delaminációs mérési módszer kidolgozása, mely jól alkalmazható GFRP kompozitok esetében. Jövőbeni tervem, hogy a mérési módszert kontrollált körülmények között validáljam.

1.2. Áttekintés

Első lépésben irodalomkutatást végeztem a szálerősítéses polimer (FRP) kompozit anyagok forgácsolása témakörében, különös tekintettel a megmunkálás után jelentkező delaminációra és annak mérési és kiértékelési módszereire. Ezt követően üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitban végeztem fúrési kísérleteket több előtolás és forgácsolási sebesség mellett. Digitális mikroszkóppal készítettem felvételeket a GFRP kompozitról fúrás előtt és után is, hogy a lehető legpontosabb képet kapjam a furatkontúron túlnyúló makrogeometriai változásokról (delamináció, mátrixbeégés, repedések stb.). A mikroszkópi felvételeket Matlab környezetben, saját fejlesztésű képfeldolgozó algoritmus használatával értékeltem ki. Az eredmények kiértékelése után összefoglalással zárul a dolgozatom.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A szálerősítéses polimer (FRP) kompozit anyagok és forgácsolhatóságuk

A szálerősítéses polimer (FRP) kompozitokat alapvetően két komponens alkotja: a nagyszilárdságú erősítőszálak és a szívós mátrix polimer. Az erősítőszálak a megfelelő szilárdság és merevség biztosításaért felelnek, míg a mátrixanyag a szálak helyben tartásának, azok védelmének, illetve a feszültség elosztatásának feladatát látja el. [2] Az anyag kialakításának köszönhetően, lehetőségünk nyílik arra, hogy az anyagsajátosságokat széles tartományon belül módosítsuk, az alkotók tulajdonságait a felhasználási igényeknek megfelelően kombináljuk. Az így létrejövő összetett anyagok kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és ami igazán különlegessé teszi őket, hogy mindemellett sűrűségük lényegesen kisebb a hagyományos szerkezeti anyagokéhoz képest. Így hát nem meglepő, hogy alkalmazásuk széleskörben elterjedt az ipar számos területén.

Habár a szálerősítésű polimer kompozitok gyártása meglehetősen bonyolult, a modern gyártástechnológiák lehetővé teszik, hogy egyetlen műveletben szinte végleges geometriájú alkatrészeket állítsunk elő, azonban legtöbbször még így is szükség van utólagos megmunkálásra ahhoz, hogy az előírt tűréseknek eleget tegyünk. Ezen utólagos megmunkálás általában valamilyen forgácsoló eljárással valósul meg, amely során számos nehézséggel kell szembenéznünk az anyag anizotrop és inhomogén tulajdonságai, továbbá az erősítőszálak abrazív koptató hatása miatt. A megmunkálás során az anyagban geometriai hibák keletkeznek: visszamaradó vágatlan szálak, az elvártnál nagyobb felületi érdességek és delamináció (rétegleválás) kíséri a folyamatot.[3]

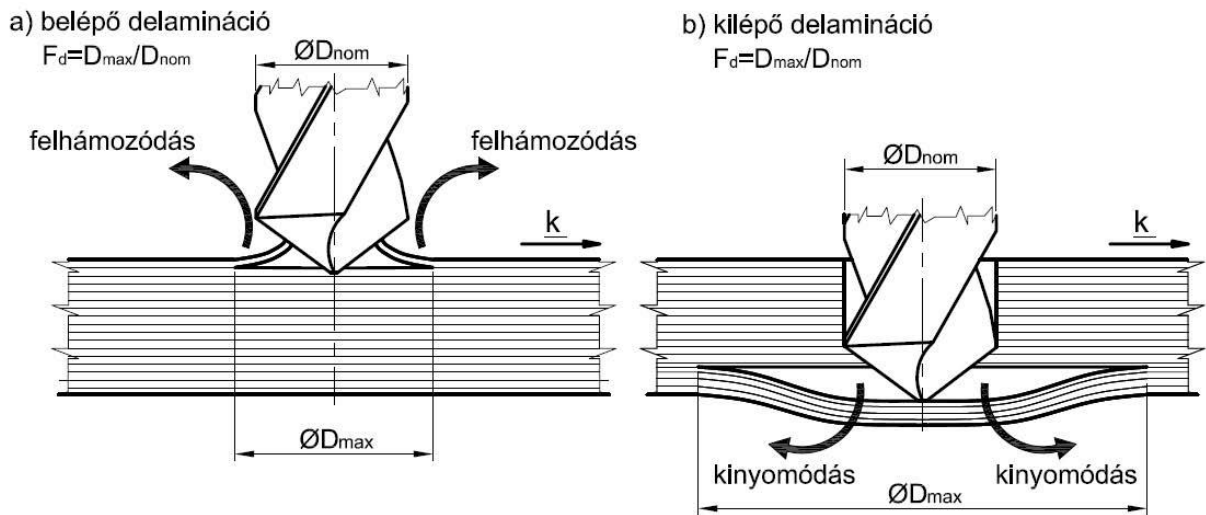


2-1. ábra. A szálerősített polimer (FRP) kompozit anyagok fúrása során keletkező tipikus geometriai hibák [4]

2.2. A delamináció jelensége és keletkezése fúráskor

Delaminációnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a megmunkálás során az anyag laminált rétegei szétválnak egymástól, melynek detektálása és mértékének csökkentése kulcsfontosságú, hiszen a réteghibák nagymértékben rontják az anyag minőségét és eredő szilárdságát.

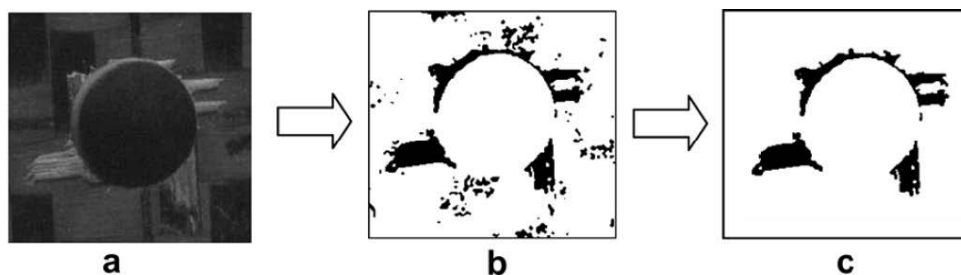
A delamináció keletkezésének oka a forgácsolási erőre vezethető vissza. Amennyiben a forgácsolási erő a laminált rétegekre kedvezőtlen irányban hat, illetve ezen erő mértéke meghalad egy kritikus értéket, úgy a laminált rétegek egymástól szétválnak. A szálerősített polimer (FRP) kompozit anyagok fúrása esetében főként a furat be- és kilépő éleinél érhető tetten ez a jelenség. Belépéskor a fúró főele felszakítja az anyag felső laminált rétegeit („peel-up” vagy felhámozódó típusú delamináció), kilépéskor pedig a fúró kihajlítja az utolsó laminált rétegeket („push-out” vagy kitoló típusú delamináció), így okozva üreghibát. [3]



2-2. ábra. A (a) felhámozódó („peel-up”) és (b) kitoló („push-out”) típusú delamináció keletkezésének sematikus ábrája FRP fúrása esetén [3]

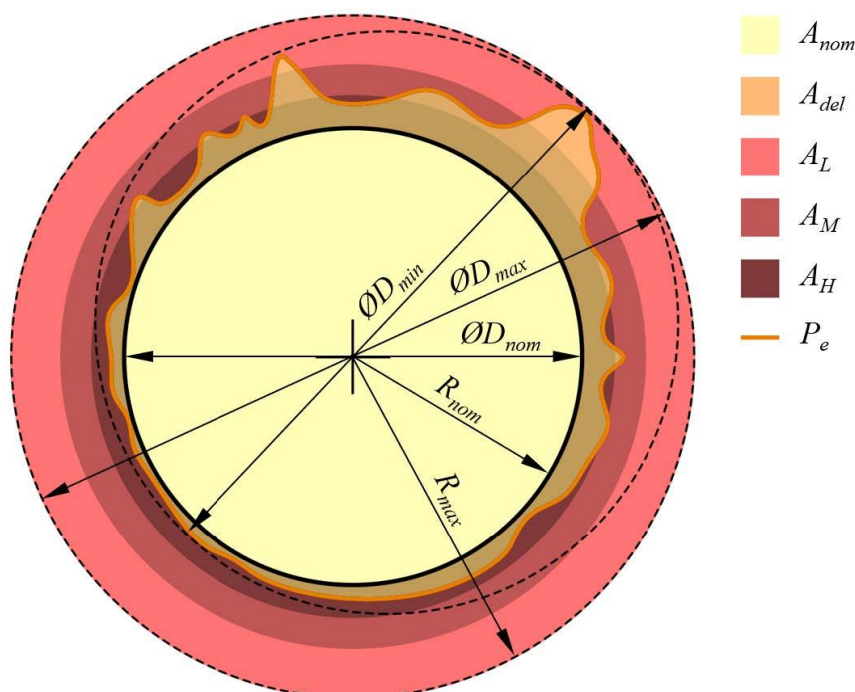
2.3. A delamináció lehetséges mérési módszerei és jellemző merőszámai

A delaminált zóna elemzésére számos módszert fejlesztettek már ki, azonban ezek gyakran csak nagyon körülményesen használhatók. A leginkább elterjedt és viszonylag könnyen alkalmazható módszerek a digitális mikroszkóppal készített felvételek képfeldolgozása, illetve a C-scannelt felvételek vizsgálata. [3] A képfeldolgozás folyamatára mutat példát a 2-3. ábra.



2-3. ábra. A képfeldolgozás folyamata: (a) az eredeti felvétel, (b) a feldolgozás kezdetleges állapota, (c) a képfeldolgozás végeredménye [5]

Köszönhetően annak, hogy a kutatók már több évtizede foglalkoznak a delamináció mérésének és kiértékelésének kérdéskörével, meglehetősen sok mérőszám került bevezetésre. Ezen mérőszámokat delaminációs faktoroknak nevezzük, melyek mértékegység nélküli egy- vagy többdimenziós paraméterek. Ezek segítségével – az adott paraméter számítási módjától függően – számszerűsíteni tudjuk a delaminált zóna nagyságát és/vagy alakját. Így lehetőségünk nyílik arra, hogy összefüggéseket keressünk a technológiai paraméterek és a keletkező delamináció között, és ezáltal minimalizálhatjuk a káros hatásokat. A következőkben bemutatom a szakirodalomban leggyakrabban használt delaminációs faktorokat. Valamennyi paraméter számításához szükséges geometriai jellemzők a 2-4. ábrán láthatók.



2-4. ábra. A delaminációs faktorok számításához szükséges geometriai jellemzők [3]

2.3.1. HAGYOMÁNYOS DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Chen [6] által került bevezetésre, annak céljából, hogy a delamináció mértékét könnyen elemezhesük és összehasonlíthassuk különböző forgácsolási feltételek és munkadarab anyagok esetén. A hagyományos delaminációs faktor a következőképp értelmezendő [6]:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (1)$$

ahol F_d a hagyományos delaminációs faktor, D_{max} a sérült zóna maximális átmérője, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

A mai napig ezen delaminációs faktor használata a legelterjedtebb, köszönhetően egyszerűségének és gyors alkalmazhatóságának. Mindezek mellett fontos megjegyezni, hogy a módszer nem veszi figyelembe a delaminált zóna méretét és alakját, kizárólag annak maximális kiterjedését. Ezáltal előfordulhatnak olyan esetek, amikor a keletkezett delamináció súlyosságáról nem kapunk pontos képet a módszer használatával. [3]

2.3.2. MÓDOSÍTOTT DELAMINÁCIÓS FAKTOR (%)

Annak érdekében, hogy az egy- és kétdimenziós, illetve a kombinált mérőszámok (későbbiekben bemutatásra kerülnek) között jobb összehasonlíthatóság valósuljon meg, Gaugel és munkatársai [7] (továbbiakban: mtsai.) módosították az eredeti delaminációs faktor képletét. A módosított delaminációs faktor számítási módja:

$$F'_d = \frac{(D_{max} - D_{nom})}{D_{nom}} \% \quad (2)$$

ahol F'_d a módosított delaminációs faktor, D_{max} a sérült zóna maximális átmérője, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

2.3.3. INVERZ DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

A hagyományos delaminációs faktor reciprokát véve megkaphatjuk az ún. inverz delaminációs faktort, melynek képlete alább látható [8]:

$$F_{d,inv} = \frac{D_{nom}}{D_{max}} \quad (3)$$

ahol $F_{d,inv}$ az inverz delaminációs faktor, D_{max} a sérült zóna maximális átmérője, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

2.3.4. MINIMÁLIS DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Da Silva [9] munkájában egy új megközelítést javasolt a fúrás okozta károk számszerűsítésére, a minimális delaminációs faktort. Ennek bevezetésével azon igénynek igyekezett eleget tenni, hogy a különböző fúrási módszerekkel keletkező károkat könnyen össze lehessen hasonlítani. Az új módszer megalkotásának háttérében az áll, hogy amennyiben a sérülés mértékének értékelése a cél, úgy a sérült alak irrelevánssá válik. Tehát a delamináció számszerűsítésének középpontjában annak a legkisebb területnek a felmérése kell álljon, amely tartalmazza a fúrási folyamatból származó összes kárt. A minimális delaminációs faktor a következőképp számolandó [9]:

$$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}} \quad (4)$$

ahol F_{dmin} a minimális delaminációs faktor, D_{min} a delaminált zóna köré írható kör átmérője, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

2.3.5. TERÜLETALAPÚ DELAMINÁCIÓS FAKTOR (%)

Akár csak néhány felhámozódó szál, apró leválások is jelentősen megnövelhetik az egydimenziós delaminációs faktorok értékeit, mivel ezen mérőszámok csupán a sérült térség kiterjedését (illesztett körök átmérőit) veszik figyelembe. Az ilyen esetekben kapott eredmények félrevezetőek lehetnek, hiszen az egydimenziós módszerek kevésbé jellemzik jól a valódi károsodást. Ezen probléma kiküszöbölésére Faraz és mtsai. [10] a delaminációs terület és a furat névleges területének százalékos arányát vizsgálták, és a következő formulát javasolták:

$$DF = \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}} \right) \% \quad (5)$$

ahol DF a területalapú delaminációs faktor, A_{del} a delaminációs terület, és A_{nom} a furat névleges területe.

2.3.6. TERÜLETALAPÚ DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Mohan és mtsai [11] egészen hasonlóképpen, mint ahogyan Faraz és mtsai. [10] tették, javasoltak egy új delaminációs mérőszámot, amely a területeket veszi alapul, azonban annak számítási módja kis mértékben eltérő. Az általuk javasolt képlet:

$$F_a = \frac{A_{del}}{A_{nom}} \quad (6)$$

ahol F_a a területalapú delaminációs faktor, A_{del} a delaminációs terület, és A_{nom} a furat névleges területe.

2.3.7. KORRIGÁLT DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Ha a delamináció szabályos mintázatú, akkor a hagyományos delaminációs faktor alkalmazásával is kielégítő eredményt kaphatunk, azonban, ha az anyagban repedések is keletkeznek, úgy már nem érdemes ezt a módszert követni, hiszen a repedés mérete nem alkalmas a károsodás mértékének megfelelő leírására. Továbbá ezen eljárás nem jelzi a sérült terület nagyságát sem, ezért Davim és mtsai. [5] egy új megközelítést dolgoztak ki a delamináció mérésére. Az általuk bevezetett új mérőszám, a korrigált delaminációs faktor:

$$F_{da} = F_d + \frac{A_{del}}{(A_{max} - A_{nom})} \cdot (F_d^2 - F_d) \quad (7)$$

ahol F_{da} a korrigált delaminációs faktor, F_d a hagyományos delaminációs faktor, A_{del} a delaminációs terület, A_{max} a delaminációs zóna maximális átmérőjéhez (D_{max}) tartozó terület, és A_{nom} a furat névleges területe.

Az egyenlet első tagja a repedés hozzájárulásának nagyságát, a második tag pedig a sérült terület hozzájárulását jellemzi. [5]

2.3.8. EKVIVALENS DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Annak érdekében, hogy a delamináció mértékét pontosabban tudjuk leírni, Tsao és mtsai. [12] bevezettek egy új mérőszámot, az ekvivalens delaminációs faktort. Az alapgondolat a hagyományos delaminációs faktor számítási módjából ered, azonban a sérült zóna maximális átmérője helyett egy ún. ekvivalens átmérővel kell számolnunk. Az ekvivalens delaminációs faktor egyenlet formájában:

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_{nom}} \quad (8)$$

ahol F_{ed} az ekvivalens delaminációs faktor, D_e az ekvivalens átmérő, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

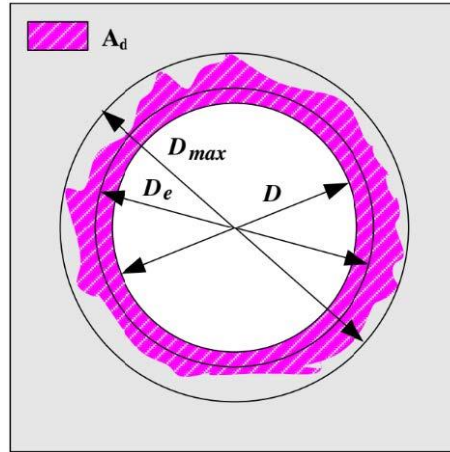
Az ekvivalens átmérőt úgy kapjuk meg, hogy a delaminált terület és a furat névleges területének összegét megfeleltetjük egy ezzel megegyező területű centrikus körnek, melynek átmérője az ekvivalens átmérő:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot (A_{del} + A_{nom})}{\pi}} \quad (9)$$

ahol D_e az ekvivalens átmérő, A_{del} a delaminációs terület, és A_{nom} a furat névleges területe.

A (9) egyenletben kapott összefüggést behelyettesítve a (8) egyenletbe az ekvivalens delaminációs faktor képletének részletesebb alakjához jutunk:

$$F_{ed} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot (A_{del} + A_{nom})}{\pi}}}{D_{nom}} \quad (10)$$



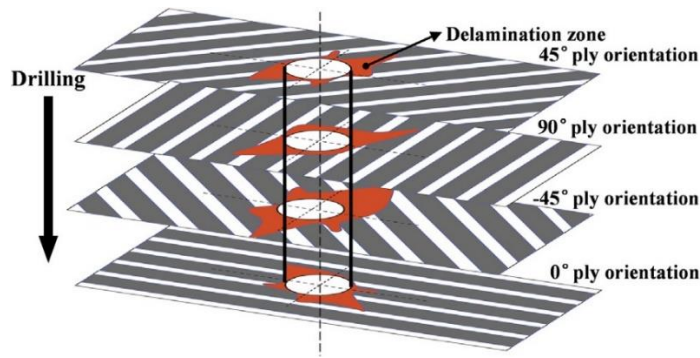
2-5. ábra. Az ekvivalens delaminációs faktor meghatározásához szükséges geometriai jellemzők [12]

2.3.9. HÁROMDIMENZIÓS DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Az előzőekben bemutatott egy- és kétdimenziós módszerekhez képest Xu és mtsai. [13] egy új szintre emelték a delamináció vizsgálatát a háromdimenziós delaminációs faktor bevezetésével. Ezen eljárás mód nem csupán a felületen észlelhető sérüléseket veszi figyelembe, hanem az anyag belsejében lévő összes réteg károsodását. Sajnos ez azt is jelenti, hogy bonyolultabb berendezésekre van szükségünk a vizsgálathoz. Nem elegendő a fénymikroszkóp, helyette C-scan, akusztikus mikroszkóp (SAM) vagy ezekhez hasonló képalkotó eszközök szükségesek. A háromdimenziós delaminációs faktor a következőképp számolható [13]:

$$F_v = \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=1}^p \frac{A_{del}^k}{A_{nom}} \quad (11)$$

ahol F_v a háromdimenziós delaminációs faktor, p a laminált rétegek száma, A_{del}^k a k -edik réteghez tartozó delaminációs terület, és A_{nom} a furat névleges területe.



2-6. ábra. Sematikus ábra a kompozit anyag egyes rétegeiben keletkező fúrás okozta delamináció szemléltetésére [13]

2.3.10. EFFEKTÍV EGYENÉRTÉKŰ DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Hasonlóan az előzőekhez Babu és mtsai. [14] ugyanazon felismerésre jutottak, miszerint az egyszerűbb delaminációs faktorok nem igazán veszik figyelembe a repedéseket, kevésbé precízen jellemzik a keletkezett sérülést. Ezt a problémát egy általuk javasolt új mérőszámmal igyekeztek orvosolni, amely egyenlő súllyal veszi számításba a repedés hosszát és a sérült területet. Az új mérőszám az effektív egyenértékű delaminációs faktor elnevezést kapta. Ennek értéke az alábbi egyenlettel számolható:

$$FEED = \frac{D_{ea} + D_{ep}}{2 \cdot D_{nom}} \quad (12)$$

ahol $FEED$ az effektív egyenértékű delaminációs faktor, D_{ea} az ekvivalens átmérő a sérült zóna és a furat közös burkoló területére vonatkozóan, D_{ep} az ekvivalens átmérő a sérült zóna kerületére vonatkozóan, és D_{nom} a furat névleges átmérője.

Az egyenértékű átmérőket a következőképpen határozhatjuk meg:

$$D_{ea} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_e}{\pi}} \quad (13)$$

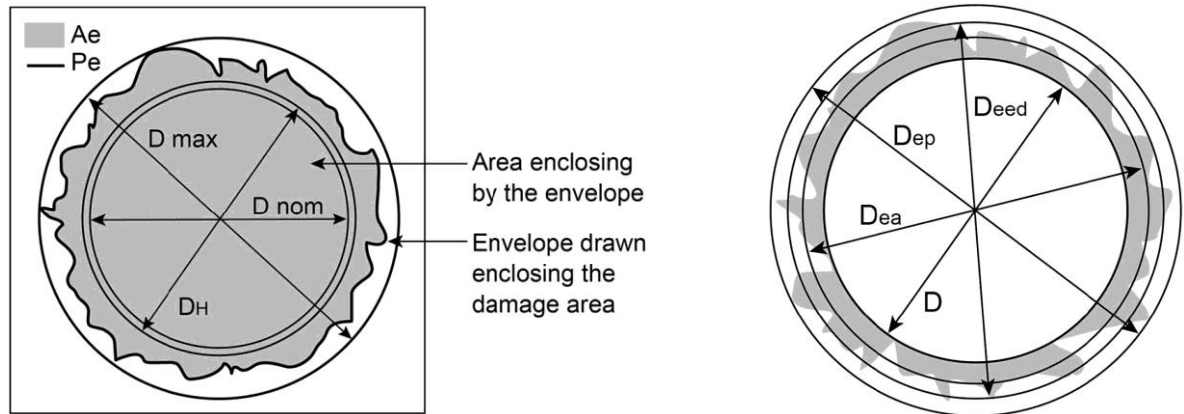
ahol D_{ea} az ekvivalens átmérő a sérült zóna és a furat közös burkoló területére vonatkozóan, és A_e a burkoló terület.

$$D_{ep} = \frac{P_e}{\pi} \quad (14)$$

ahol D_{ep} az ekvivalens átmérő a sérült zóna kerületére vonatkozóan, és P_e a sérült zóna kerülete.

Mindent összevetve az effektív egyenértékű delaminációs faktor részletes alakja:

$$FEED = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot A_e}{\pi}} + \frac{P_e}{\pi}}{2 \cdot D_{nom}} \quad (15)$$



2-7. ábra. Az effektív egyenértékű delaminációs faktor meghatározásához szükséges geometriai jellemzők [14]

2.3.11. FINOMÍTOTT DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Nagarajan és mtsai. [15] kutatásuk során arra a következtetésre jutottak, hogy a hagyományos és a korrigált delaminációs faktorok nem veszik figyelembe a károsodás súlyosságának hatását, és így egy új mérőszám kidolgozása szükséges. Az általuk megalkotott új módszer a károsodás súlyossága szerint (erősen, közepesen és enyhén sérült területek) három csoportba osztja a delaminált térséget, és ezeket különböző súlyokkal veszi számításba. A finomított delaminációs faktor képlete:

$$F_{DR} = \frac{D_{max}}{D_{nom}} + 1,783 \cdot \frac{A_H}{A_{nom}} + 0,7156 \cdot \left(\frac{A_M}{A_{nom}} \right)^2 + 0,03692 \cdot \left(\frac{A_L}{A_{nom}} \right)^3 \quad (16)$$

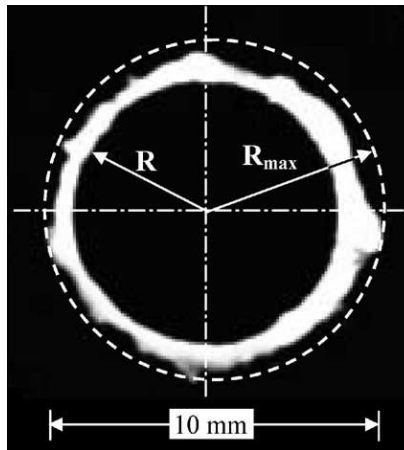
ahol D_{max} a sérült zóna maximális átmérője, D_{nom} a furat névleges átmérője, A_H az erősen sérült terület, A_M a közepesen sérült terület, A_L az enyhén sérült terület, és A_{nom} a furat névleges területe.

2.3.12. SUGÁRALAPÚ DELAMINÁCIÓS FAKTOR (1)

Khashaba [16] által bevezetett egyszerű delaminációs mérőszám, amely a sugarakat veszi a számítás alapjául. A sugáralapú delaminációs faktor egyenlete:

$$R_d = R_{max} - R_{nom} \quad (17)$$

ahol R_d a sugáralapú delaminációs faktor, R_{max} a sérült zóna maximális sugara, és R_{nom} a furat névleges sugara.



2-8. ábra. A sugáralapú delaminációs faktor számításához szükséges geometriai jellemzők [16]

2.3.13. DELAMINÁCIÓ KÖRKÖRÖSSÉGE (1)

Durão és mtsai. [17] azt javasolták, hogy a delamináció vizsgálatakor figyelembe kéne venni a sérült terület alakját, amely összefüggésbe hozható a körkörösséggel. A körkörösséget a delaminált zóna kerületének és területének ismeretében a következő egyenlettel határozhatjuk meg:

$$F_{df} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{A_{del}}{P_e^2} \quad (18)$$

ahol F_{df} a delamináció körkörössége, A_{del} a delaminációs terület, és P_e a sérült zóna kerülete.

A körkörösség értéke 1 egy tökéletes kör esetén, és sokkal kisebb a kitágult alakzatok esetében.

2.3.14. A DELAMINÁCIÓS MÉRŐSZÁMOK ÖSSZEFOGLALÁSA

A nemzetközi szakirodalomban számos delaminációs mérőszám került bevezetésre, és van használatban, amelyek rendszerint a geometriai jellemzők vizsgálatán alapuló modellegyenletek. Ezek közül a leginkább elterjedt mérőszám a hagyományos delaminációs faktor, köszönhetően annak, hogy meglehetősen egyszerű és gyors kiértékelést tesz lehetővé. Azonban a módszer egyszerűségének az árnyoldala, hogy nem veszi figyelembe a delaminált térség alakját és területét sem. Ezért a kutatók előálltak egyre bonyolultabb alternatívákkal, amelyek precízebb módon írják le a delamináció mértékét, viszont még mindig nem született olyan formula, amely esetében pontosan meghatározható lenne a delamináció mértéke és az anyag szilárdságcsökkenése közötti kapcsolat. Ennek okán a mai napig kutatások tárgyát képezi ezen kérdéskör. [3] Az előzőekben bemutatott mérőszámok a 2-1. táblázatban összefoglaltn láthatók.

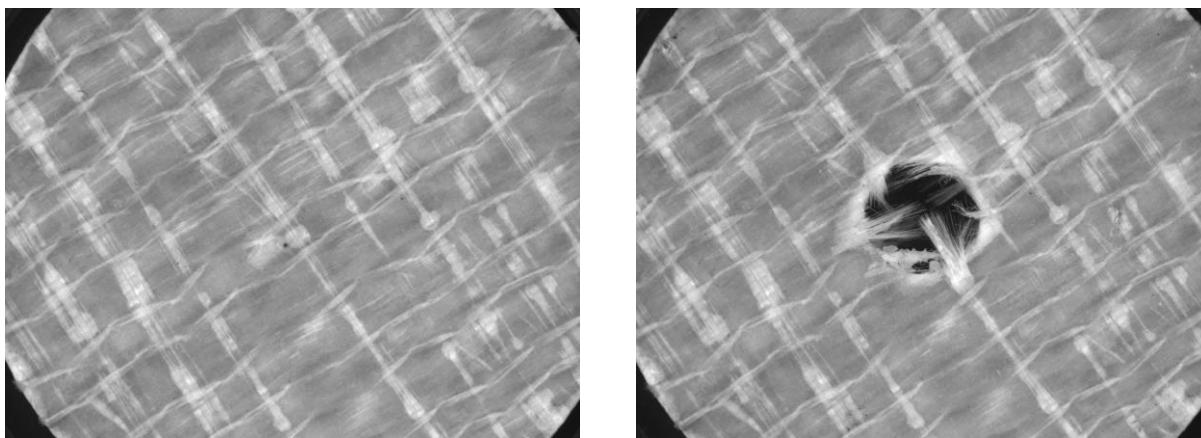
Megnevezés (mértékegység)	Képlet	Hivatkozás
Hagyományos delaminációs faktor (1)	$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$	Chen [6]
Módosított delaminációs faktor (%)	$F'_d = \frac{(D_{max} - D_{nom})}{D_{nom}} \%$	Gaugel és mtsai. [7]
Inverz delaminációs faktor (1)	$F_{d,inv} = \frac{D_{nom}}{D_{max}}$	Khanna és mtsai. [8]
Minimális delaminációs faktor (1)	$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$	Da Silva [9]
Területalapú delaminációs faktor (%)	$DF = \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}} \right) \%$	Faraz és mtsai. [10]
Területalapú delaminációs faktor (1)	$F_a = \frac{A_{del}}{A_{nom}}$	Mohan és mtsai. [11]
Korrigált delaminációs faktor (1)	$F_{da} = F_d + \frac{A_{del}}{(A_{max} - A_{nom})} \cdot (F_d^2 - F_d)$	Davim és mtsai. [5]
Ekvivalens delaminációs faktor (1)	$F_{ed} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot (A_{del} + A_{nom})}{\pi}}}{D_{nom}}$	Tsao és mtsai. [12]
Háromdimenziós delaminációs faktor (1)	$F_v = \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=1}^p \frac{A_{del}^k}{A_{nom}}$	Xu és mtsai. [13]
Effektív egyenértékű delaminációs faktor (1)	$FEED = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot A_e}{\pi}} + \frac{p_e}{\pi}}{2 \cdot D_{nom}}$	Babu és mtsai. [14]
Finomított delaminációs faktor (1)	$F_{DR} = \frac{D_{max}}{D_{nom}} + 1,783 \cdot \frac{A_H}{A_{nom}} + 0,7156 \cdot \left(\frac{A_M}{A_{nom}} \right)^2 + 0,03692 \cdot \left(\frac{A_L}{A_{nom}} \right)^3$	Nagarajan és mtsai. [15]
Sugáralapú delaminációs faktor (1)	$R_d = R_{max} - R_{nom}$	Khashaba [16]
Delamináció körkörössége (1)	$F_{df} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{A_{del}}{p_e^2}$	Durão és mtsai. [17]

2-1. táblázat. A bemutatott mérőszámok összefoglalása

3. A KÉPFELDOLGOZÓ ALGORITMUS BEMUTATÁSA

3.1. Képek készítése a munkadarabról

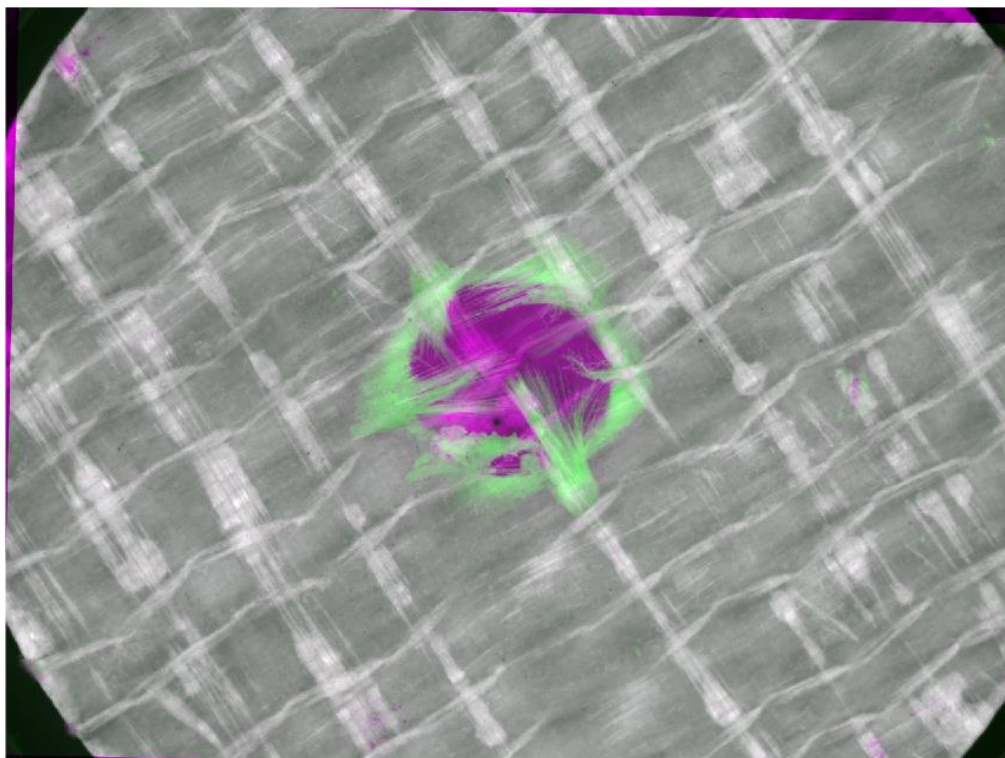
Első lépésben szükséges jó minőségű képeket készítenünk a vizsgálandó GFRP munkadarabról, ehhez célszerű digitális mikroszkópot alkalmazni. Fúrás előtt és után is, illetve a munkadarab egyik és másik oldallapjáról egyaránt felvételeket készítünk, hogy a későbbiekben összehasonlítható legyen a változás, valamint, hogy a be- és kilépő delaminációt is vizsgálhassuk. Érdekes valamilyen – a mikroszkóp tárgyasztalára rögzíthető – eszközt használnunk a munkadarabok megfelelő ismétlési pontoságú pozicionálása végett, ezzel könnyebbé téve a képek későbbi elemzését. A megvilágítás módja többféle is lehet, azonban a dóm típusú megvilágítás bizonyult a legalkalmasabbnak.



3-1. ábra. Fúrás előtt és után készült képek a munkadarab kilépő oldaláról, dóm típusú megvilágítás mellett

3.2. Képek egymásra illesztése és a köztük lévő eltérés meghatározása

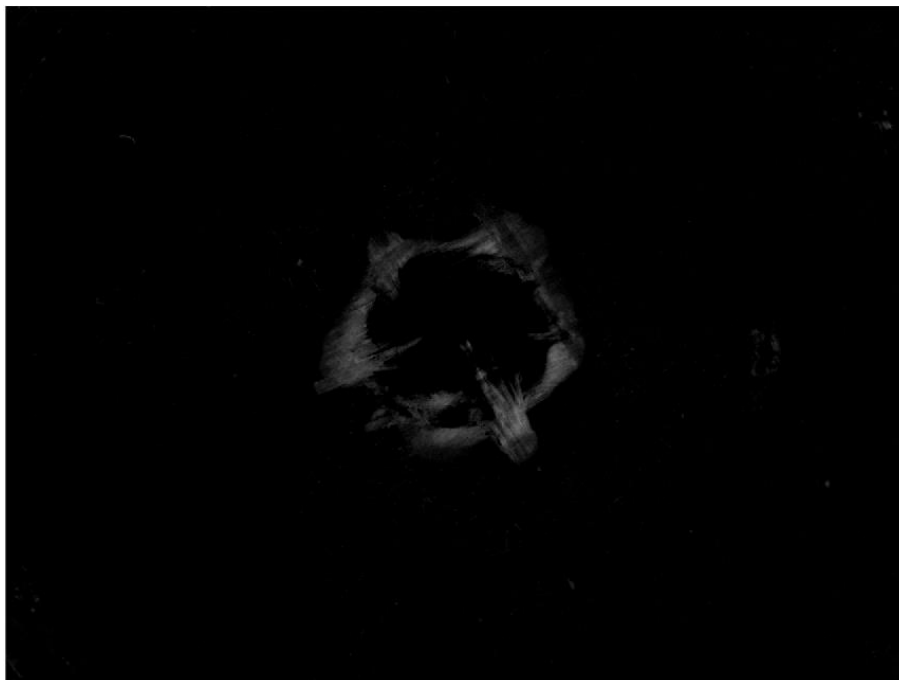
Még ha fokozottan ügyelünk is arra, hogy a munkadarabokat fúrás előtt és után ugyanazon pozícióba helyezzük a mikroszkóp alá, a készített képek minimálisan, de eltérő orientáltságúak lesznek. Ennélfogva valamilyen úton-módon először fedésbe kell hoznunk a két képet ahhoz, hogy vizsgálhassuk az eltéréseket. Ehhez segítségül szolgálnak a Matlab beépített képfeldolgozó függvényei. A képek importálása után a megfelelő függvény meghívásával a két kép fedésbe hozható translációk, rotációk, illetve szükség esetén átskalázás útján. Egy további parancssorral lehetőségünk van szemléltetni a két kép közötti eltéréseket is.



3-2. ábra. A fúrás előtti és utáni képek egymásra illesztése és a köztük lévő eltérések megjelenítése

A fenti ábrán jól láthatóak az eltérések: a furatkontúrón túlnyúló delaminált zóna és a furatba benyúló sorja, illetve vágatlan szálak. Habár szemléletes az ábra, további lépésekre van szükség a kiértékeléshez. Ahhoz, hogy csupán az eltérő képkockákat lássuk és megszabaduljunk a számunkra felesleges háttértől, először vesszük a két kép különbségét, majd ezen kép negatívját képezzük.

A Matlab környezetbe importált képfájlokat a szoftver mátrixokban tárolja, amely mátrixok elemei az adott képet felépítő képkockákat reprezentálják, és értékük az adott képkockák szürkeségi értékeivel egyeznek meg. Ezáltal a furat előtti és utáni képek közötti eltéréseket értelmezhetjük mátrixok különbségeként. A szürkeségi érték 0 és 255 között értelmezett, 0 jelenti a fekete színt, 255 a fehér színt. Tehát, ha képezzük a két kép különbségét, akkor az egyező szürkeségi értékkel rendelkező képkockák helyein 0-t kapunk, azaz feketét, a többi helyen pedig a megváltozás mértékének függvényében sötétebb és világosabb képkockákat eredményez. Annak érdekében, hogy elkerüljük az esetleges negatív szürkeségi értékű elemeket, a különbség abszolút értékét vesszük. Az ily módon létrehozott új képen az látható, hogy minél világosabb egy adott terület, annál nagyobb változáson ment keresztül a fúrás során. A két kép különbségének abszolút értéke a 3-3. ábrán látható.



3-3. *ábra.* A fúrás előtti és utáni képek különbségének abszolút értéke

A szemléletesebb megjelenés érdekében érdemes képeznünk ezen kép negatívját. Ehhez először is létrehozunk egy segédmátrixot, amely méretét tekintve megegyezik a szóban forgó kép mátrixának méretével, viszont minden elemét 0-val töltjük fel. Ha a segédmátrixból kivonjuk a képhez tartozó mátrixot és vesszük ezen különbség abszolút értékét, úgy megkapjuk a kép negatívját. Az előző képpel ellentétben, ezen már a minél sötétebb területek jelentik a nagyobb megváltozást. A kép negatívját a 3-4. *ábrán* láthatjuk.

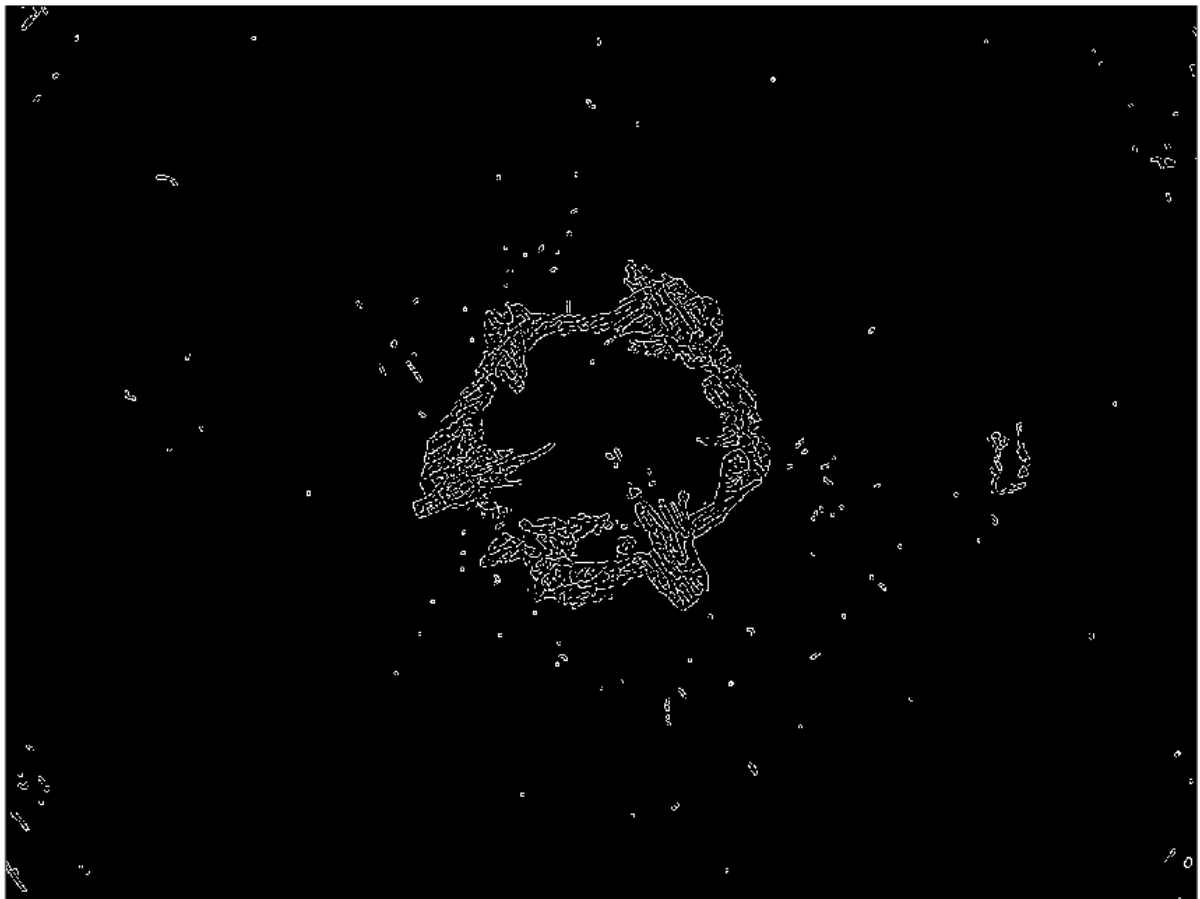


3-4. *ábra.* Az előzőekben meghatározott kép negatívja

3.3. A furatba benyúló sorja eltávolítása

Mivel számunkra csupán a furatkontúron túli, delaminált területek a fontosak, így a furaton belüli sorjás részeket el kell távolítanunk a képről. Ehhez egy kört kell illesztenünk a furat kontúrájára, majd az illesztett körön belüli területeket kivágni.

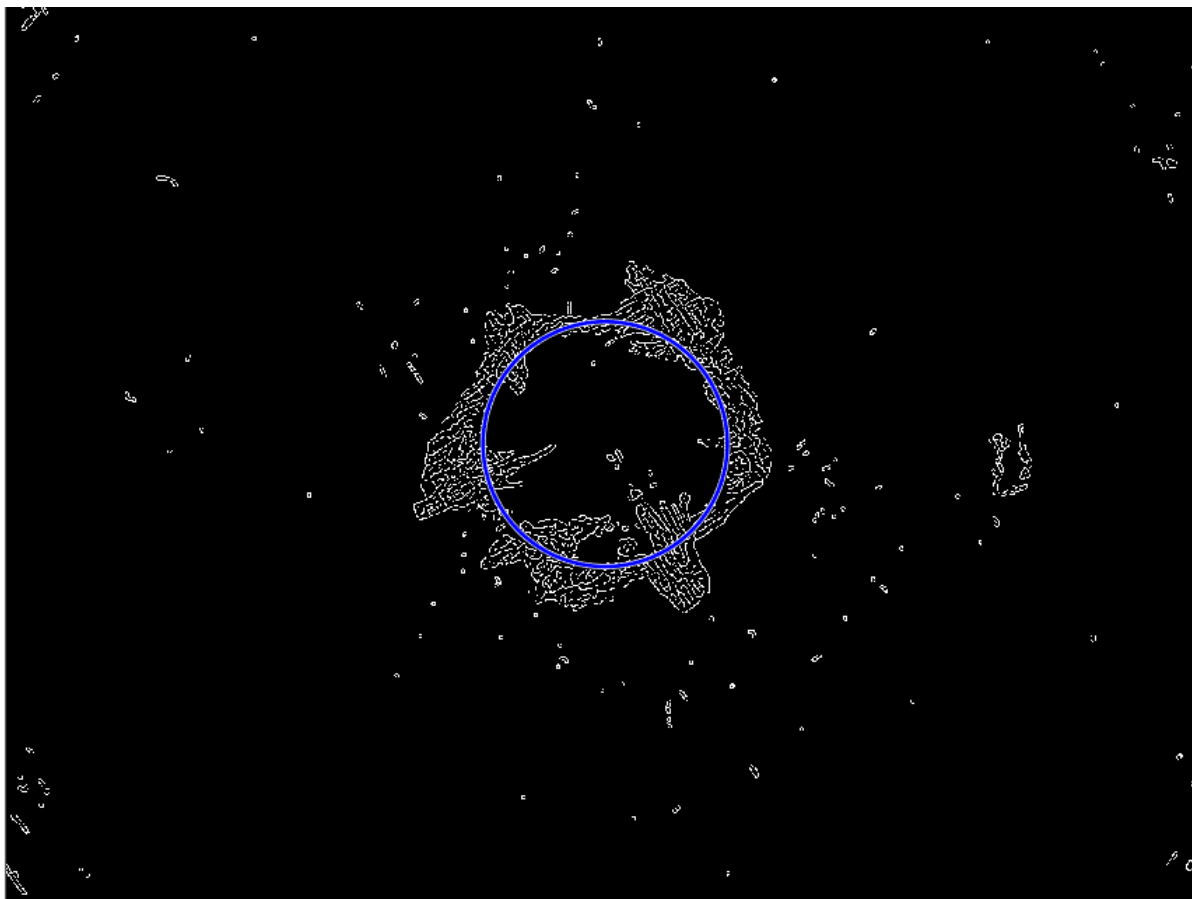
Első lépésben érdemes egy élkereső algoritmust lefuttatni, ezzel is könnyebbé téve a későbbi körillesztést. A Matlab számos lehetőséget kínál az élkeresési algoritmusok terén, azonban a Canny-féle élkeresési metódus mutatkozott a legelőnyösebbnek munkám során. Az élkeresési algoritmus része a binarizálás, azaz a kép átalakítása – adott küszöbérték alkalmazásával – kizárólag fekete és fehér képkockákra. Az élkereső algoritmus lefuttatása utáni képet láthatjuk a 3-5. ábrán, immáron binarizált kép formájában.



3-5. ábra. Az élkereső algoritmus eredménye

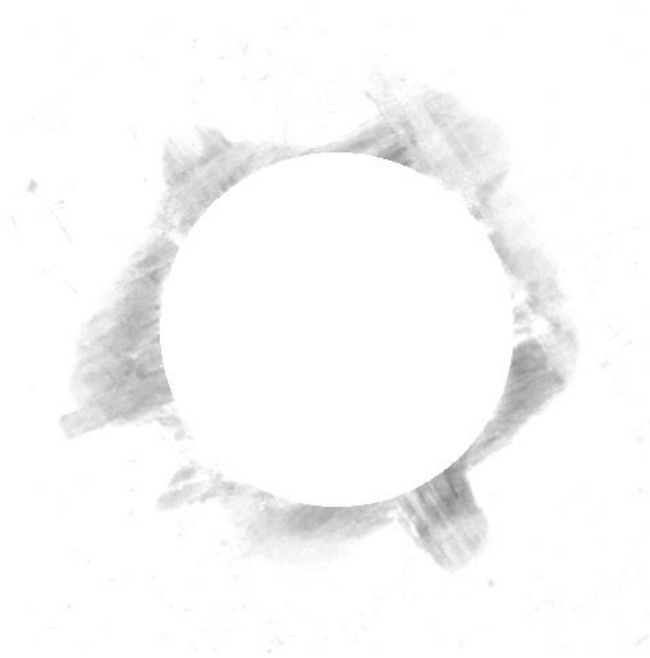
A fenti ábrán jól kivehető a furat kontúrája, erre már viszonylag könnyen alkalmazhatóak a körillesztő algoritmusok. A kör illesztése során szükséges behatárolnunk a keresett kör sugarának alsó és felső határát. Ehhez segítségünkre lehetnek a szoftver beépített funkciói, amelyekkel a képen kijelölve két pontot hozzájuthatunk a két pont közötti távolság értékéhez képkockákban mérve. Azonban enélkül is könnyűszerrel megtudhatjuk a keresett sugár értékét oly módon, hogy a határértékek megadásával

addig kísérletezünk, míg jó eredményre nem jutunk. Érdeemes leszűkíteni ezt a tartományt amennyire csak lehetséges az esetleges hibás körillesztések elkerülése végett. A körillesztésre is számos eljárás létezik, ezek közül a leghatékonyabbnak a kétlépcsős Hough transzformációt alkalmazó módszert találtam. További beállítási lehetőség a keresési érzékenység, ennek értékét 0,99-re állítottam. A körillesztési algoritmus eredményét a 3-6. ábra. mutatja.



3-6. ábra. A furat kontúrára illesztett kör

A körillesztő algoritmus lefuttatásával nem csupán grafikus eredményt kapunk, a szoftver az illesztett kör paramétereit (a kör középpontjának koordinátáit és a kör sugarát) is elmenti egy-egy változóban. Ezáltal lehetőségünk adódik eltávolítani (fehérré tenni) minden olyan képkockát, amelyet az illesztett kör magába foglal. Ezenfelül méretre is tudjuk vágni a képeket – a kör középpontjának és sugarának ismeretében –, hogy kizárólag a számunkra fontos részeket tartalmazza. Ezzel csökkenthetjük a későbbi műveletek számításigényét és a kép zajosságát is. Az illesztett kör által határolt terület eltávolítása és a kép méretre vágása utáni állapotot a 3-7. ábrán láthatjuk.

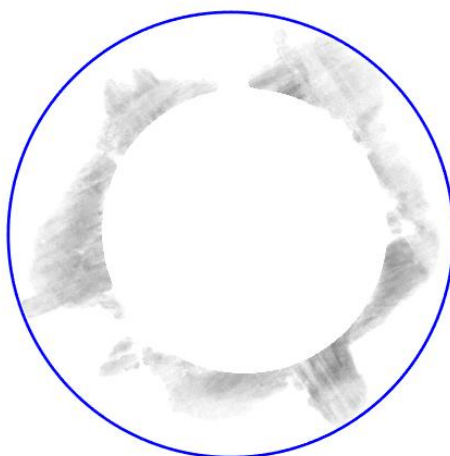


3-7. ábra. A sorja nélküli méretre vágott kép

3.4. A kép zajszűrése

Habár már szemmel jól látható a delaminált térség, ahhoz, hogy a delaminációs mérőszámok meghatározásához szükséges geometriai jellemzőket (köré írható körök átmérő, delaminációs terület stb.) kinyerjük a képből, további műveletekre lesz szükségünk, a képet terhelő zajt szűrnünk kell.

A szűrést érdemes több lépésben, kissé iteratív módon elvégezni annak érdekében, hogy a számunkra értékes információkból a lehető legkevesebbet veszítsük el. Először egy viszonylag durva szűrést végzünk, amivel megszabadulunk a delaminált térségen túli kisebb-nagyobb foltoktól, zavarásoktól, viszont ezzel sajnos a delaminált térséget is megritkítjuk. A szűrés az egybefüggő területek nagysága alapján történik. Első lépésben 5 pixelnek választottam a küszöbértéket, azaz az 5 képkockánál kisebb egybefüggő területtel bíró objektumokat távolítjuk el. A delaminált térség külső kontúrja jó közelítéssel változatlan marad ilyen beállítások mellett. Az így kapott durva szűrésen átesett képet már használhatjuk arra, hogy megkeressük a delaminált zóna köré írható legkisebb kört. Ez azért fontos, mert a legkisebb köré írható kör ismeretében már megtehetjük azt, hogy minden képkockát, ami a körön kívül esik fehérre teszünk. Tehát ha a szűrés előtti kiinduló képhez visszanyúlunk és elvégezzük rajta az imént taglalt műveletet, akkor már jó eséllyel lényegesen kisebb küszöbértékkel is elegendő elvégeznünk a kép szűrését. Ennek köszönhetően a számunkra fontos delaminált térség is kevésbé veszti el eredeti jellegét. Annak érdekében, hogy biztosan ne távolítsunk el fontos részeket a delaminált térségből, érdemes lehet a megkeresett köré írható kör átmérőjénél egy minimálisan nagyobb átmérővel dolgoznunk. A leírt szűrési folyamat lépései a következő ábrákon láthatók:



3-8. *ábra.* Az első (durva) szűrés eredménye és a delaminált térség köré írható legkisebb kör



3-9. *ábra.* A köré írható körön kívüli pontok eltávolítása a kiinduló képről

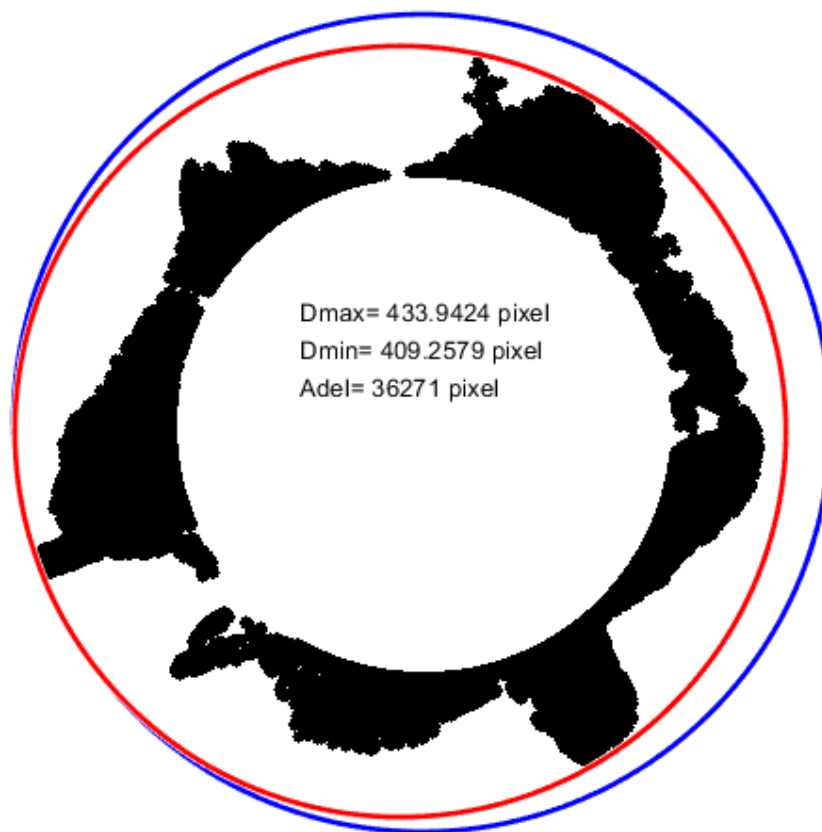


3-10. *ábra.* Az újbóli (finom) szűrés eredménye

3.5. A szükséges geometriai jellemzők meghatározása

A delaminációs mérőszámok meghatározásához szükségünk van bizonyos geometriai jellemzőkre, az adott módszertől függően lehetnek ezek sugarak, átmérők, területek, kerületek.

A sugár/átmérő értékeket az adott kör illesztésekor megkapjuk, a szükséges területek nagyságát pedig az érintett zónába tartozó képkockák megszámlálásával tudjuk kalkulálni. A delaminált térség kerületét nehezebb meghatározni, főleg, ha a delaminált zóna nem egybefüggő, szakadásokkal rendelkezik. Mivel a szűrés végeredményeként kapott kép továbbra is megőrizte szürkeárnyaltos (nem binarizált) mivoltát, így aszerint is lehetőségünk van vizsgálni, hogy az adott területek milyen mértékben károsodtak. A meghatározott geometriai jellemzőkre mutat példát a 3-11. ábra.



3-11. ábra. A képfeldolgozó algoritmus végeredménye (a szemléletesség érdekében binarizált formában)

A geometriai jellemzők ismeretében már lehetőségünk van a különféle delaminációs mérőszámok meghatározására, és azok értékeinek összevetésére az alkalmazott forgácsolási paraméterekkel, mért erőadatokkal.

4. A KÍSÉRLETI KÖRNYEZET ÉS A FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK

4.1. Kísérletterv

A rendelkezésre álló erőforrások (munkadarab, szerszám, idő) limitáltsága miatt törekedni kellett a kísérletek számának minimalizálására, ezért a kísérletterv összeállítását a central composite face-centered (CCF) kísérlettervezési módszerrel végeztem el. A fúrási kísérletek során az előtolás (f_z), a forgácsolási sebesség (v_c) és az alkalmazott szerszám (T_n) hatását vizsgáltam. Annak érdekében, hogy a környezeti hatások ne szisztematikusan terheljék a kísérleti eredményeket, az elvégzendő kísérletek sorrendje randomizálva lett.

Kísérlet sor-száma	Fordulatszám (n) [1/min]	Előtolási sebesség (v_f) [mm/min]	Szerszám (T_n) [-]
1	8488	2546	T1
2	10610	1061	T1
3	8488	2546	T1
4	8488	2546	T1
5	8488	849	T1
6	6366	1910	T1
7	10610	2122	T1
8	6366	637	T1
9	10610	3183	T1
10	8488	2546	T1
11	8488	2546	T1
12	8488	2546	T1
13	6366	1273	T1
14	8488	1273	T2
15	10610	531	T2
16	8488	1273	T2
17	8488	1273	T2
18	8488	424	T2
19	6366	955	T2
20	10610	1061	T2
21	6366	318	T2
22	10610	1592	T2
23	8488	1273	T2
24	8488	1273	T2
25	8488	1273	T2
26	6366	637	T2

4-1. táblázat. A fúrási kísérletterv

4.2. Kísérleti környezet

A kísérletek a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék laboratóriumában lettek elvégezve. A szükséges fúrási műveletek egy NCT VHTC-130 típusú öttengelyes billenőfejes CNC marógépen lettek végrehajtva. A keletkező forgács eltávolítása egy NILFISK GB733 típusú ipari porszívó segítségével történt. A fúráshoz használt szerszámok: egy Ø6 FRAISA 20360302 típusú keményfém csigafúró (T1), és egy Ø6 TIVOLY 82329710600 típusú egyélű keményfém szármaró (T2). A fúrás közben hűtőkenő folyadék nem volt alkalmazva. A megmunkálás során egyedi fúrókészülék volt használva, amely biztosította a munkadarab körperemén való rögzítését.

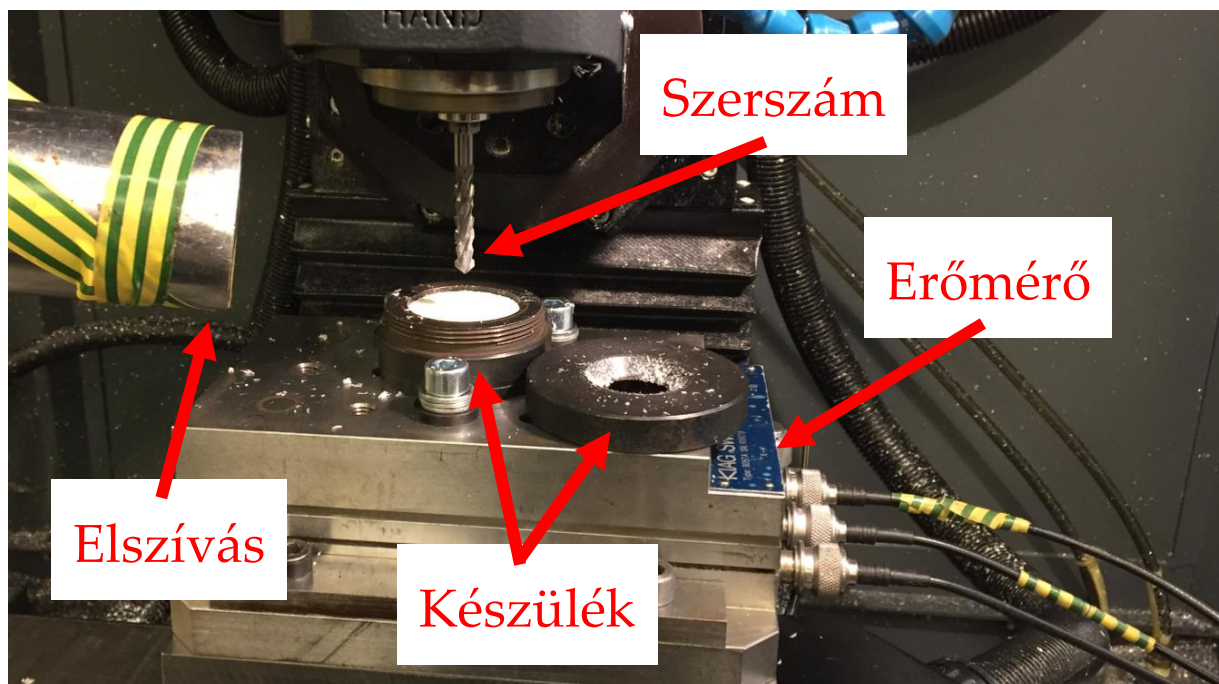


4-1. ábra. A kísérleti környezet

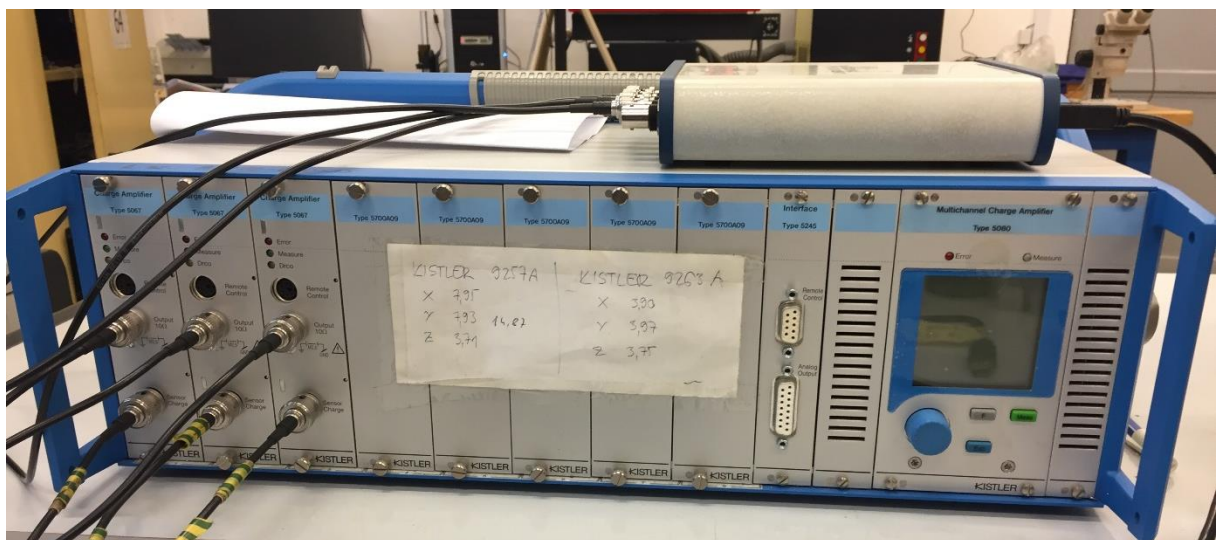


4-2. ábra. A használt szerszámok és a készülék

A fúrás során ébredő erőértékek mérése egy KISTLER 9257A típusú piezoelektromos háromkomponenses erőmérő szenzorral történt. A jelek erősítésére egy KISTLER 5080 típusú többcsatornás töltéserősítő szolgált. A mintavételezett jelek végül egy National Instruments USB-4431 típusú adatgyűjtő kártyával lettek gyűjtve. A mért adatok egy erre a célra megírt LabView programban kerültek rögzítésre, majd txt formátumba lettek exportálva. A mintavételezési frekvencia megválasztása aszerint történt, hogy az alkalmazott legnagyobb fordulatszám mellett is legalább 5°-onkénti mintavételezés valósuljon meg. A választott mintavételezési frekvencia: 12732 Hz. A mérési határ 500 N-ra, az erősítés 50 N/V értékekre lettek beállítva.



4-3. ábra. A megmunkálási tér

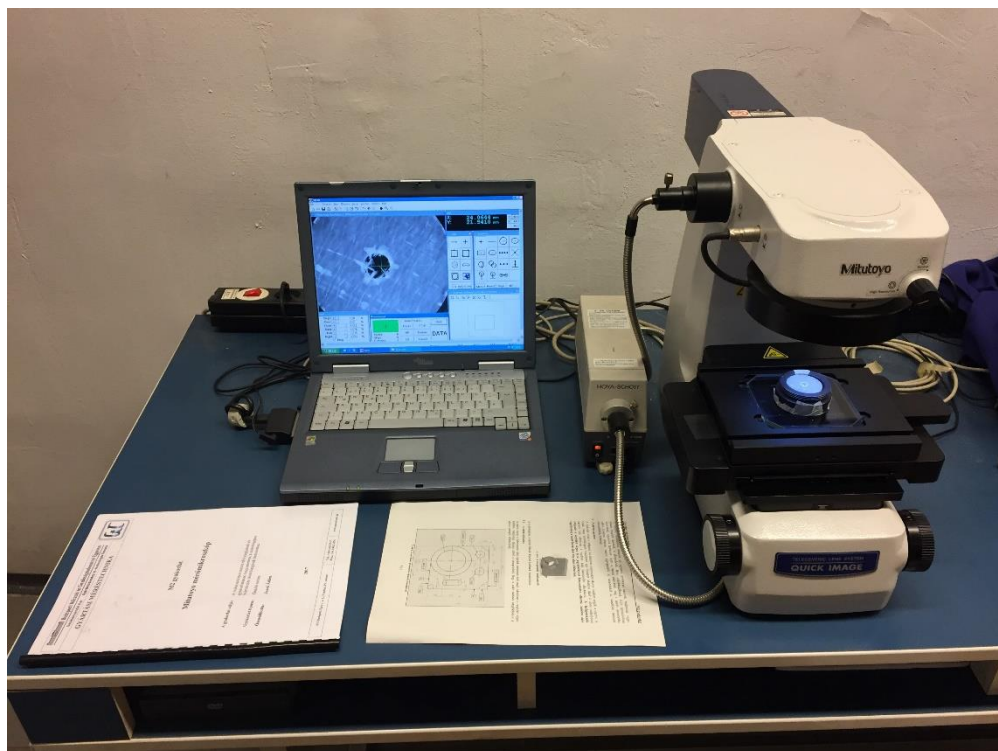


4-4. ábra. KISTLER 5080 típusú töltéserősítő



4-5. ábra. National Instruments USB-4431 típusú adatgyűjtő kártya

A munkadarabokról egy Mitutoyo Quick Image QI-A505 típusú digitális mikroszkóp segítségével készültek a felvételek. A mikroszkóp többféle megvilágítási módban is alkalmazva volt, azonban csak a dóm típusú megvilágítás mellett készített képek kerültek kiértékelésre. A megvilágítás minden esetben a mikroszkóp maximális teljesítményének 76%-val történt.

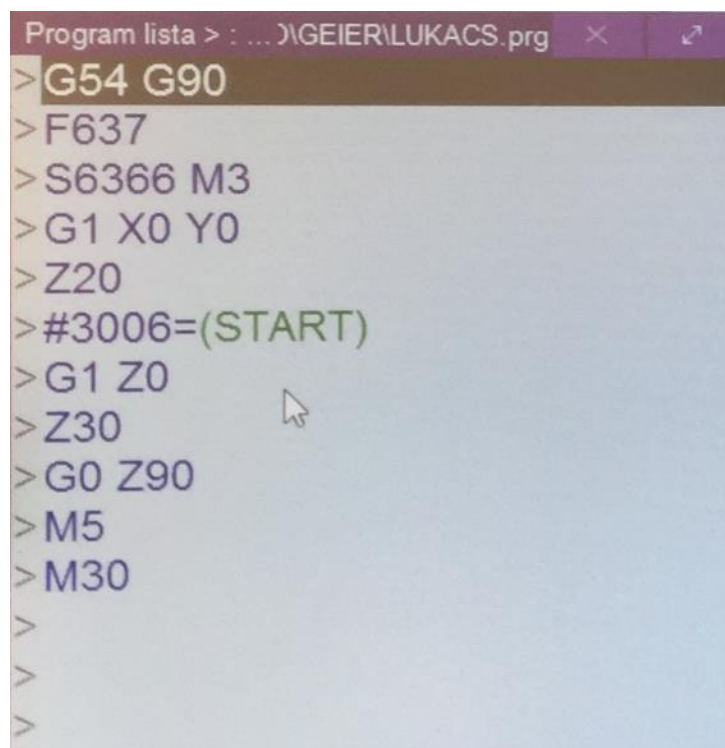


4-6. ábra. Képek készítése a munkadarabokról

A kísérletek elvégzése a következőképp zajlott:

1. Munkadarabok mindkét oldaláról felvételek készítése
2. Fúrás (összesen 26 fúrási művelet)
 - a. Munkadarab rögzítése a készülékbe
 - b. Munkadarab fölé pozicionálás a szerszámmal
 - c. Porszívó bekapcsolása
 - d. Mintavételezés megkezdése
 - e. Fúrási művelet végrehajtása
 - f. Mintavételezés megállítása
 - g. Porszívó kikapcsolása
 - h. Munkadarab eltávolítása a készülékből
3. Munkadarabok mindkét oldaláról felvételek készítése

A fúrási műveletek során használt NC program a 4-7. ábrán látható.



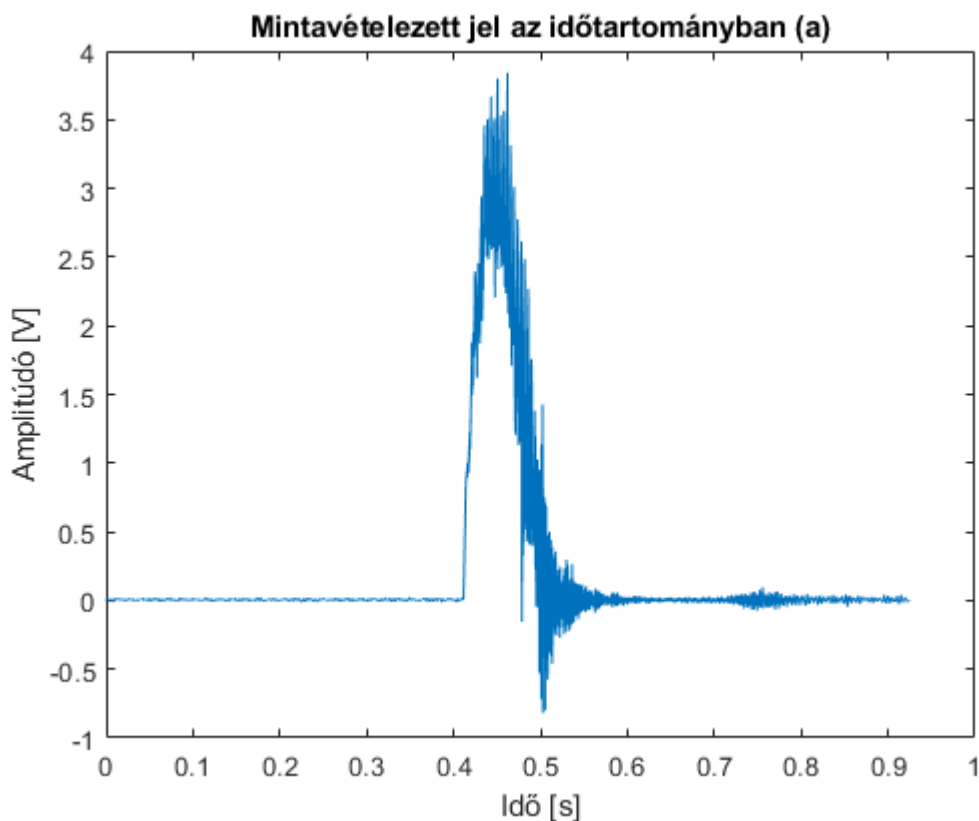
```
Program lista > : ... \GEIER\LUKACS.prg
> G54 G90
> F637
> S6366 M3
> G1 X0 Y0
> Z20
> #3006=(START)
> G1 Z0
> Z30
> G0 Z90
> M5
> M30
>
>
>
```

4-7. ábra. A fúrási műveletek elvégzésére használt NC kód

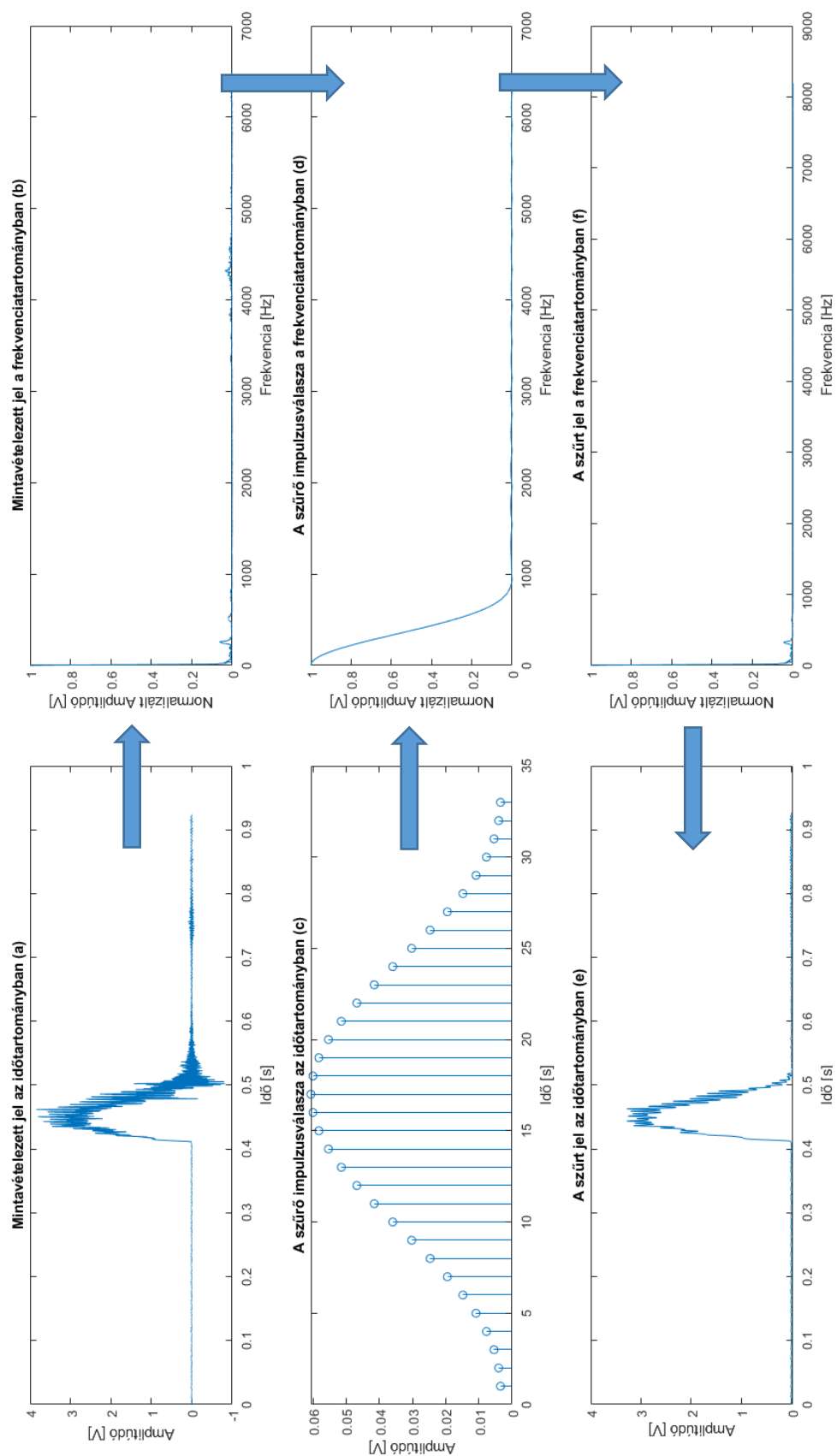
5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

5.1. Forgácsolási erő

A mintavételezett erőjel kiértékeléséhez először szükséges a jel szűrése, majd a szűrt jel maximumának keresése. Ezen lépéseket ugyancsak Matlab környezetben végeztem el. A szűréshez első lépésben szükségünk van a jel amplitúdó spektrumára, ehhez gyors Fourier-transzformációt alkalmaztam. Ezután definiáltam egy aluláteresztő szűrőt, amely a nagyfrekvenciás zajt hivatott kiszűrni. A létrehozott szűrő függvényét is gyors Fourier-transzformációnak vettem alá, így áttérve az időtartományból a frekvenciatartományba. A frekvenciatartományban lévő eredeti jelet és a szűrő válaszjelét egymással megszorozva megkapjuk a szűrt jelet, továbbra is a frekvenciatartományban. Ezután már nincs más dolgunk, mint egy inverz gyors Fourier-transzformációval visszaalakítani a szűrt jelet az időtartományba. Így már egy egyszerű maximumkereső függvénnyel meghatározható az ébredő erők maximumértéke. Az imént bemutatott lépéseket csupán a mért erőjelek előtolás irányú komponensein végeztem el, mivel előzetes ismeretek alapján tudható, hogy szignifikánsan kizárólag ettől a komponens-től függ a delamináció mértéke. A jel szűrésének folyamatát az 5-2. ábra mutatja. A szűrés utáni eredményeket az 5-1. táblázat foglalja össze.



5-1. ábra. A mintavételezett jel (1. mérés)



5-2. ábra. A zajszűrés folyamata

Ssz.	n [1/min]	v_f [mm/min]	T_n [-]	U [V]	$F_{t,max}$ [N]
1	8488	2546	T1	3,281	164,07
2	10610	1061	T1	1,503	75,15
3	8488	2546	T1	3,289	164,43
4	8488	2546	T1	3,354	167,70
5	8488	849	T1	1,676	83,82
6	6366	1910	T1	3,444	172,19
7	10610	2122	T1	2,585	129,25
8	6366	637	T1	1,518	75,89
9	10610	3183	T1	3,217	160,85
10	8488	2546	T1	3,304	165,22
11	8488	2546	T1	3,234	161,69
12	8488	2546	T1	3,114	155,70
13	6366	1273	T1	2,522	126,10
14	8488	1273	T2	1,551	77,55
15	10610	531	T2	0,763	38,17
16	8488	1273	T2	1,598	79,90
17	8488	1273	T2	1,477	73,85
18	8488	424	T2	0,819	40,94
19	6366	955	T2	1,719	85,94
20	10610	1061	T2	1,159	57,96
21	6366	318	T2	0,915	45,77
22	10610	1592	T2	1,615	80,74
23	8488	1273	T2	1,335	66,75
24	8488	1273	T2	1,534	76,72
25	8488	1273	T2	1,492	74,60
26	6366	637	T2	1,160	58,02

5-1. táblázat. A mért erőjelek kiértékelésének eredményei

5.2. Delamináció

Dolgozatom során a delaminációs mérőszámok közül a következőket határoztam meg: hagyományos delaminációs faktor (F_d), módosított delaminációs faktor (F'_d), inverz delaminációs faktor ($F_{d,inv}$), minimális delaminációs faktor (F_{dmin}), területalapú delaminációs faktor (DF), területalapú delaminációs faktor (F_a), korrigált delaminációs faktor (F_{da}), ekvivalens delaminációs faktor (F_{ed}), sugáralapú delaminációs faktor (R_d).

A delaminációs mérőszámokhoz szükséges geometriai jellemzők meghatározása a 3. fejezetben ismertetett módon történt. Az idő hiányában csupán a kilépő oldali delaminációt vizsgáltam. A kapott eredményeket az 5-2. és 5-3. táblázatokban láthatjuk.

Ssz	n $\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$	v_f $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	T_n [-]	F_d [1]	F'_d [%]	$F_{d,inv}$ [1]	F_{dmin} [1]	DF [%]	F_a [1]	F_{da} [1]	F_{ed} [1]	R_d [1]
1	8488	2546	T1	1,76	75,57	0,57	1,65	93,54	0,94	2,35	1,39	97,49
2	10610	1061	T1	1,66	65,63	0,60	1,56	67,28	0,67	2,08	1,29	85,97
3	8488	2546	T1	hiba								
4	8488	2546	T1	1,77	76,55	0,57	1,69	91,11	0,91	2,35	1,38	100,28
5	8488	849	T1	1,56	55,59	0,64	1,53	93,19	0,93	2,12	1,39	71,71
6	6366	1910	T1	2,00	100,28	0,50	1,92	106,49	1,06	2,71	1,44	131,37
7	10610	2122	T1	1,85	84,62	0,54	1,74	116,20	1,16	2,60	1,47	106,62
8	6366	637	T1	1,64	63,94	0,61	1,62	81,06	0,81	2,14	1,35	83,13
9	10610	3183	T1	1,73	73,39	0,58	1,67	84,14	0,84	2,27	1,36	96,14
10	8488	2546	T1	hiba								
11	8488	2546	T1	1,96	96,29	0,51	1,70	77,52	0,78	2,48	1,33	126,14
12	8488	2546	T1	1,70	69,79	0,59	1,66	90,68	0,91	2,27	1,38	90,04
13	6366	1273	T1	1,74	74,42	0,57	1,71	85,33	0,85	2,29	1,36	95,25

5-2. táblázat. A T1 szerszámmal végzett fúrások okozta delamináció jellemzése

Ssz	n $\left[\frac{1}{\text{mm}}\right]$	v_f $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$	T_n [-]	F_d [1]	F'_d [%]	$F_{d,inv}$ [1]	F_{dmin} [1]	DF [%]	F_a [1]	F_{da} [1]	F_{ed} [1]	R_d [1]
14	8488	1273	T2	2,32	132,39	0,43	2,23	189,26	1,89	3,65	1,70	169,46
15	10610	531	T2	hiba								
16	8488	1273	T2	2,58	158,45	0,39	2,47	180,15	1,80	3,88	1,67	205,98
17	8488	1273	T2	1,93	93,16	0,52	1,86	126,30	1,26	2,76	1,50	121,11
18	8488	424	T2	2,33	133,37	0,43	2,26	166,61	1,67	3,50	1,63	174,71
19	6366	955	T2	hiba								
20	10610	1061	T2	2,00	100,19	0,50	1,96	135,82	1,36	2,91	1,54	131,25
21	6366	318	T2	2,25	125,40	0,44	2,15	162,99	1,63	3,38	1,62	163,02
22	10610	1592	T2	2,73	173,11	0,37	2,26	178,42	1,78	4,04	1,67	225,05
23	8488	1273	T2	2,42	141,89	0,41	2,32	155,65	1,56	3,52	1,60	183,04
24	8488	1273	T2	2,16	116,28	0,46	2,06	156,82	1,57	3,24	1,60	152,33
25	8488	1273	T2	1,98	97,71	0,51	1,94	169,17	1,69	3,10	1,64	128,00
26	6366	637	T2	1,94	94,29	0,51	1,81	126,42	1,26	2,78	1,50	123,52

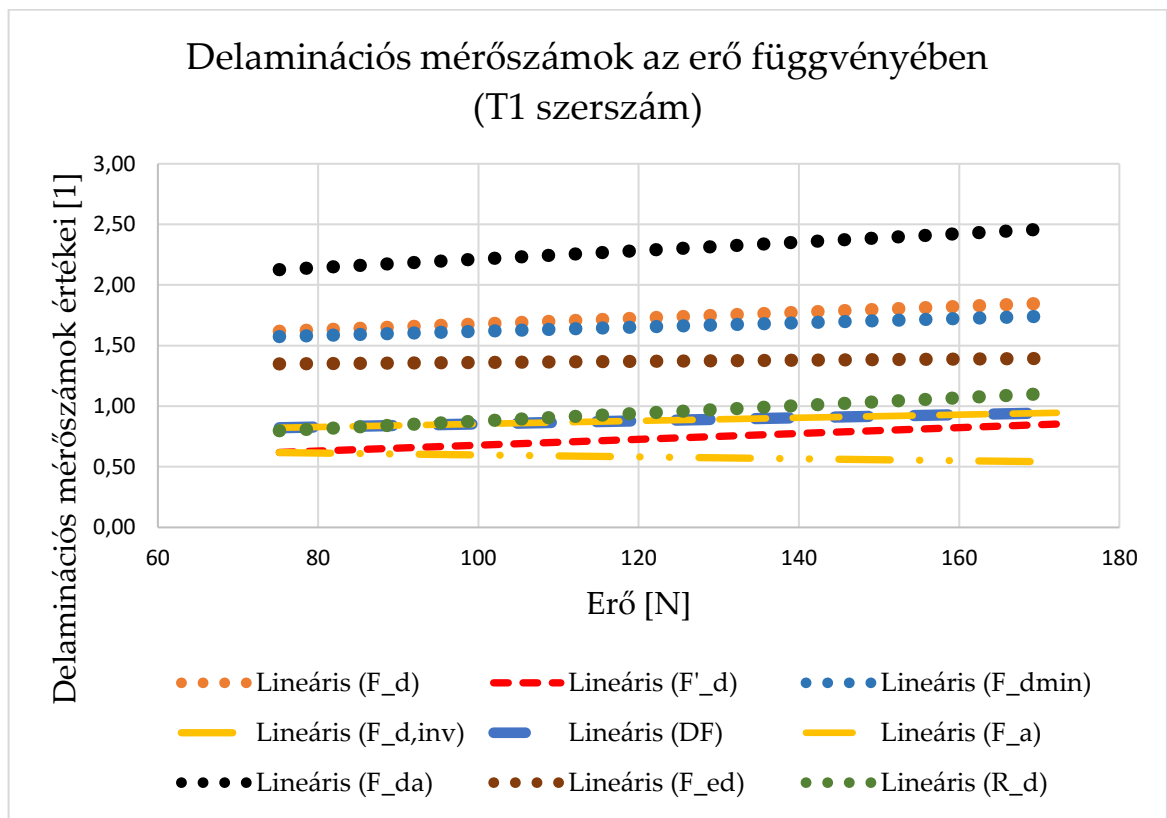
5-3. táblázat. A T2 szerszámmal végzett fúrások okozta delamináció jellemzése

Néhány esetben a munkadarabokról készült mikroszkópi képek –ismeretlen okból kifolyólag– véletlenszerű sávokban elmosódtak, ezen hibákat csak később vettem észre. Az ilyen hibával terhelt képek közül 4db esetében a fúrás előtti és utáni képeket nem sikerült egymásra illeszteni, így a delaminációs mérőszámok sem kerültek meghatározásra.

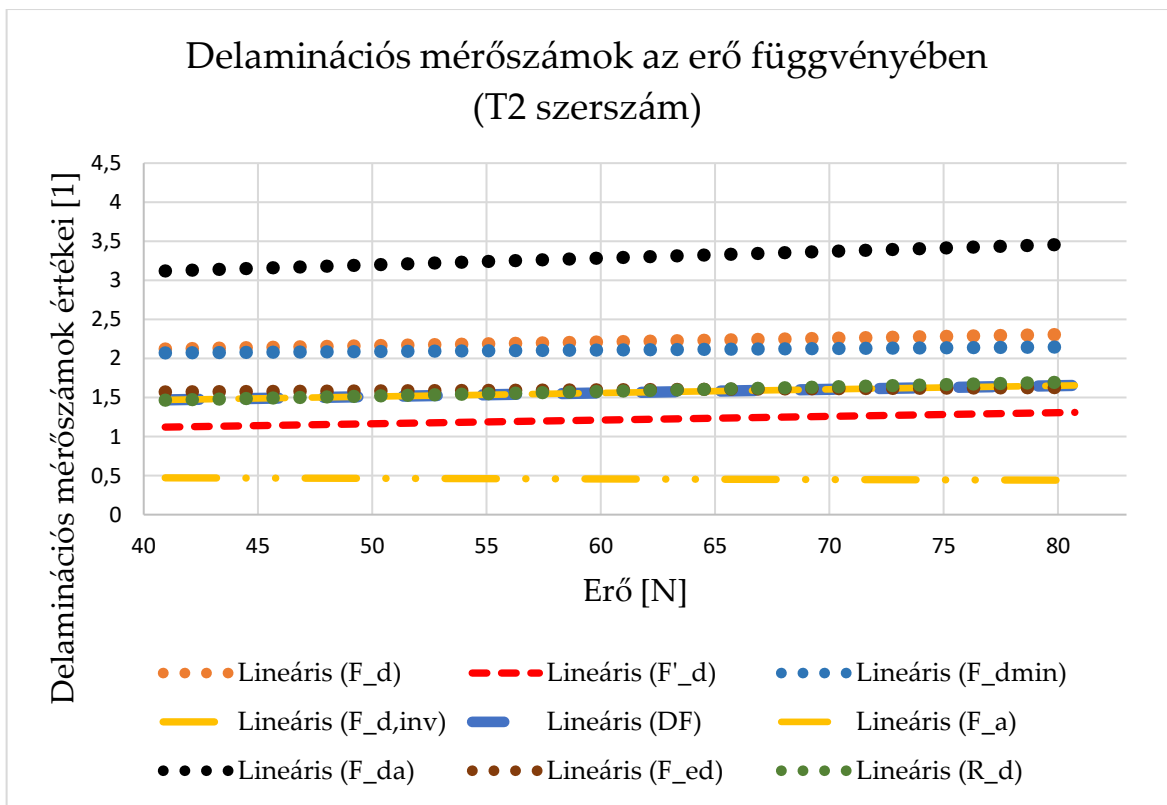
5.3. Diskusszió és kitekintés

Az irodalomkutatás alapján azt várjuk, hogy a nagyobb előtolás irányú erő ébredése nagyobb károsodást okoz az anyagban, így a delaminációs mérőszámok is eszerint alakulnak. Összevetve a kapott erőértékeket a kiszámolt delaminációs mérőszámokkal, ugyanerre a következtetésre jutunk. Minden mérőszám értékének alakulása alátámasztja a szakirodalomban taglalt tendenciát. Az erőértékek és a delaminációs faktork közötti összefüggést az 5-3. és 5-4. ábra mutatja. A módosított delaminációs faktor (F'_d) és a területalapú delaminációs faktor (DF) értékei százzal le lettek osztva a könnyebb ábrázolhatóság érdekében.

Jövőbeni tervem része a furatok belépési oldaláról készült képek kiértékelése, az így kapott delaminációs értékek összevetése ugyancsak az erőértékekkel. A forgácsolási paraméterek delaminációs mérőszámokra gyakorolt hatását, ezek szignifikancia szintjét is szeretném vizsgálni. Továbbá célom az általam fejlesztett képfeldolgozó algoritmus csiszolgatása, illetve kontrollált körülmények közötti validálása.



5-3. ábra. Az erőértékek és a delaminációs faktorok közötti összefüggés (T1)



5-4. ábra. Az erőértékek és a delaminációs faktorok közötti összefüggés (T2)

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek, kezdik leváltani a hagyományos szerkezeti anyagainkat. Nem is csoda, hiszen kiváló mechanikai jellemzőkkel bírnak, és mindemellett rendkívül alacsony sűrűséggel rendelkeznek. Ám ezen anyagok megmunkálása során számos nehézségbe ütközhetünk, ezért a mai napig kutatások tárgyát képezi ezen témakör.

Dolgozatom a szálerősítéses polimer kompozitok egyik leggyakoribb megmunkálási problémáját járja körül, a fúrás során keletkező delamináció témakörét. A jelenség mélyebb megértése érdekében irodalomkutatást végeztem a delamináció kialakulásáról, annak kedvezőtlen hatásairól. Fontos, hogy valamiképp mérni tudjuk a károsodás mértékét, hogy ezáltal törekedhessünk a gyártástechnológia optimalizálására. Ennek okán a nemzetközi szakirodalomban gyakran használt delaminációs mérőszámokkal is megismerkedtem, ezeket részletesen bemutattam. Az irodalomkutatást követően felállítottam a saját fúrási kísérlettervemem. A rendelkezésre álló erőforrások (munkadarab, szerszám, idő) limitáltsága miatt törekedni kellett a kísérletek számának minimalizálására, ezért a kísérletterv összeállítását a central composite face-centered (CCF) kísérlettervezési módszerrel végeztem el. A fúrási kísérleteket üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitban végeztem, több előtolás és forgácsolási sebesség mellett. A kísérlet során egy erőmérő rendszer segítségével rögzítésre kerültek a fúráshoz tartozó erőjelek. A GFRP kompozit munkadarabokról digitális mikroszkóppal készítettem felvételeket, fúrás előtt és után is, hogy a lehető legpontosabb képet kapjam a furatkontúron túlnyúló makrogeometriai változásokról (delamináció, mátrixbeégés, repedések stb.). A mikroszkópi felvételeket Matlab környezetben, saját fejlesztésű képfeldolgozó algoritmus használatával értékeltem ki. Az algoritmus alapgondolata, hogy a fúrás előtti és utáni képek különbségét véve minden olyan eltérés láthatóvá válik, amelyet a fúrás okozott. Igyekeztem minél több delaminációs mérőszámot meghatározni. A mért erőjeleket gyors Fourier-transzformáció segítségével megszűrtem az őket terhelő zajtól, majd megkerestem a maximális erőértékeket. Az így kapott erőmaximumokat összevetettem a kalkulált delaminációs mérőszámokkal, az eredményeket táblázatos formában és diagramok segítségével is szemléltettem. Az eredmények az irodalomkutatás alapján várt módon alakultak, a nagyobb axiális irányban ébredő erők nagyobb mértékű delaminációt okoznak.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Lukács T., Magyar G., Geier N., „Fúrásindukált delamináció vizsgálata üvegszállal erősített polimer (GFRP) kompozitokban digitális képfeldolgozással”, Nk. Gép. Konf. – OGÉT, o. 452–456, ápr. 2022
- [2] „a5_kompozitok_v6.pdf”. Elérés: okt. 16, 2021. [Online]. Elérhető: http://www.pt.bme.hu/segedletek/a5_kompozitok_v6.pdf
- [3] Geier N., Poór D. I., Pereszlai C., Bacs J., és Balázs B. Z., „Fúrásindukált delamináció kialakulása és mérőszámai szálerősített polimer (FRP) kompozitokban”, *Gradus*, köt. 8, sz. 1, o. 254–260, 2021, doi: 10.47833/2021.1.ENG.005.
- [4] „Challenges for drilling”, *Fraunhofer Institute for Production Technology*. <https://www.vibrocool-project.eu/en/overview/challenges.html> (elérés okt. 16, 2021).
- [5] J. P. Davim, J. C. Rubio, és A. M. Abrao, „A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates”, *Compos. Sci. Technol.*, köt. 67, sz. 9, o. 1939–1945, júl. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.10.009.
- [6] W.-C. Chen, „Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 37, sz. 8, o. 1097–1108, 0 1997, doi: 10.1016/S0890-6955(96)00095-8.
- [7] S. Gaugel és mtsai., „A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)”, *Compos. Struct.*, köt. 155, o. 173–183, 0 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.08.004.
- [8] N. Khanna, F. Pusavec, C. Agrawal, és G. M. Krolczyk, „Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility”, *Measurement*, köt. 154, o. 107504, márc. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107504.
- [9] D. N. R. da Silva, „Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP”, masterThesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013. Elérés: okt. 21, 2021. [Online]. Elérhető: <https://run.unl.pt/handle/10362/9866>
- [10] A. Faraz, D. Biermann, és K. Weinert, „Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 49, sz. 15, o. 1185–1196, 0 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002.
- [11] N. S. Mohan, S. M. Kulkarni, és A. Ramachandra, „Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials”, *J. Mater. Process. Technol.*, köt. 186, sz. 1, o. 265–271, máj. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043.
- [12] C. Tsao, K. Kuo, és I. Hsu, „Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol. - INT J ADV MANUF TECHNOL*, köt. 59, márc. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3532-y.

- [13] J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, és M. Chen, „Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria”, *Compos. Struct.*, köt. 201, o. 1076–1087, okt. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.051.
- [14] J. Babu, N. Paul Alex, S. P. Abraham, J. Philip, B. Anoop, és J. P. Davim, „Development of a comprehensive delamination assessment factor and its evaluation with high-speed drilling of composite laminates using a twist drill”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, köt. 232, sz. 12, o. 2109–2121, okt. 2018, doi: 10.1177/0954405417690552.
- [15] V. A. Nagarajan, J. Selwin Rajadurai, és T. Annil kumar, „A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade”, *Compos. Part B Eng.*, köt. 43, sz. 8, o. 3153–3159, 0 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.013.
- [16] U. A. Khashaba, „Delamination in drilling GFR-thermoset composites”, *Compos. Struct.*, köt. 63, sz. 3, o. 313–327, 0 2004, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00180-6.
- [17] L. Durão, J. Tavares, V. Albuquerque, és D. Gonçalves, „Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods”, *Compos. Struct.*, köt. 96, o. 576–583, 0 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.08.003.

8. SUMMARY

Fiber-reinforced polymer (FRP) composites are becoming increasingly popular, starting to replace our traditional structural materials. No wonder, they have excellent mechanical properties and yet extremely low densities. However, we may encounter a number of difficulties in processing these materials, which is why this topic is still the subject of many researches.

My dissertation deals with one of the most common machining problems of fiber-reinforced polymer composites, the topic of delamination during drilling. In order to gain a deeper understanding of the phenomenon, I conducted a literature search on the formation of delamination and its adverse effects. It is important to be able to measure the extent of the damage in some way in order to optimize the production technology. For this reason, I also got acquainted with the delamination measures often used in the international literature, which I presented in detail. Following the literature search, I set up my own drilling experiment plan. Due to the limited resources available (workpiece, tool, time), efforts had to be made to minimize the number of experiments, therefore the experimental design was compiled using the central composite face-centered (CCF) experimental design method. Drilling experiments were performed in a glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite at multiple feeds and cutting speeds. During the experiment, the force signals associated with the drilling were recorded using a force measuring system. GFRP composite workpieces were imaged with a digital microscope, both before and after drilling, to obtain the most accurate picture possible of macrogeometric changes beyond the hole contour (delamination, matrix burn, cracks, etc.). The microscopic images were evaluated in a Matlab environment using a self-developed image processing algorithm. The basic idea of the algorithm is that by taking the difference between the pre-drilling and post-drilling images, any deviation caused by the drilling becomes visible. I tried to determine as many delamination factors as possible. The filtered force signals were filtered from the noise loading them using a fast Fourier transform, and then I sought the maximum force values. The force maxima thus obtained were compared with the calculated delamination factors, and the results were illustrated in tabular form and with the help of diagrams. The results were as expected from the literature search, larger axial forces caused greater delamination.

Keywords: GFRP, delamination, drilling, digital image processing