



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Lézeres felületi edzés okozta maradó feszültség vizsgálata C45 acélon

Készítette:
Filep Ádám

Konzulens:
Dr. Benke Márton
tudományos munkatárs

Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
2013

Tartalomjegyzék

Bevezetés és célkitűzés	2
1. Lézersugaras felületedzés.....	3
2. Hőkezelések okozta maradó feszültség.....	6
3. Maradó feszültség mérése röntgendiffrakcióval	8
4. Elvégzett vizsgálatok.....	11
4.1. Próbadarabok.....	11
4.2. Lézersugaras felületedzés.....	11
4.3. Feszültségmérés	14
4.4. Fáziselemzés.....	18
4.5. Szövetvizsgálat.....	19
4.6. Keménységmérés	20
5. Eredmények.....	22
5.1. Feszültségmérés	22
5.2. Fáziselemzés.....	26
5.3. Szövetvizsgálat.....	27
5.4. Keménységmérés	31
6. Összefoglalás.....	35
7. További tervek.....	37
Köszönetnyilvánítás	37
Irodalomjegyzék.....	38

Bevezetés és célkitűzés

2013 nyarán szakmai gyakorlat keretében, a Campus Hungary ösztöndíj támogatásával hat hetet töltöttem el a hannoveri lézerközpont (Laser Zentrum Hannover) Stefan Kaierle által vezetett Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik osztályán és lézersugaras felületkezelési technológiával kezdtem el foglalkozni.

Kutatómunkám célja, hogy a hagyományosan edzett és a lézersugárral edzett mintadarabokban végbemenő folyamatoknak köszönhetően, a munkadarabok élettartamát nagymértékben befolyásoló maradó feszültségállapotbeli különbségeket kimutassam. Edzés során a munkadarabban a fázisátalakulásból, a különböző fázisok eltérő hőmérsékletéből és hőtágulásából adódóan komplex feszültségállapotok alakulnak ki. Hagyományos edzés során a mintadarab hőelvonását a hűtőközeg, míg lézersugaras edzés során maga a munkadarab biztosítja. Ez a különbség drasztikusan megváltoztathatja a munkadarabban a kezelés végén kialakuló feszültségállapotokat.

Jelen munkában C45-ös minőségű, melegen hengerelt acél felületén 5 kW teljesítményű CO₂ lézersugárral felületi edzést hajtottunk végre különböző lézersugár teljesítmény, előtolási sebesség és bevonati réteg alkalmazása mellett. A kezelést a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Anyagtudományi és Technológiai Intézetében végeztük Dr Buza Gábor segítségével. A kutatás célja, hogy a paraméterek változtatásának hatását kimutassuk a kialakult szövetszerkezetre, keménységprofilra és a felületi maradó feszültségállapotra a kezelés környezetében.

A kezelt próbák vizsgálatainak mindegyikét a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karának Komplex Képelemző és Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában (LISA) végeztük el.

1. Lézersugaras felületedzés

A lézersugaras megmunkálások különlegessége és előnye, hogy az anyag megmunkálására olyan szerszámot használnak, ami nem kopik. Az anyagmegmunkálásban a lézerfény tehát egy speciális szerszámnak tekinthető. A lézersugár energiája az anyagban elnyelődik, ott hővé alakul, és fejt ki hatását. A hatást befolyásoló fontos tényezők a lézersugár, az anyag és a kettő közötti kölcsönhatás jellemzői. A lézersugár tulajdonságai pl. a hullámhossza, teljesítménysűrűsége. Az anyagnak a befolyásoló fizikai jellemzői a hővezető képesség, olvadáspont, fajhő, stb. A lézersugár és az anyag közötti kölcsönhatás jellemzői közül a legfontosabbak az abszorpciós képesség (a lézersugár mekkora hányadát nyeli el az anyag) és a behatolási mélység (az anyagba jutott energia milyen hosszú úton nyelődik el). Az abszorpciós képességeket gyakran bevonatokkal javítják [1].

A Beer-féle abszorpciós törvény értelmében a fényintenzitás csökkenése az anyagba való behatolás esetén [1]:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp(-x) \quad (1)$$

ahol

Φ : a fényáram a közegben megtett x út után

Φ_0 : a fényáram a közeg felületén

x : a közegbe hatolás mélysége

Fémekben a behatolás mélysége az infravörös sugárzás tartományában 10^{-8} - 10^{-10} m. Ez a rácsparaméter nagyságrendjébe esik, azaz a lézersugár fémekbe alig hatol be. Ebben az esetben a kölcsönhatás a vezetési sávban lévő elektronokon keresztül valósul meg. Az infravörös tartományban működő ipari lézer berendezések hullámhosszúság tartományában a fény elektromos tere kényszerrezgést idéz elő a vezetési elektronok gyorsításával. Ezek a rezgő elektronok részben a kényszerítő fénnel azonos fázisú, de ellentétes irányú elektromágneses teret keltenek (reflektálják a beeső fény egy részét), részben az elektromágneses térben felvett energiájuk egy részét az atomokkal, a kristályráccsal való rugalmatlan ütközés útján átadják. Ez a mechanizmus eredményezi a fémek felhevülését lézersugár hatására.

A lézersugár számszerű jellemzéséhez a sugár intenzitását (teljesítménysűrűségét) és a kölcsönhatás idejét veszik figyelembe, ezért a lézertechnológia területén a W/cm^2

mértékegység a használatos. A kölcsönhatás ideje szempontjából megkülönböztetünk folytonos és impulzus üzemmódot.

Lézersugár segítségével az anyagok sok fajtáját meg lehet munkálni: fémeket, műanyagot, kerámiát, üveget, fát és kompozitokat is. Az elvégezhető technológiák anyagtípustól függőek, de lehetséges megmunkálások lehetnek a vágás, fúrás, hegesztés, forrasztás, szinterelés, feliratozás és edzés [1].

Edzés során úgy változtatjuk meg az anyag tulajdonságait, hogy a halmazállapota és a kémiai összetétele nem változik meg. Ez a tulajdonságváltoztatás kiterjedhet a darab felületére (ill. annak egy részére) vagy a darab teljes térfogatára. Előbbi történik a lézersugaras felületi edzés során, utóbbi pedig a hagyományos edzésre igaz.

Edzeni az olyan ötvözeteket szokták, amelyek a repedés veszélye nélkül képesek a martenzites átalakulásra. Ez leginkább a 0,3-2,0% C tartalmú acélokat jelenti.

Edzés során úgy kell hevíteni az alkatrészt, hogy ne képződjön olvadék, de lejátszódjon az ausztenitesedés. Ezután a hűtés sebességének elég nagyra kell lennie ahhoz, hogy ne legyen idő az egyensúlyi fázisátalakuláshoz, és kemény martenzit fázis képződjön. Hagyományos edzésnél ezt a hűtési sebességet a körülvevő közeg (pl. víz, olaj) biztosítja, lézersugaras edzésnél pedig a darab belsejének kell elvonnia a hőt (ezt nevezhetjük önedződésnek). A kétféle hőelvonás iránya láthatóan egymással ellentétes. Lézersugaras edzésnél természetesen elég gyorsnak kell lennie a hevítés folyamatának, hogy a felizzott anyagrésszel hővezetéssel ne melegítse túlságosan a többi anyagrészt. Ugyanakkor elegendő idő kell ahhoz is, hogy megfelelő mélységben játszódjon le a fázisátalakulás.

Lézersugaras felületedzéssel általában 0,1-25 mm széles sávokat lehet egyszerre edzeni. Az elérhető mélység maximuma kb. 2 mm [2].

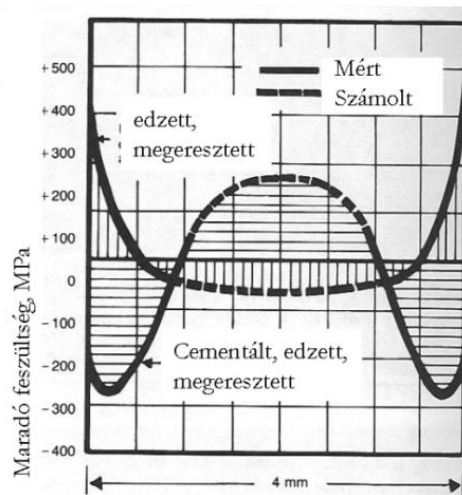
A lézersugaras edzés előnyei:

- Nagyon kicsi az edzési vetemedés veszélye.
- Gyakori, hogy közvetlenül a forgácsoló művelet után alkalmazható, akár a forgácsoló (eszterga, marógép stb.) szerszámgépbe befogott darabon.
- Gyors és érintésmentes.
- Nem szükséges hűtő- (edző-) közeg.
- Tiszta technológia.
- Az alapanyag összetételéből adódó legnagyobb keménységet is el lehet vele érni.
- Alkalmas arra, hogy az alkatrésznek csak kívánt részeit kezelje.

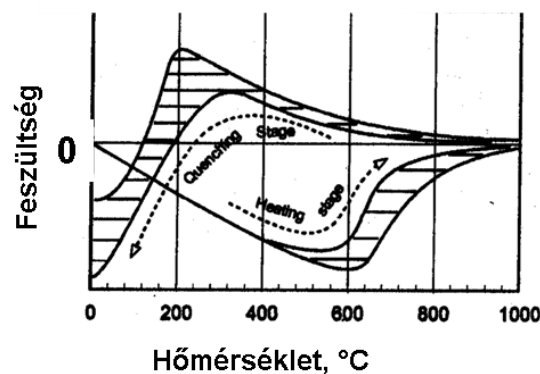
- A nehezen hozzáférhető helyek is edzhetők (ahova hűtőközeg nem jutna be kellő intenzitással).
- Az alkatrész kívánt helyein, ill. az alkatrész felületére merőlegesen könnyű a megfelelő keménység, ill. keménységfelfutás biztosítása.
- Könnyű automatikus gyártósorba integrálni [2].

2. Hőkezelések okozta maradó feszültség

Szinte minden fémes anyagból készült termék átesik valamilyen típusú, de legtöbb esetben több, eltérő jellegű hőkezelésen gyártásának valamely (vagy akár több) szakaszában. Hőkezelés során a legtöbb esetben számolni kell maradó mechanikai (rugalmas) feszültség kialakulásával. A hőkezelések típusa nagyon sokféle lehet, és ebből következik, hogy az ebből származó maradó feszültség is rendkívül változatos lehet. Az 1. ábra hagyományos edzés és cementálás okozta maradó feszültség eloszlását, míg a 2. ábra az indukciós edzés során a maradó feszültség változását mutatja.



1. ábra: Hagyományos edzés okozta feszültség eloszlás [3]



2. ábra: Indukciós edzés során a maradó feszültség változása (heating- fűtés, quenching- edzés) [4]

Az edzés során kialakuló feszültséget döntően a munkadarab különböző sebességű hűléséből származó eltérő zsugorodása, illetve az ausztenit átalakulását kísérő térfogatnövekedés okozza. A két folyamat ellentétes hatású. A helyzetet tovább bonyolítja az ausztenit és ferrit/martenzit eltérő hőtágulási együtthatója. Az edzés során kialakuló feszültség-eloszlás ezért nagyon komplex is lehet. A kialakult feszültségprofil az alapanyag jellemzőitől, továbbá a hőkezelés paramétereitől függ. Az edzés okozta maradó feszültség jellemzése tehát egy komplex anyagszerkezeti-és technológiai vizsgálatot igényel.

3. Maradó feszültség mérése röntgendiffrakcióval

A Hooke-törvény értelmében egytengelyű feszültségállapotban a rugalmas mechanikai feszültség egyenesen arányos a rugalmas alakváltozással (deformációval), az arányossági tényező pedig rugalmassági modulus [5].

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2)$$

ahol

σ : a mechanikai feszültség

E: a rugalmassági modulus

ε : a rugalmas alakváltozás

A rugalmas alakváltozás és a mechanikai feszültség közötti összefüggést általános feszültségállapotban az alábbi egyenletrendszer adja meg [5]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (3)$$

ahol

ε_x , ε_y és ε_z : az x, y, és z tengely irányába eső alakváltozás komponensek

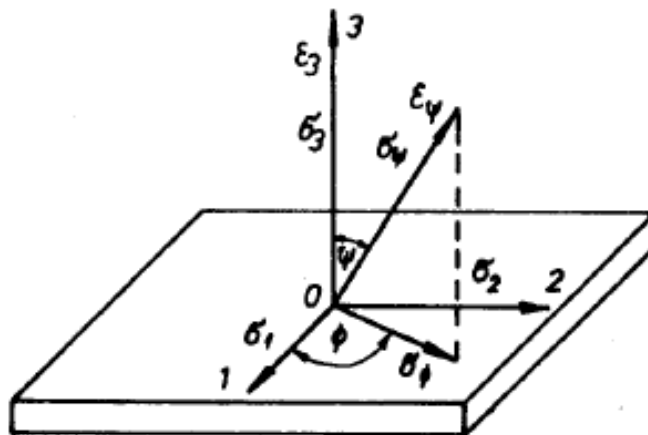
ν : a Poisson tényező

σ_x , σ_y és σ_z : az x, y és z tengely irányába eső feszültségkomponensek

A fenti egyenletek értelmében a maradó rugalmas feszültség meghatározásához elegendő a feszültség okozta rugalmas deformációt mérnünk. A rugalmassági modulus és a Poisson tényező ismeretében a mért deformációból számítható a rugalmas maradó feszültség.

Kristálytani szempontból a maradó rugalmas feszültség azt jelenti, hogy a kristályrácsot alkotó atomok (vagy ionok vagy atomcsoportok) az eredeti helyükből kimozdulva helyezkednek el. Ez azt is jelenti, hogy a rugalmas maradó feszültség hatására az atomsíkok (rácssíkok) közötti távolságok megváltoznak. Az atomsík-távolságok változása arányos a rugalmas deformációval, továbbá a maradó feszültséggel [5, 6].

Ha egy test sík felületét vesszük (3. ábra), akkor az arra merőleges feszültségkomponens zérus, azaz ebben az esetben $\sigma_3 = 0$. A felületen tehát síkfeszültségi állapot létezik. Ilyen esetben a maradó feszültség a felület síkjában bármilyen irányú lehet (σ_Φ).



3. ábra: Egy felület síkjában lévő Φ irányban ható feszültség meghatározása [5]

Fentiekből következik, hogy a felülettel párhuzamos atomsíkok távolságának relatív megváltozása $d_3 = \Delta d_3 / d_0 = 0$. A felülettel párhuzamos rácssík-távolságok mérésével tehát a feszültségmentes rácssík távolság mérhető. A hagyományos elrendezésű röntgendiffrakciós mérések során a minta felületével párhuzamos rácssík-távolságokat mérjük [5].

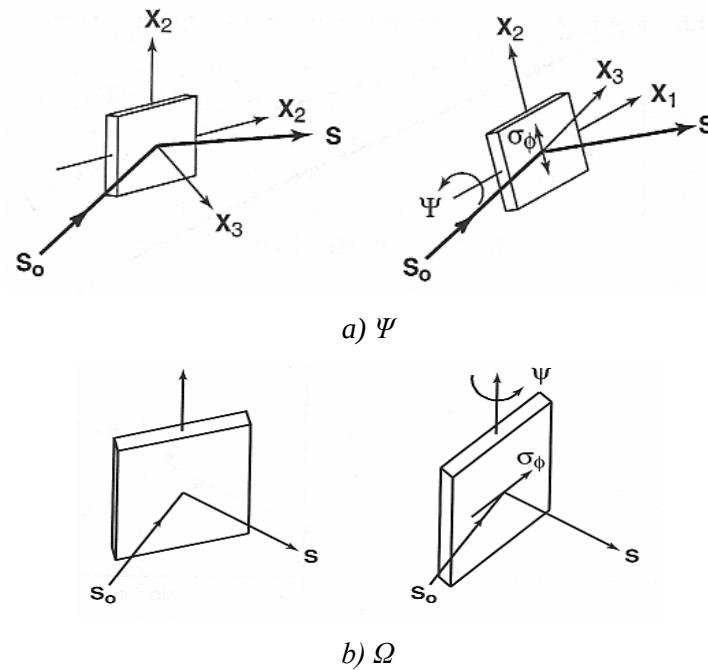
A Φ irányra merőleges rácssík-távolságok mérésével a Φ irányú ε_Φ deformáció mérésével a keresett Φ irányú σ_Φ feszültség közvetlenül mérhető lenne. Ez a rácssík-távolság röntgendiffrakciós módszerrel közvetlenül azonban nem mérhető, mert ilyen irányú mérésnél a sugárzás elnyelődne az anyagban. A probléma az ún. $\sin^2\Psi$ módszerrel kiküszöbölhető. A módszer lényege, hogy ha a mintát Ψ szöggel megdöntjük, a Ψ irányú d_Ψ rácssík-távolság, illetve a Ψ irányú ε_Ψ deformáció már mérhető. A keresett σ_Φ feszültség az alábbi képlettel meghatározható:

$$\sigma_\phi = \frac{d_\psi - d_3}{d_3} \cdot \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi} = \frac{\Delta d}{d} \cdot \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi} \quad (4)$$

Ezt a mérési módszert az egyenletben szereplő tag nyomán nevezzük $\sin^2\Psi$ módszernek.

A minta döntését mérés technikai szempontból kétféle elrendezésben szokás megvalósítani. A 4. ábra mutatja a két módszer vázlatos rajzát, ahol: S_0 a röntgensövből kilépő

sugárnyaláb, S pedig a mintáról diffraktálódó sugárnyaláb. A ψ módszer esetében a döntés tengelye a vizsgált minta röntgen-sugárral besugárzott pontja, a sugárforrás és a detektor által kijelölt síkban fekszik, míg az Ω módszer esetében a döntés tengelye erre a síkra merőleges helyzetű [5, 7, 8].



4. ábra: A darab felszínével párhuzamosan, tetszőleges irányban ható maradó feszültség meghatározására használható két alapszámítás vázlatos rajza [5, 7, 8]

A maradó feszültség a kidöntött állapotban rögzített interferencia függvényen a reflexiók eltolódásaként jelentkezik. Ez a Bragg-szög eltolódás annál nagyobb, minél nagyobb Bragg-szöget vizsgálunk. Éppen ezért a lehető legnagyobb Bragg-szögű reflexiót kell vizsgálnunk. A mérés pontossága tovább növelhető a döntési szögtartomány, illetve a döntési pozíciók számának növelésével, továbbá kétirányú döntés alkalmazásával [5, 9].

4. Elvégzett vizsgálatok

4.1. Próbadarabok

A vizsgálatokhoz nyolc darab hengeres tárcsa próbadarab állt rendelkezésünkre. Ezek C45 anyagminőségű, melegen hengerelt, 120 mm átmérőjű köracélból lettek lefűrészelve, vastagságuk kb. 22 mm. Egy ilyen próbadarabot mutat az 5. ábra. A lézersugaras felületedzés előtt maradó feszültségméréseket végeztünk a próbadarab több pontján. A lézersugaras felületedzések okozta maradó feszültség értékeket így a kezelés előtt mért feszültségállapothoz tudtuk viszonyítani. A tárcsa felületén be vannak jelölve a felületedzés előtti feszültségmérés pontjai, illetve megfigyelhető a fűrészelés iránya is. Későbbiekben ezt az irányt vettük viszonyításnak.



5. ábra: Kiinduló mintadarab

4.2. Lézersugaras felületedzés

A lézersugaras felületedzéseket Budapesten, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Lézertechnológia Osztályán végeztük el. Ehhez egy 5 kW maximális teljesítményű CO₂ gázlézer állt rendelkezésünkre (6. ábra).



6. ábra: Az 5 kW teljesítményű gázlézer a BAY-ATI intézetben

A rendelkezésre álló nyolc próbadarabból négy darabon végeztünk lézersugaras felületedzéseket. A tárcsák két oldalán különböző bevonatok alkalmazása után, egy oldalon kétféle előtolási sebességgel és tárcsánként különböző lézersugár teljesítménnyel hoztuk létre az edzett sávokat. A lézersugaras felületedzés paraméterei az alábbiak voltak:

- kétféle felületi abszorbeáló réteg
 - grafitpor
 - TiO_2 emulzió
- két előtolási sebesség
 - 300 mm/perc
 - 400 mm/perc
- négyféle lézersugár teljesítmény
 - 70%
 - 80%
 - 90%
 - 100%

A különböző paraméterekkel végzett lézersugaras edzések után összesen 16, különböző paraméterekkel kezelt edzett sávot kaptunk (kétféle felületi abszorbeáló réteg x két

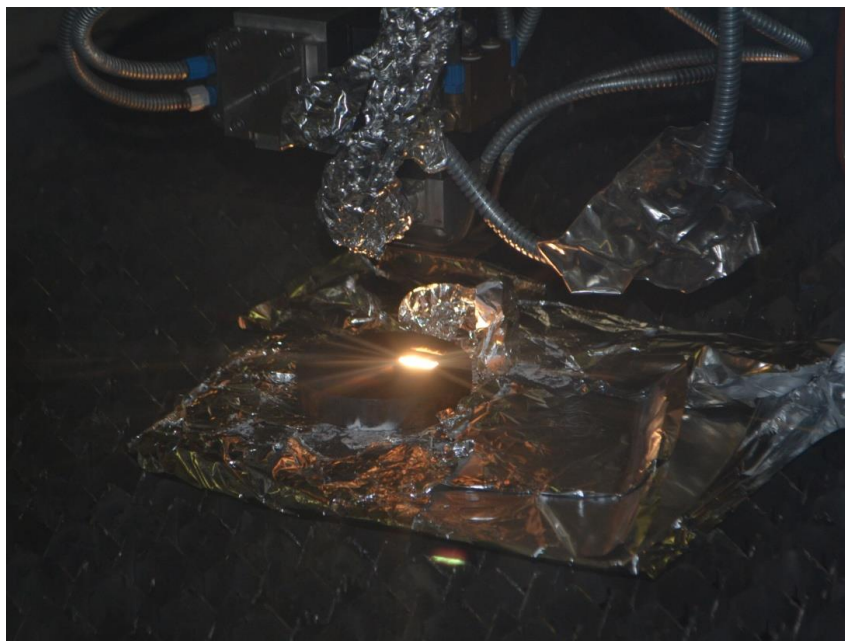
előtolási sebesség x négyféle lézersugár teljesítmény). A TiO_2 emulzióval bevont próbák vizsgálata még folyamatban van, ezért a dolgozat ezek eredményeit nem tárgyalja.

A lézersugaras felületedzések előtt a mintákra az előzőleg felrajzolt, a későbbi mérésekhez a beazonosítás szempontjából fontos vonalakat vibro iron segítségével felrajzoltuk. Ezután minden minta felületére felvittük az abszorbeáló réteget. A grafitport egyszerűen spray segítségével a felületre fújtuk, míg a TiO_2 emulziót ecsettel rákentük, majd megvártuk, amíg megszárad.

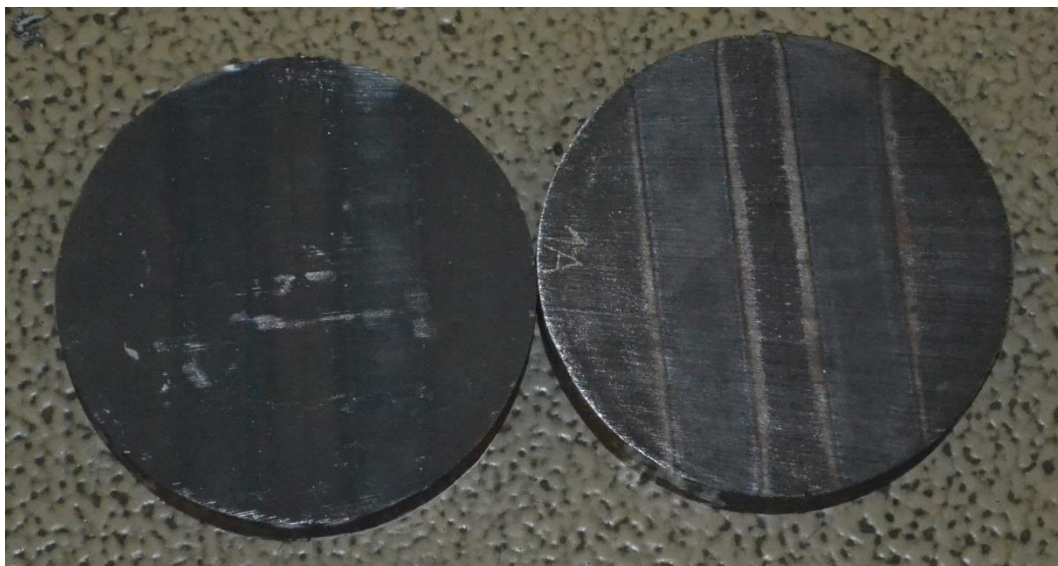
Az abszorbens felvitele után a lézerfej alá helyeztük a mintát. A célzólézer segítségével a létrehozni kívánt edzett sáv szélességét 20 mm-re állítottuk be. A minták középvonalától 10 mm-re, így egymástól 20 mm-re hoztunk létre minden felületen két edzett sávot a kétféle előtolási sebességgel. Az előtolás iránya a fűrészelés irányára merőleges volt. A lézersugár mozgásának kezdőpontja a darab szélétől 10 mm-re volt, így a darabot elérve a lézersugár már stabilizálódott.

A nagyobb lézersugár teljesítmények esetén a lézer folyamatos üzemben működött, 75% alatt viszont csak pulzáló üzemmód lehetséges. Emiatt a 70%-os teljesítménynél 90 kHz frekvenciával pulzált a lézersugár. A sugárforrás és gerjesztése jellegzetességei miatt kb. 65 kHz fölött a sugárzás folytonosnak tekinthető.

Egy lézersugaras edzési folyamatot mutat a 7. ábra, a kezelt mintákat pedig a 8. ábra. A folyamat után vízzel tisztítottuk meg a darabok felületét.



7. ábra: A lézersugaras felületedzés



8. ábra: Grafitos minták a kezelés utáni (balra) és megtisztított állapotban (jobbra). A jobb oldali sávok 300 mm/perc előtolással, a bal oldali sávok 400 mm/perc előtolással készültek.

4.3. Feszültségmérés

A kezelt minták maradó rugalmas feszültségének a mérését a Miskolci Egyetemen, a Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének Komplex Képelemző és Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végeztük el. A célra egy Cr röntgensővel felszerelt Stresstech XStress 3000 G3R típusú központ nélküli feszültségmérő röntgendiffraktométert használtunk (9. ábra). A berendezés különleges abból a szempontból, hogy a feszültségméréshez szükséges döntések során maga a berendezés dől meg a minta felett, míg a minta a helyzete a vizsgálat során nem változik. Ennek köszönhetően a vizsgálatnak nem szab határt a próbadarabok mérete, így mintakivágásra nincs szükség. Ezáltal nem bontjuk meg a próbadarabban lévő valós feszültségállapotot, és valós feszültségértékeket mérhetünk.

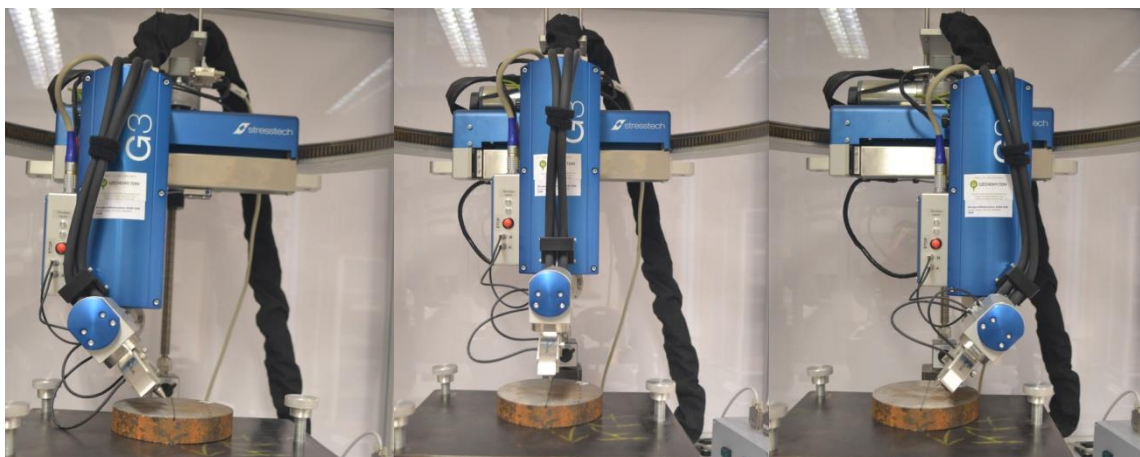


9. ábra: Stresstech XStress 3000 G3R típusú központ nélküli röntgendiffraktométer

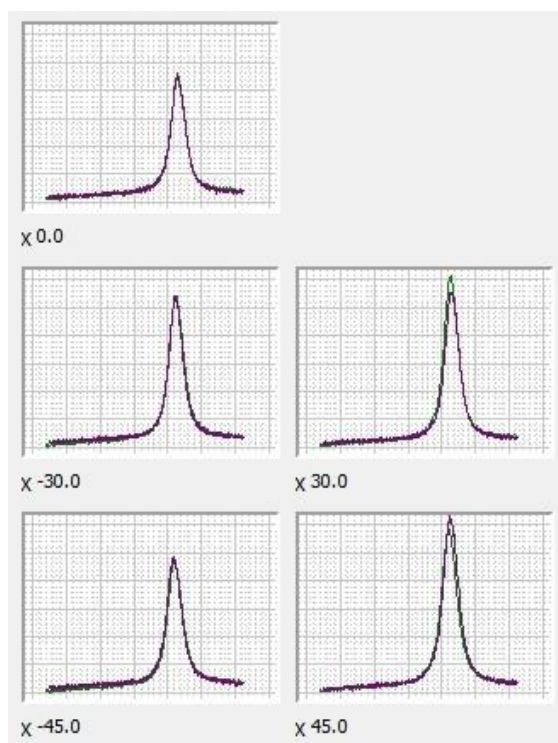
Méréseinkhez az 50 mm-es detektortartó ívet és az 1 mm átmérőjű kollimátort választottuk. A berendezés vonaldetektorainak helyzete egy ív mentén kézzel beállítható és rögzíthető. A detektorok helyzetét a ferrit $\{211\}$ reflexiójának szögértékéhez, kb. 156° -hoz állítottuk be. Mérés előtt a berendezést a kiválasztott kollimátorral és detektortartó ívvel kalibrálni kell. Kalibráció során a berendezés feszültségmentes ferrit por etalonon mér feszültséget. A mérés során a kollimátor megérinti az etalon felületét, majd egy kezdeti munkatávolságra távolodva feszültséget mér. A munkatávolságot iterációs lépésekben addig változtatja, amíg az etalonon $0 \pm$ néhány (kb.10) MPa feszültséget mér. (A kalibráció során az etalonon mért feszültség megengedett értéke megfelel az EN 15305 “Non-destructive testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction” szabványnak.) A ferrit etalonon mért 0 MPa feszültséghez tartozó távolság lesz a minták mérése során alkalmazott munkatávolság. Kalibráció során a berendezés a munkatávolság meghatározása mellett a vonaldetektorok felskálázását is elvégzi.

A vizsgálati minta mérésének kezdetén a berendezés kollimátora megérinti a minta felületét, majd eltávolodik a kalibrálás során megállapított megfelelő munkatávolságra. Mérés során a berendezés oldalirányban megdől a megadott Ψ szögekkel (10. ábra) és a két

vonaldetektor segítségével méri a diffraktált röntgensugárzás intenzitáseloszlását a detektor vizsgálati szögtartományában. A döntési szögek megválasztása a megadott mérési pontok számának megadása után automatikus a $\pm 45^\circ$ tartományon belül. Öt döntési pozícióban vettük fel a diffraktogramokat mind pozitív mind negatív tartományban (11. ábra).

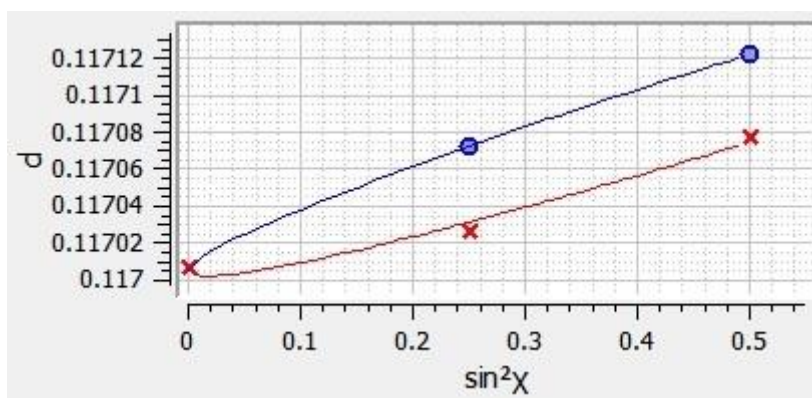


10. ábra: A röntgendiffrakciós berendezés három döntési pozícióban ($\Psi = -45^\circ$, 0° ill. 45°)



11. ábra: A {211} ferrit reflexió öt döntési pozícióban

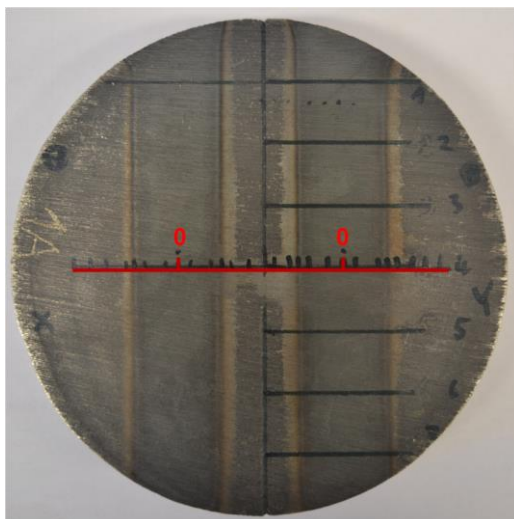
Az EN 15305 “Non-destructive testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction” szabvány szerint a gyűjtési időt úgy kell megválasztani, hogy a reflexiók detektált intenzitása minimum 60 cps legyen. Ennél kisebb érték esetén a jel/zaj arány túl kicsi lenne. Méréseink során a gyűjtési időt úgy választottuk meg, hogy a reflexiók detektált intenzitása 80 cps feletti legyen. A $\sin^2\Psi$ módszert alkalmazva, a berendezés szoftvere a $\sin^2\Psi$ függvényében ábrázolja a (csúcsok helyzetéből számított) rácssíktávolságokat (12. ábra). A pontokra görbét illeszt, amely görbe középvonalának meredeksége a normálfeszültséggel, szétnyílása pedig a csúsztatófeszültséggel arányos.



12. ábra: Rácstávolság (d) a $\sin^2\Psi$ függvényében

A lézersugaras edzés előtt a tárcsák középvonalán, a fűrészelés irányára merőleges irányban hét, egymástól egyenlő távolságra lévő mérési ponton mértük a feszültséget (5. ábra). Minden mérési ponton a fűrészelés irányával párhuzamos és arra merőleges irányú maradó feszültséget is lemértük. A kiinduló feszültségállapot mérései során 3 mm átmérőjű kollimátort és 5 másodperces gyűjtési időt használtunk.

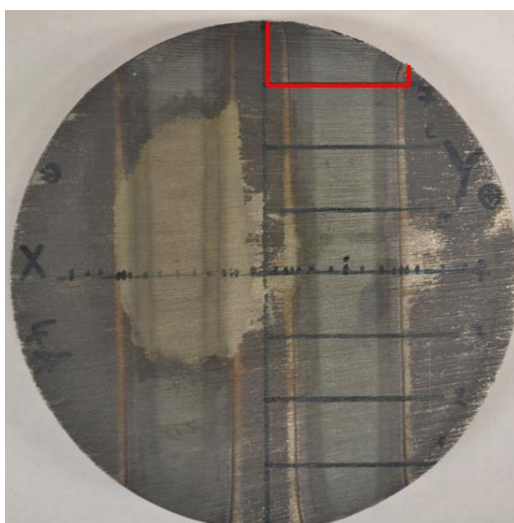
Lézersugaras edzés után az edzett sávok hossztengeleyére merőleges vonal mentén választottuk meg a mérési pontokat. Ezt a vonalat mutatja pirossal megjelölve a 13. ábra. A vonal a minta középvonalán fekszik, a felületedzés előtti mérés 4-es pont magasságánál. A sávok közepét választottuk „0” pontnak, innen kiindulva bizonyos távolságokra vettük fel a további mérési helyeket. Ebben az esetben is a fűrészelés irányára merőleges és párhuzamos feszültségek meghatározására is történtek mérések. A sűrűbb mérési pontok miatt ekkor már 1 mm-es kollimátort alkalmaztunk. A gyűjtési időt a kisebb kollimátor méret miatt meg kellett növelnünk. Ennek megfelelően alapesetben 20 másodperc volt a gyűjtési idő. Az edződött részen kisebb intenzitást tapasztaltunk, így ott a gyűjtési idő 30-60 másodperc volt.



13. ábra: Lézersugaras edzés utáni mérések helyzete

4.4. Fáziselemzés

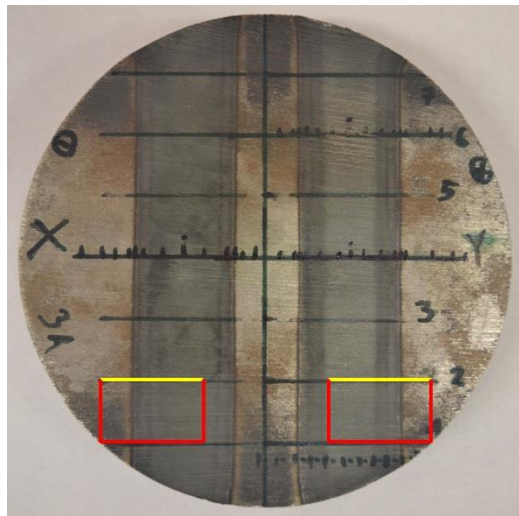
A feszültségmérés során az edződött részen a ferrit (martenzit) (211) reflexiójának közelében más reflexiók is jelentkeztek. A felületen lévő fázisok vizsgálatára egy Co röntgensóvel és Euler bölcsővel felszerelt Bruker D8 Advance típusú röntgendiffraktométert használtunk. A vizsgálatra a 300 mm/perc előtolással, 100% lézersugár teljesítménnyel készült lézersugárral edzett sávból történt a mintavétel sarokcsiszoló segítségével. A vágás helyét pirossal jelölve mutatja a 14. ábra. A vizsgált felület párhuzamos a tárcsa felületével. A mérést elvégeztük alapállapotban, majd a felület polírozása után is.



14. ábra: A fáziselemzéshez vett minta elhelyezkedése

4.5. Szövetvizsgálat

A lézersugárral edzett minták metallográfiai vizsgálatához sarokcsiszolóval történt a mintavétel. Vágás közben időnként vízzel lett hűtve a darab, hogy minél kisebb hőhatás érje. A hengeres próbadarabokból 25x15x22 mm méretű mintákat vettünk. A próbák helyét és a vizsgált felületet piros ill. sárga színekkel mutatja a 15. ábra. A minták belső szélé az edzett sáv középpontjától 5 mm-re volt. A vizsgált felület sárga színnel van megjelölve.

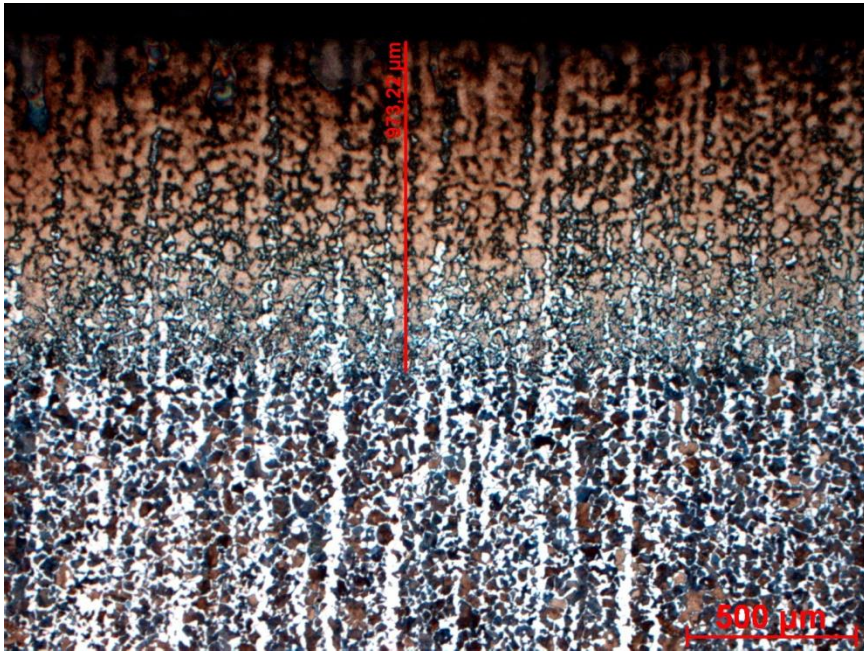


15. ábra: A hengeres próbákból vett metallográfiai minták helyzete

A kivett mintákat beágyazás után előkészítettük. Ehhez gépi vizes csiszolást és polírozást használtunk. Maratáshoz 2%-os nitál oldatot alkalmaztunk.

A szövet vizsgálatához Zeiss Axio Imager M1m típusú fénymikroszkópot használtunk. A teljes edzett sáv kisebb nagyítású felvételeit Zeiss Stereo Discovery v12 mikroszkóppal készítettük.

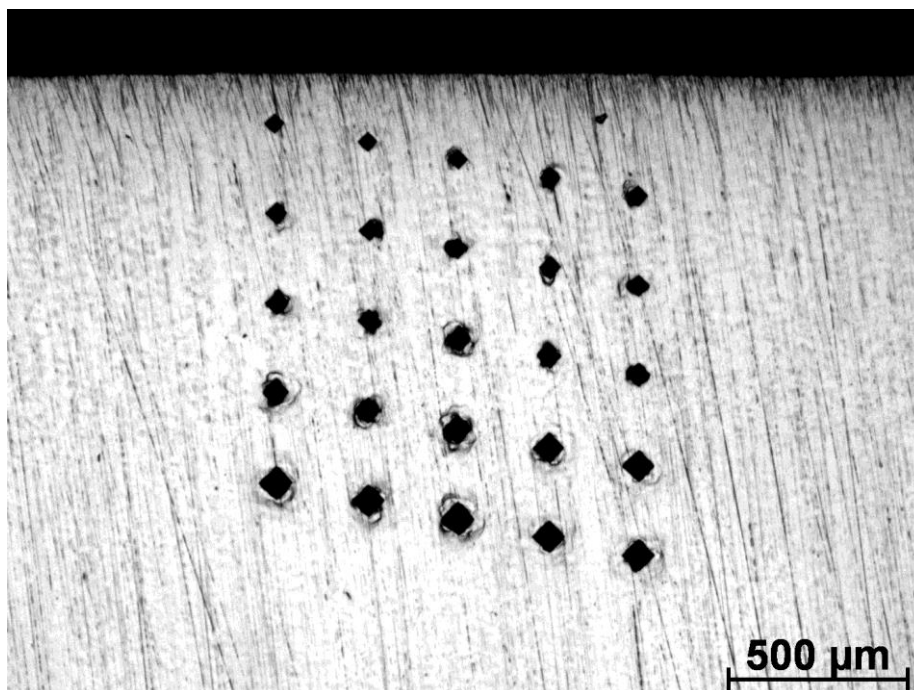
A fénymikroszkópos felvételek készítéséhez is használt AxioVison 4.8 szoftverrel lemértem a beedződött legnagyobb mélységet. A mérést a legkisebb méret esetében a 200x nagyítású felvételen, a többi esetben az 50x nagyítású felvételeken végeztem, a szöveti jellemzők alapján. Egy mérést mutat a 16. ábra.



16. ábra: A lézersugaras kezelés során beedződött mélység meghatározása a fénymikroszkópos felvételeken (90% teljesítmény, 400 mm/perc, 50x nagyítás)

4.6. Keménységmérés

A keménységmérést TUKON 2001B típusú berendezéssel végeztük. Ehhez a metallográfiai próbákat újra megcsiszoltuk. A mélységi keménységprofil felvételéhez próbaméréseket csináltunk egy minta alapszövetében. Ezek alapján a HV1 mérést választottuk. Az adott terhelés mellett a lágy alapszövetben a keménységmérési nyomok átlója (d) közel $100\ \mu\text{m}$ volt. A profil felvételéhez $50\ \mu\text{m}$ -re választottuk a nyomok közti léptéket. A szabványnak megfelelő $2,5d$, azaz ebben az esetben $250\ \mu\text{m}$ távolságot betartva egymás mellett több sorban helyeztük el a keménységnyomokat (17. ábra). Az ábrán a sorok közti távolság $250\ \mu\text{m}$, mélységben egy-egy nyom távolsága szintén $250\ \mu\text{m}$. A sorok egymáshoz képest $50\ \mu\text{m}$ -rel vannak eltolva. A felülethez legközelebbi nyom távolsága $150\ \mu\text{m}$. A szabvány szerinti $2,5d$ távolságnak azonban ez is megfelel, mivel ennek mérete egyik esetben sem haladta meg a $60\ \mu\text{m}$ -t. A méréseket az edzett sáv középpontjánál végeztük.

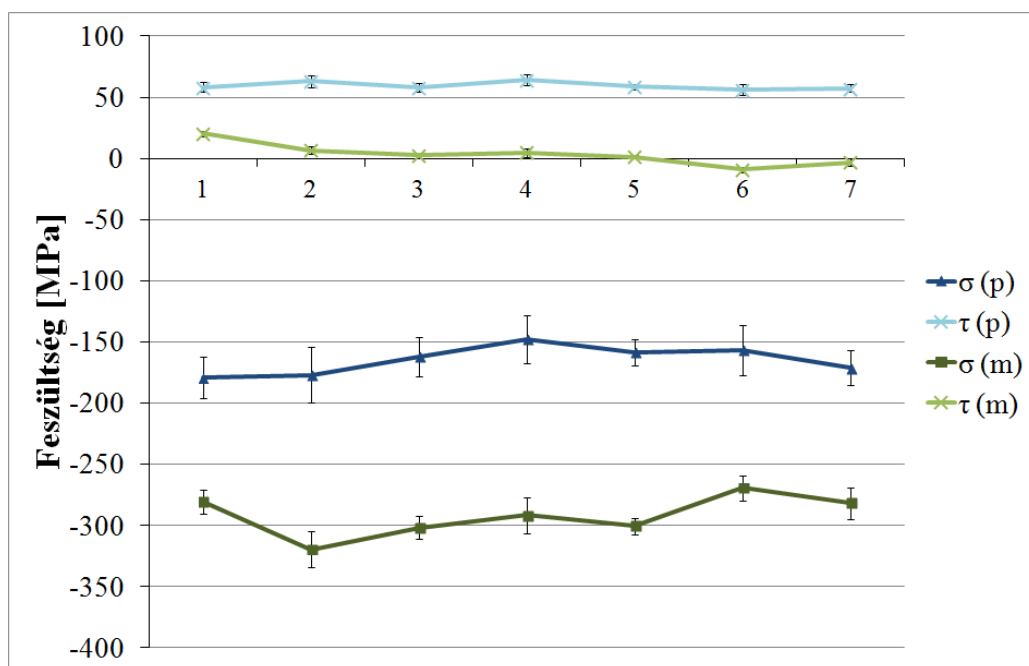


17. ábra: A keménységmérési nyomok pozíciója

5. Eredmények

5.1. Feszültségmérés

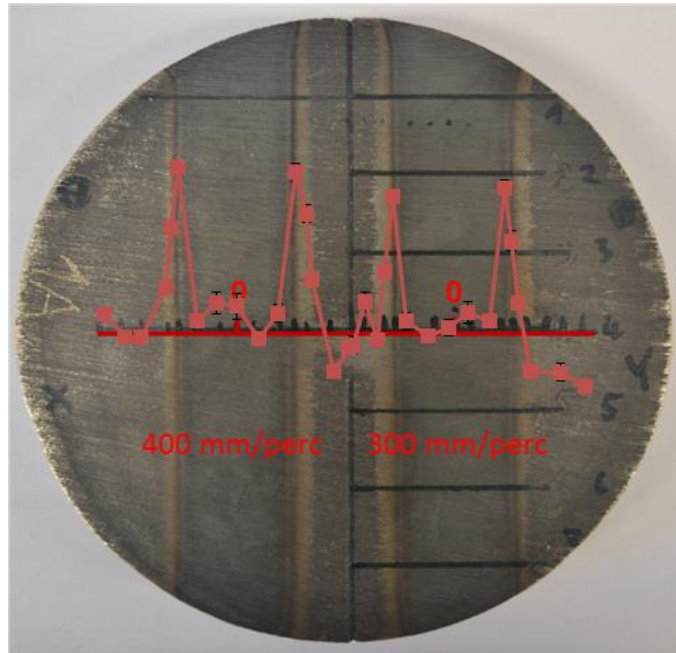
A lézersugaras kezelés előtti feszültségállapotot mutatja a 18. ábra. A diagramon a később 70% teljesítménnyel edzett próba feszültségértékei láthatóak. Az eloszlás a mintán belül egyenletes, ami mind a nyolc darab mindkét oldalára hasonlóan jellemző volt. A normálfeszültség (σ) értékei a fűrészelés irányával párhuzamosan (továbbiakban FP) -150 MPa és -190 MPa közé esnek, átlagos értékük kb. -170 MPa. Merőleges irányban (továbbiakban FM) -260 MPa és -330 MPa közé esnek, átlagos értékük kb. -300 MPa. A csúsztatófeszültség (τ) értékei FP irányban negatív és pozitív értékeket is felvettek. Az abszolútértékeket figyelembe véve azok 50 MPa és 65 MPa közé esnek, átlagos értékük kb. 55 MPa. FM irányban -10 MPa és 20 MPa közé esnek, átlagos értékük kb. 0 MPa.



18. ábra: Lézersugaras edzés előtti feszültségállapot jellemző eloszlása

(σ : normálfeszültség, τ : csúsztatófeszültség, p =fűrészelés irányával párhuzamosan, m =fűrészelés irányával merőlegesen, 1-7 pontok: 5. ábra szerint jelölt pontok)

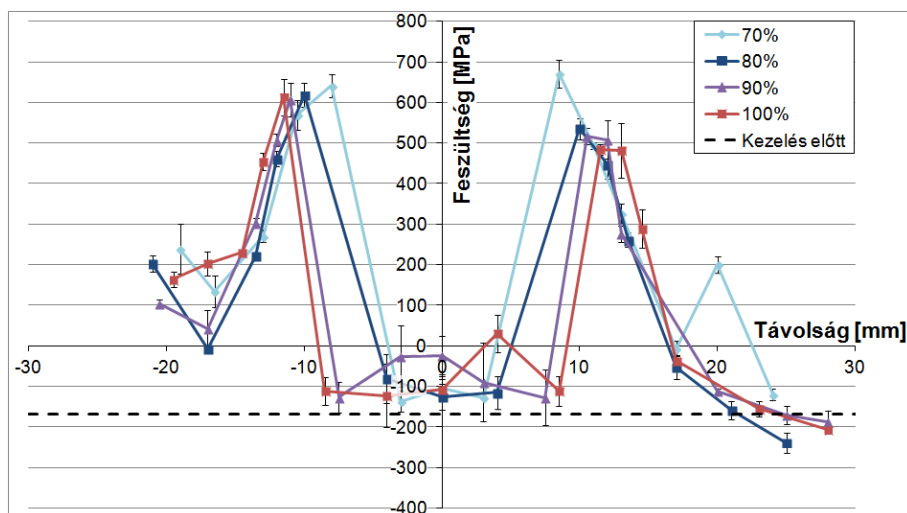
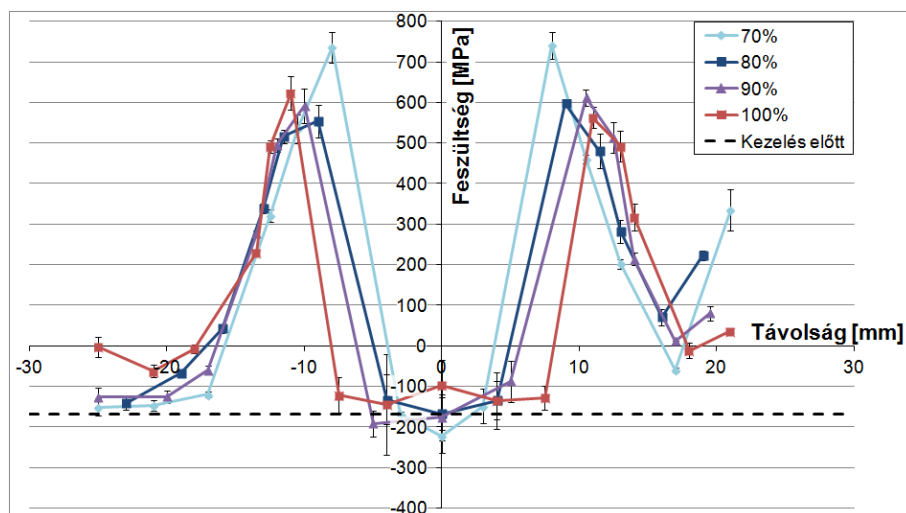
A lézersugaras edzések okozta maradó feszültség diagramok értelmezését a 19. ábra mutatja. Ennek az ábrának megfelelően a 20. ábra és a 21. ábra mutatja a mért feszültségeket 19. ábra, az edzett sáv szélességében ábrázolva.



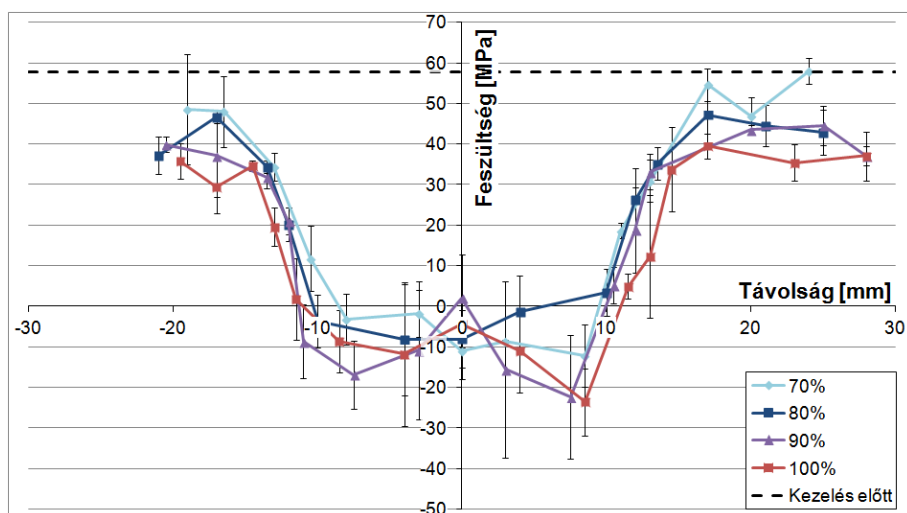
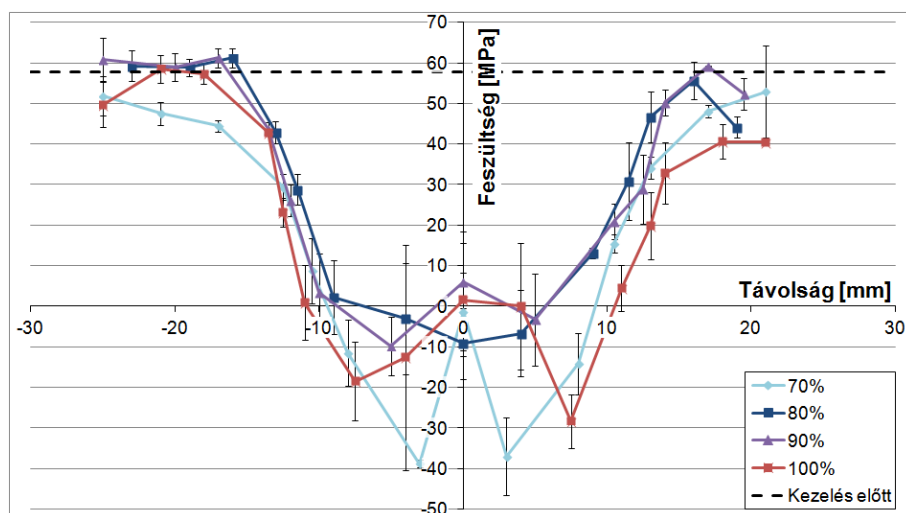
19. ábra: A lézersugaras edzés okozta feszültség-eloszlások értelmezése

A normálfeszültségek eloszlása a sávok közepétől (0 mérési pont) kiindulva mindkét irányban (jobbra és balra) mérve hasonló. A sáv közepénél mért alacsony értékű (kb. -100 MPa) nyomófeszültségből a sáv közepétől kb. 10 mm-re egy nagy értékű húzófeszültségbe megy át. Ez FP irányban kb. 600 MPa. A 400 mm/perc előtolás, 70%-os teljesítmény kissé nagyobb értéket eredményezett (kb. 700 MPa) ezt a kezelést kivéve a teljesítménnyel és az előtolás sebességével jelentős változás nincs. FM irányban a maximum értéke kisebb, gyorsabb előtolásnál közel 500 MPa, lassabb esetén kb. 400 MPa (21. ábra). A teljesítmény változtatása itt sem okoz jelentősebb eltérést. A maximum után, a sáv közepétől kb. 18-20 mm-re visszaáll a kiinduló állapot feszültségértékére. A tárcsa közepén a normálfeszültség felugrása tapasztalható.

A csúsztatófeszültség FP irányban mindkét előtolási sebességnél hasonló lefutást eredményez (20. ábra). A sáv középpontján mindkét előtolás esetén 0 MPa körüli értéket mértünk. Ezután a kezdeti értékkel ellentétes irányú csúsztatófeszültség lép fel, azonban ennek az értéknek a szórása jelentős. A középponttól kb. 15-18 mm-re visszaáll a kiinduló állapot értékére. FM irányban a kiinduló állapothoz hasonló értékeket tapasztaltunk (21. ábra). Néhány kiugró értéken kívül a 0 MPa körül mozog a ± 10 MPa közötti sávban.

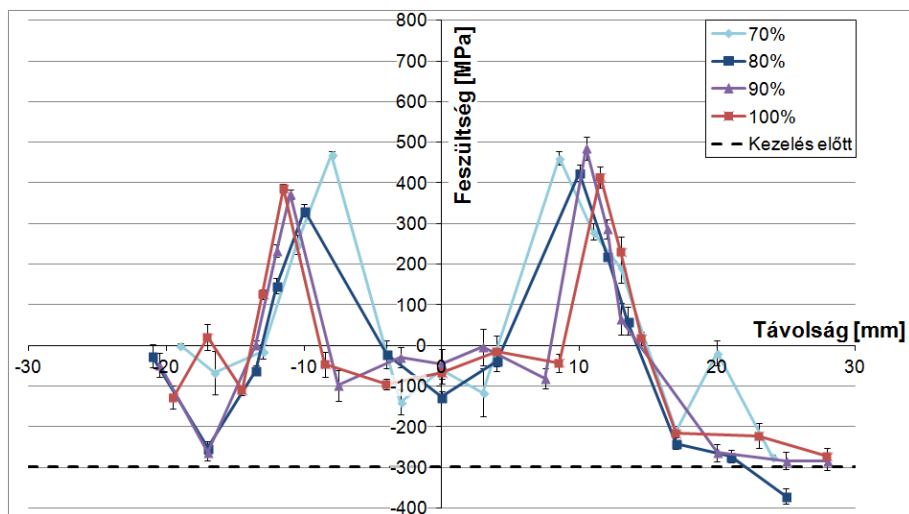
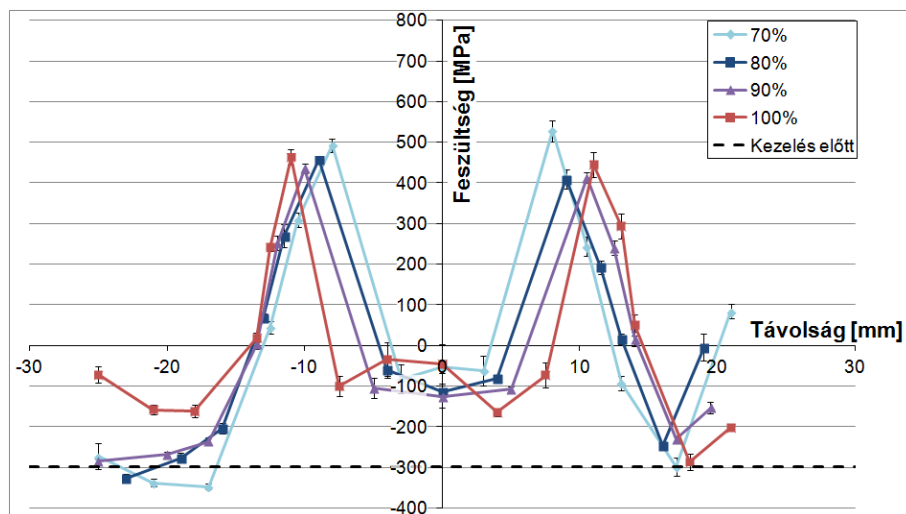


a) Normál feszültség (σ) (bal oldal: 400 mm/perc előtolás, jobb oldal: 300 mm/perc előtolás)

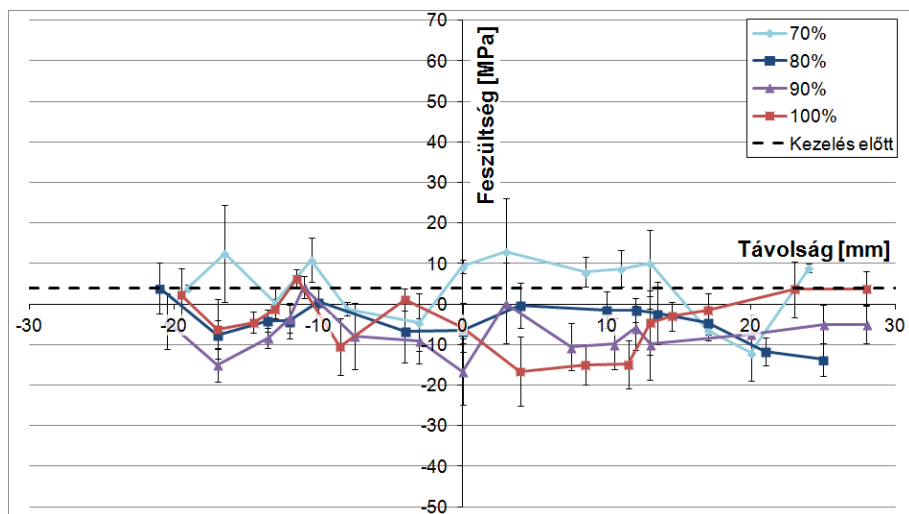
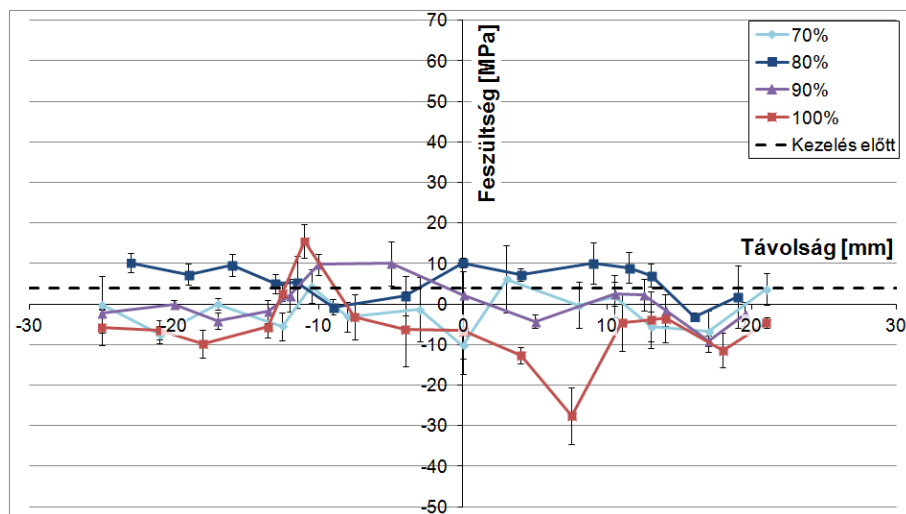


b) Csúsztatófeszültség (τ) (bal oldal: 400 mm/perc előtolás, jobb oldal: 300 mm/perc előtolás)

20. ábra: Lézersugaras edzés utáni feszültségállapot a fűrészelés irányával párhuzamosan (az előtolás irányával merőlegesen)



a) Normál feszültség (σ) (bal oldal: 400 mm/perc előtolás, jobb oldal: 300 mm/perc előtolás)



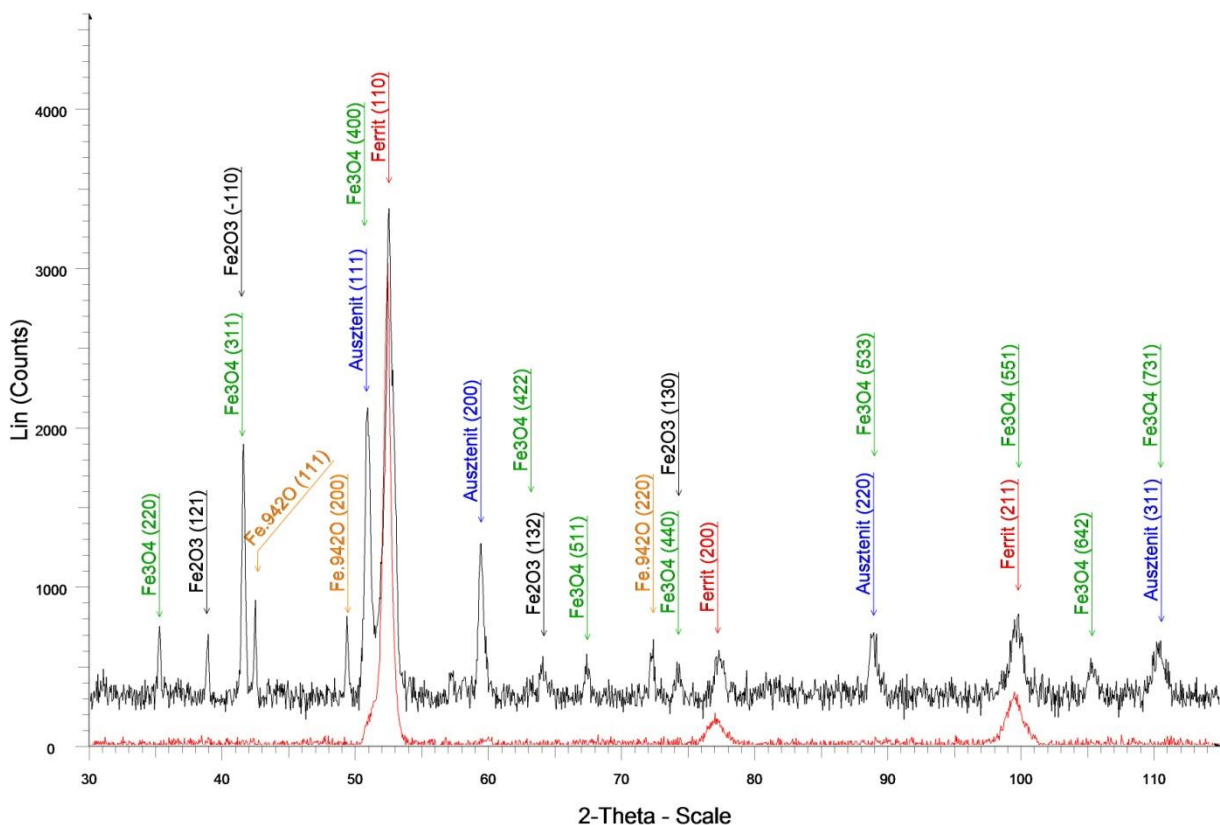
b) Csúsztatófeszültség (τ) (bal oldal: 400 mm/perc előtolás, jobb oldal: 300 mm/perc előtolás)

21. ábra: Lézersugaras edzés utáni feszültségállapot a fűrészelés irányával merőlegesen (az előtolás irányával párhuzamosan)

5.2. Fáziselemzés

A fáziselemzéshez felvett diffraktogramokat mutatja a 22. ábra. A polírozás előtt felvett diffraktogram (fekete) mindössze a láthatóság kedvéért van kissé eltolva a függőleges tengelyen.

Polírozás után csak a ferrit (martenzit) reflexiók jelentek. Polírozás előtt viszonylag nagy maradék ausztenit tartalmat és különféle vas-oxid fázisokat azonosítottunk. Mivel a maradék ausztenit reflexiói közül egyedül a (200) jelentkezett tiszta ausztenit reflexióként, megbízható mennyiségi elemzésre nem volt lehetőségünk. A vas-oxid fázisok jelenléte egyértelműen felületi oxidációt jelent, a nagy felületi maradék ausztenit tartalom azonban meglepő. Ennek a megjelenése feltehetőleg összefüggésbe hozható a grafit abszorbeáló réteggel, amely a kezelés során megemelhette a felület karbon tartalmát.

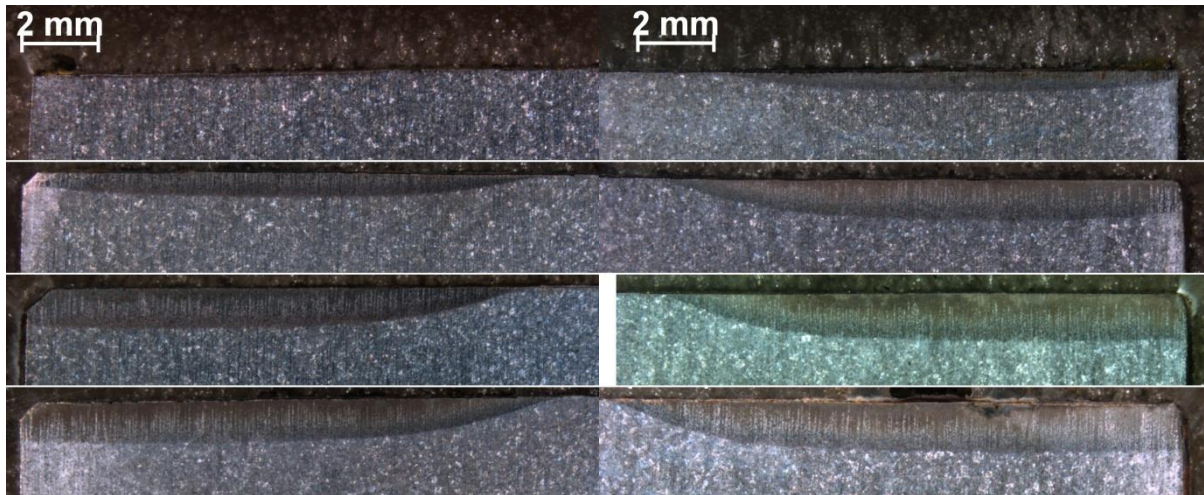


22. ábra: A lézersugárral edzett felületen felvett diffraktogramok polírozás előtt (fekete) és után (piros)

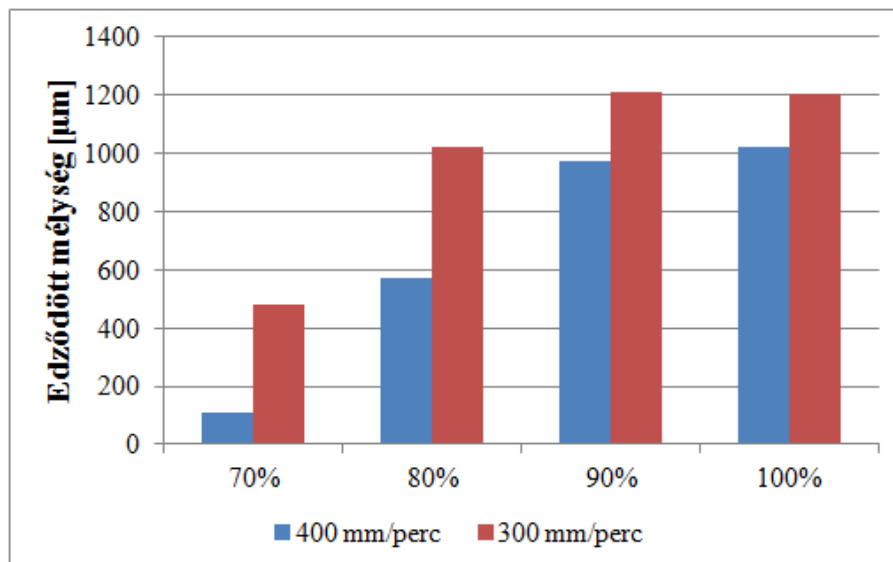
5.3. Szövetvizsgálat

A lézersugárral edzett sávok keresztmetszetét mutatja 12x nagyításban a 23. ábra. Megállapítható, hogy az előtolási sebesség csökkentésével, ill. a lézersugár teljesítményének növelésével nő az edződött mélység.

A szövetképeken mért mélységi értékeket mutatja diagram formájában a 24. ábra. Itt is megállapítható, hogy a kisebb sebesség és nagyobb teljesítmény növeli a mélységet. Leolvasható az is, hogy 70%-os lézersugár teljesítménynél, gyorsabb előtolásnál csak nagyon vékony réteget sikerült létrehozni, alig 100 μm edződött be. Látható, hogy 90% és 100% teljesítmény között mélységbeli különbség gyorsabb előtolásnál minimális, lassabbnál pedig gyakorlatilag nincs.

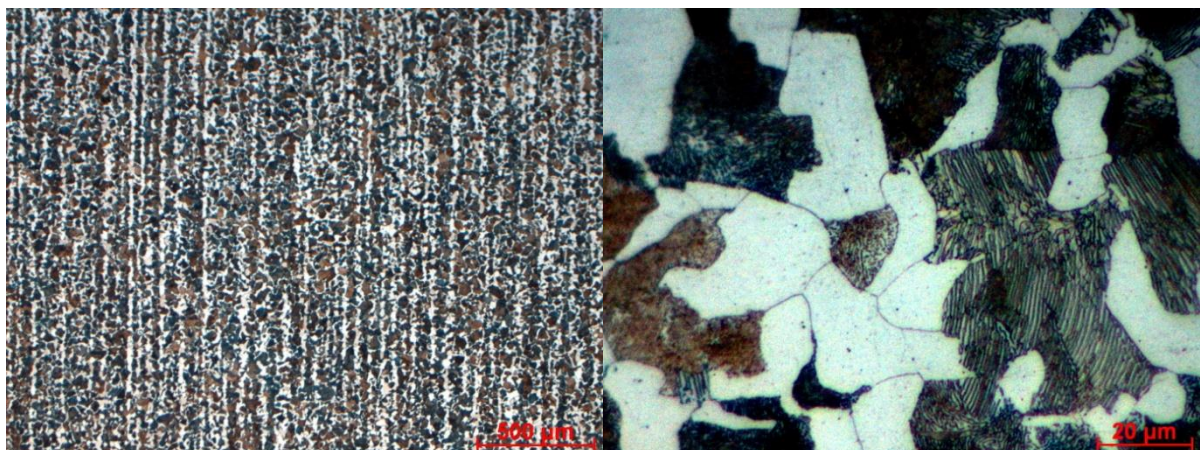


23. ábra: A lézersugárral edzett sávok 12x nagyításban
(bal oldal: 400 mm/perc előtolás, jobb oldal: 300 mm/perc előtolás,
fentről lefelé: 70-80-90-100% lézersugár teljesítmény)



24. ábra: A lézersugaras edzés paramétereinek hatása a beedződött mélységre

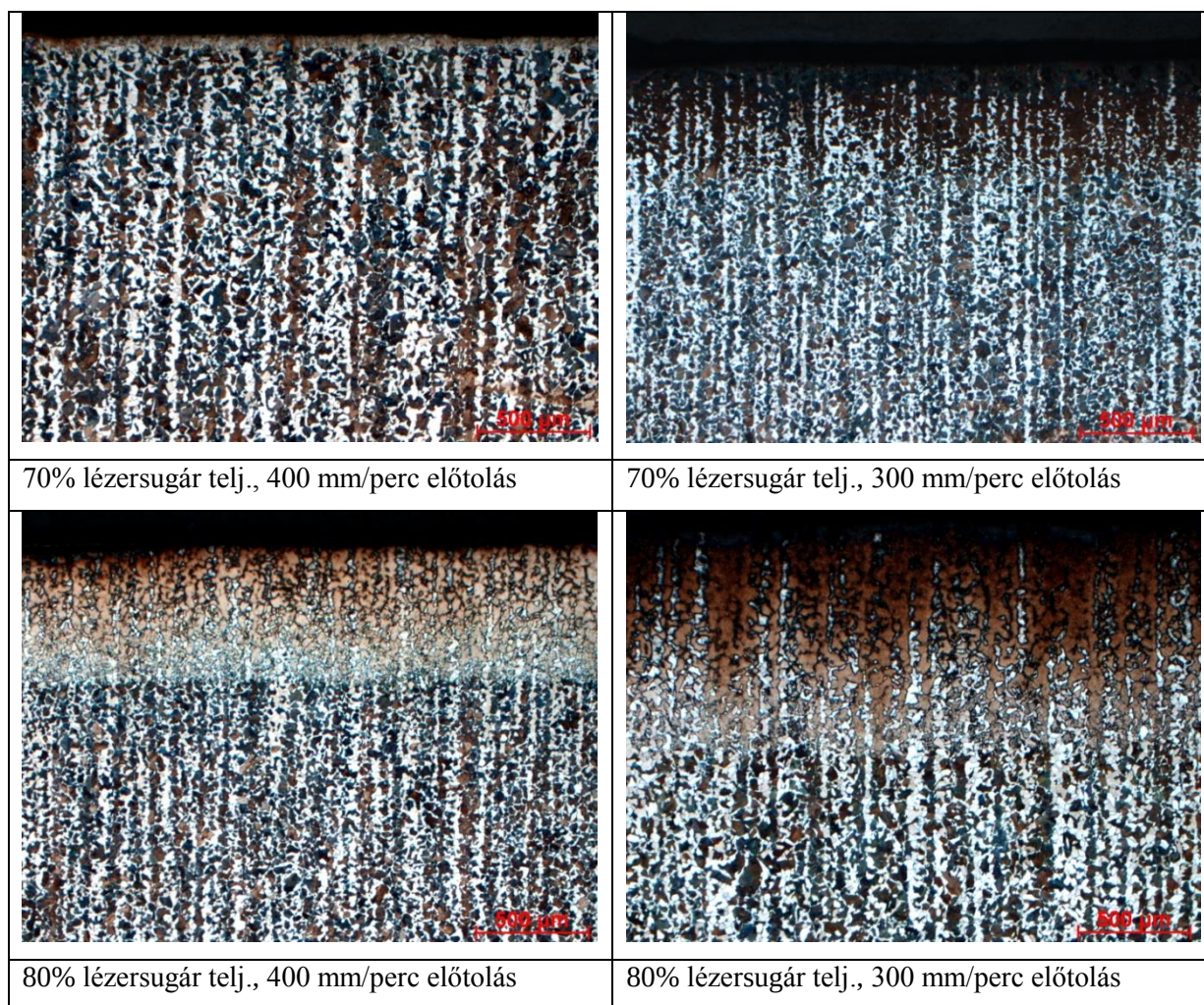
A minták belsejében lévő, azaz a kiinduló szövetszerkezetet mutatja a 25. ábra. Ez egy soros, ferrit-perlites szövet.



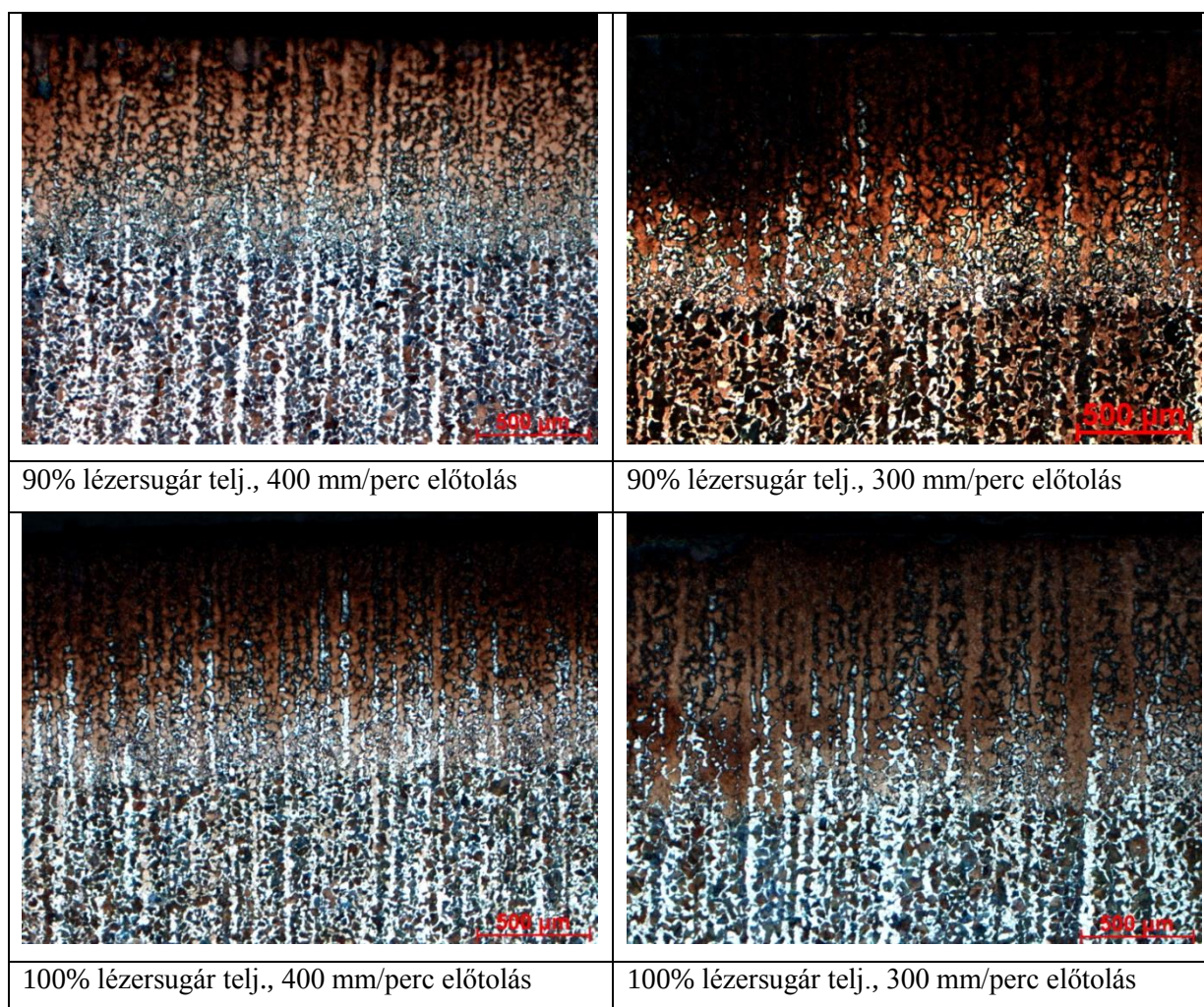
25. ábra: Kiinduló szövetszerkezet (balra: 50x, jobbra: 1000x nagyítás)

A lézersugárral edzett felületeket mutatja 50x nagyításban a 26. ábra és a 27. ábra, illetve nagyobb nagyításban a 28. ábra és a 29. ábra. A 29. ábra képei a→d sorrendben a minta felületétől haladnak a belseje felé. A képeken többféle hatás is megfigyelhető. Ferrit, martenzit és perlit szövetelemeket különböztethetünk meg a hőhatás övezetben. A képeken a beedződött réteg vastagsága jól kivehető. Egyértelműen látszik, hogy a lézersugár teljesítményének növelésével és az előtolási sebesség csökkentésével nő az átalakult rétegvastagság, nő az ausztenitesedett szövetelemek mennyisége, csökken a ferrit mennyisége, változik a keletkezett martenzit szerkezete. A hőhatásnak köszönhetően a perlit

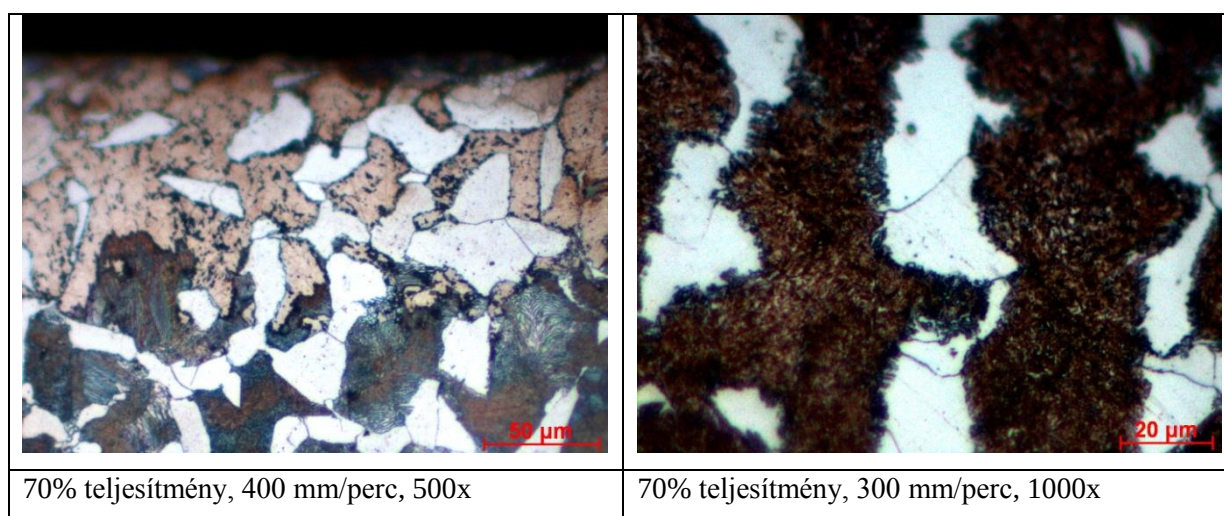
sorok ausztenitesednek először, majd a teljesítmény növelésével egyre több ferrit szemcse is. Megfigyelhető, hogy a ferrit sorok a 90% és 100% lézersugár teljesítmény esetén már nem érnek ki a minta felületére. A teljesítmény növelésével megfigyelhető a martenzit szemcsék méretének durvulása is, főként a felszínhez közeledve. Ez a gyorsabb előtolásnál 90%, a lassabbnál 80% lézersugár teljesítmény felett jelentős. A kisebb előtolási sebesség alkalmazása, nagyobb hőbevitelt jelent, ezáltal megnövekszik a martenzites beedződött réteg vastagsága. A nagyobb teljesítményeknél megfigyeltük, hogy a minta belseje felé haladva a martenzit szerkezete egyre finomabb (29. ábra).



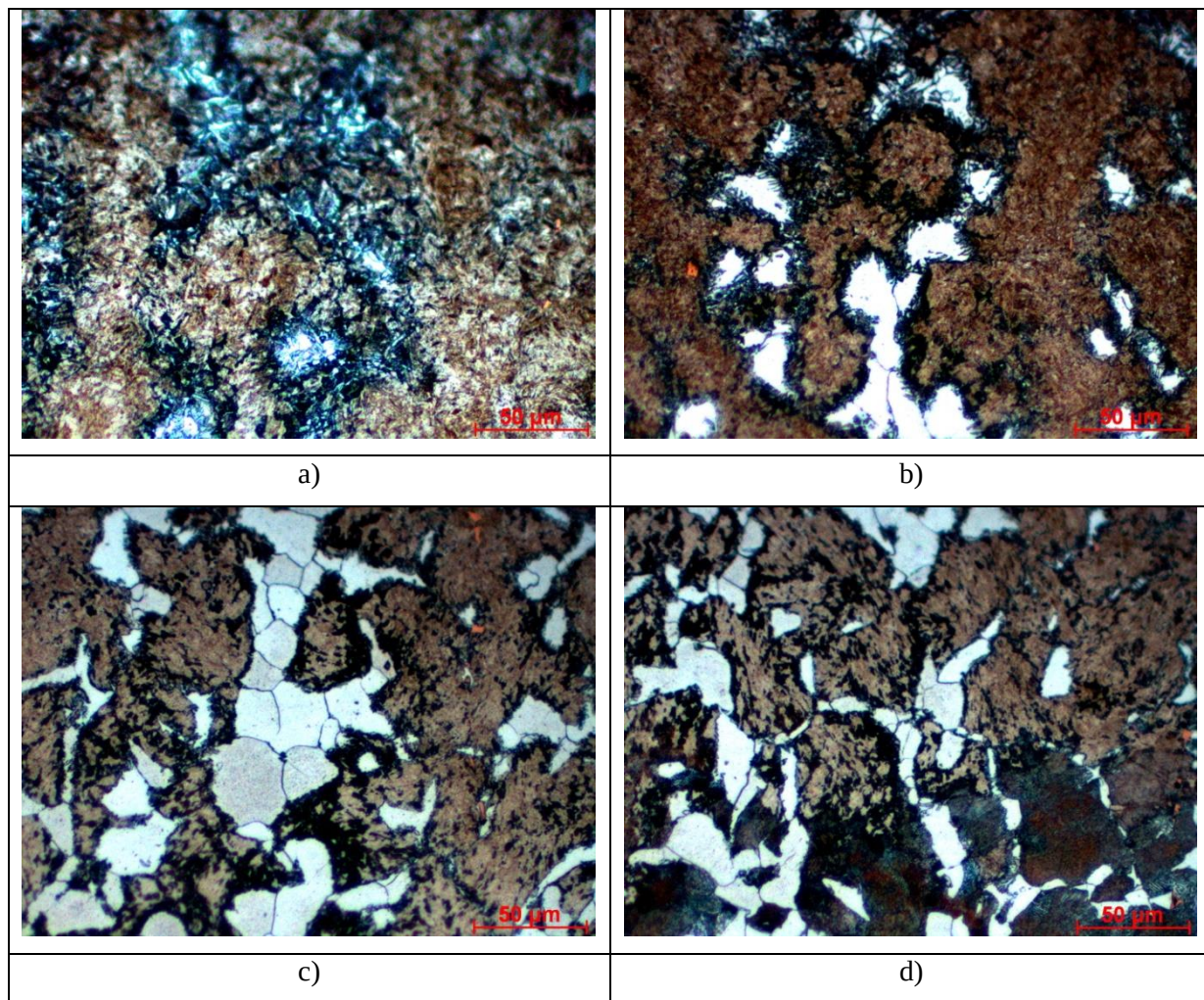
26. ábra: A lézersugárral edzett felületek 50x nagyításban (70-80% teljesítmény)



27. ábra: A lézersugárral edzett felületek 50x nagyításban (90-100% teljesítmény)



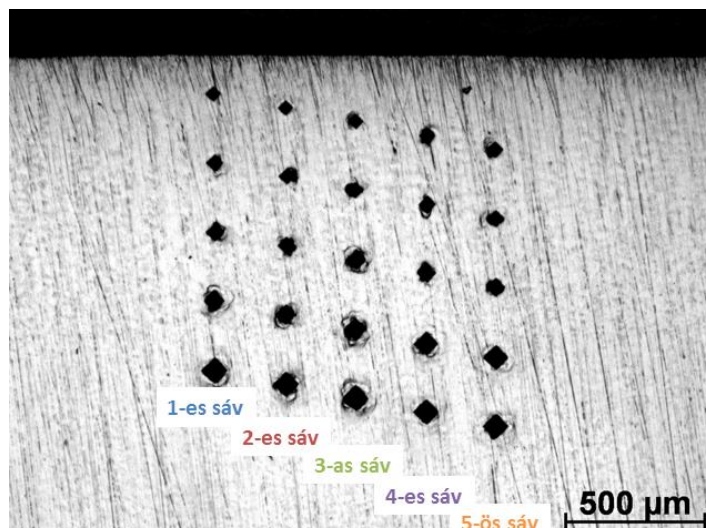
28. ábra: 70% lézersugár teljesítménnyel edzett minták szövetképei



29. ábra: 500x nagyítású felvételek, 100% lézersugár teljesítmény, 300 mm/perc előtolás, a minta szélétől befele haladva (a→d)

5.4. Keménységmérés

A keménységmérések során számolnunk kellett azzal, hogy a kiinduló szövet soros ferrit-perlites szerkezetű volt, az edzett felületre merőleges irányban. Az optikai mikroszkópos képeken láttuk, hogy a sorosság megmaradt a lézersugaras edzések után is. Az egymást követő keménységmérési pontokat egymáshoz képest oldalra és lefele eltolva helyeztük el (a mélység szerinti mérés felbontásának növelése miatt), így azok összesen öt függőleges mérési sávban helyezkedtek el. Könnyen előfordulhat, hogy a keménységmérési sávok közül valamelyik a soros ferritben volt, míg egy másik a martenzit-perlites sorban. Éppen ezért az öt mérési sáv pontjait sávonként megkülönböztettük a kiértékelések során. A keménységmérési sávok értelmezését a 30. ábra mutatja. A keménységmérések során kapott diagramokon a sávokhoz tartozó pontok jelölő színei azonosak az ábrán használt színekkel.

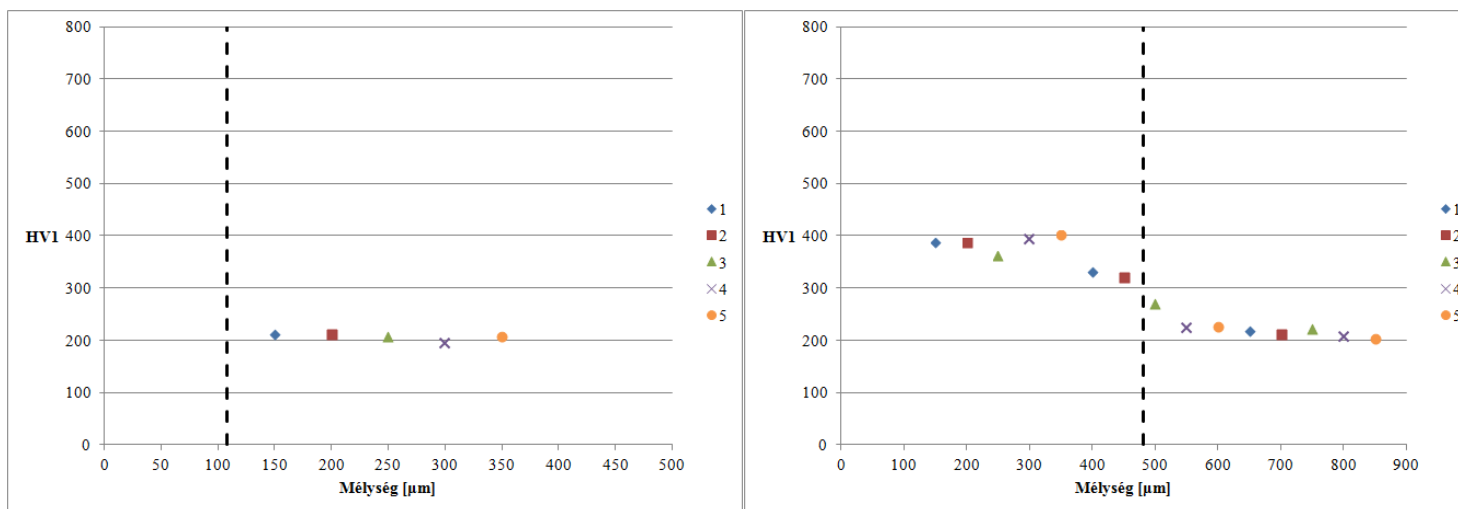


30. ábra: A keménységmérés adatpontjainak elhelyezkedése az öt függőleges sávban

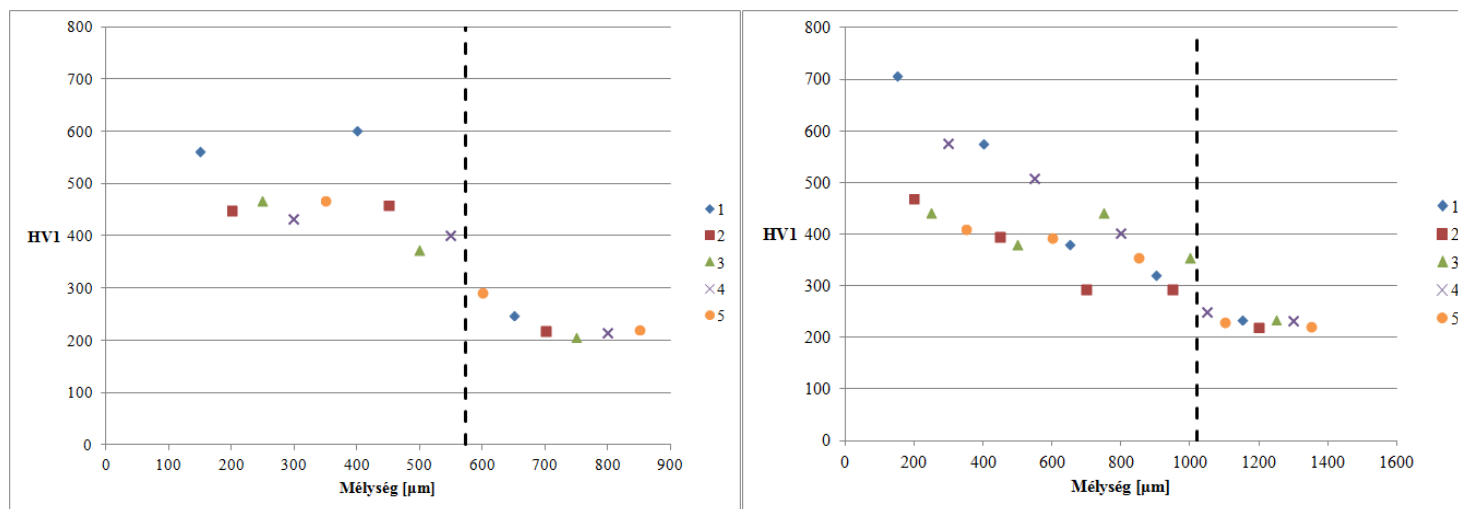
A mért keménység értékeit mutatja diagramok formájában a 31. ábra és a 32. ábra. A szaggatott vonal a diagramokon a fénymikroszkópos képeken mért edződött mélységet jelöli.

A legvékonyabb edzett réteg esetében nem volt lehetőség a felülethez olyan közel mérni, hogy az edzett rétegben hozzunk létre keménységnyomot. A többi esetben a görbék lefutása hasonló. Lassabb előtolásnál, 80% lézersugár teljesítmény felett a különböző sávokban mért értékek egyre jobban elválnak egymástól, egy-egy soron belül azonban összefüggő görbét alkotnak. A pontok szétválásának az oka valószínűleg az, hogy a különböző mérési sávok hol soros ferritben (2-es, 3-as, 5-ös sávok, 31. ábra, b rész, jobb oldal), hol martenzit-perlit sorban (1-es, 4-es sávok, 31. ábra, b rész, jobb oldal) helyezkedtek el. A 32. ábra „a” részének jobb oldalán azt is megfigyelhetjük, hogy az 5-ös sáv ferritben, az 1-es és 2-es sáv martenzit-perlitben, a 3-as és 4-es sáv pedig ezek határán volt. A keménységmérési pontok szétválásának értelmezésénél meg kell jegyeznünk, hogy a mért keménység értékeket természetesen a szomszédos sávok is befolyásolták, de az értékek esetenkénti szétválása még így is egyértelműen tapasztalható volt. Ez a szétválás a beedződött réteg elérésekor megszűnik. Ez érthető, hiszen amint a 30. ábra is mutatja, a keménység lenyomatok mérete megnőtt a felülettől mért mélység növelésével, így egy nyom már nem csak egy soros szövetet fed be. Gyorsabb előtolásnál ez a jelenség kevésbé szembetűnő.

Mivel a lézersugaras kezelés változtatásával változik a mérendő szövetszerkezet jellege ezért nagyon nehéz optimális terhelést választania a méréshez, ami a gyorsan lefutó keménységprofil meghatározásához még elegendően kicsi, de a szövet egyenetlenségeit kellő módon kiátlagolja, vagyis elegendően nagy. A keménységmérési eredményeket ezért a szöveti jellemzőkkel szorosan összevetve szabad csak értékelni.

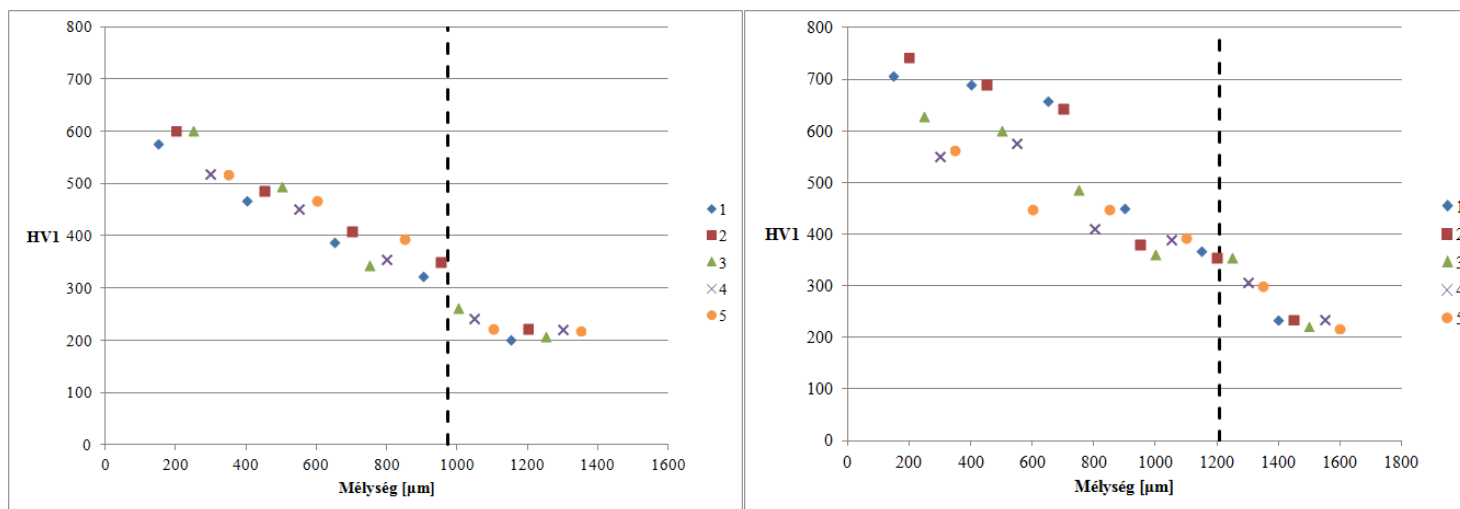


a) 70% lézersugár teljesítmény (balra: 400 mm/perc előtolás, jobbra: 300 mm/perc előtolás)

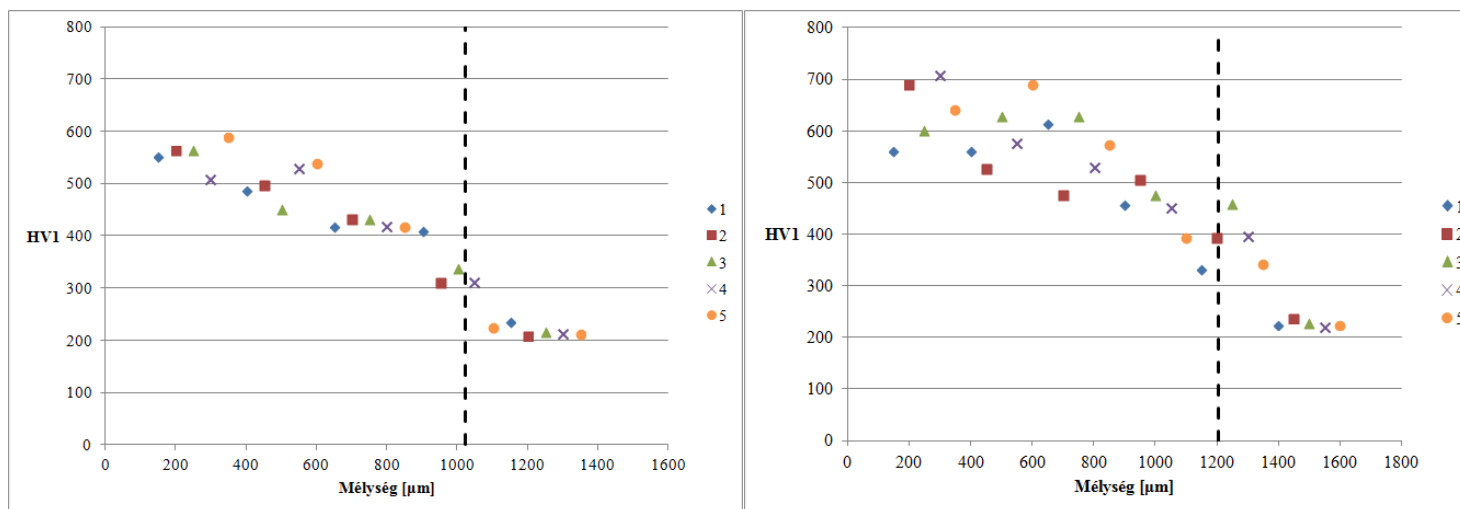


b) 80% lézersugár teljesítmény (balra: 400 mm/perc előtolás, jobbra: 300 mm/perc előtolás)

31. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon



a) 90% lézersugár teljesítmény (balra: 400 mm/perc előtolás, jobbra: 300 mm/perc előtolás)



b) 100% lézersugár teljesítmény (balra: 400 mm/perc előtolás, jobbra: 300 mm/perc előtolás)

32. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon

6. Összefoglalás

C45-ös melegén hengerelt acél felületén 5 kW teljesítményű CO₂ lézerberendezéssel felületi edzést hajtottunk végre különböző lézersugár teljesítmény, előtolási sebesség és bevonati réteg alkalmazása mellett. A paraméterek változtatásának hatását vizsgáltuk a kialakult szövetszerkezetre, keménységprofilra és a felületi maradó feszültségállapotra a kezelés környezetében. A következő megállapításokat tehetjük:

Az előzetes feszültségmérésekből megállapítható volt, hogy a tárcsák felületén jelentős inhomogenitások nem voltak. A fűrészelés irányával párhuzamos (FP) és arra merőleges (FM) irányok eredményeit megfigyelve visszavezethetők a fűrészeléssel bevitt maradó feszültségek. FP irányban valószínűleg megmaradt a hengerlésből adódó nyomófeszültség (kb. 170 MPa). FM irányban, azaz amerre a fűrész nyomja lefele vágás közben a mintát, nagyobb nyomófeszültséget kaptunk (kb. 300 MPa). A fűrész oldalirányú mozgásának irányában (FP) kis mértékű csúsztatófeszültség (kb. 55 MPa) volt tapasztalható. Ezek előjele nem minden esetben volt azonos, ezt valószínűleg az utolsó fűrészelési irány határozta meg. Erre merőleges irányban (FM) nem volt semmi, ami csúsztatófeszültséget okozott volna, így 0 MPa körüli értéket mértünk.

A lézersugaras felületedzés jellegzetes feszültségeloszlást mutat a felületen. A fázisátalakulás helyén viszonylag kis nyomófeszültség (100 MPa) alakult ki. A kialakult feszültség gyakorlatilag független a kiinduló állapottól (FM és FP irányban eltérő kiindulás, viszont egyező végállapot). Ez a martenzit ferrithez képesti nagyobb rácsállandójával magyarázható (a nem egyensúlyi helyzetben lévő karbon nyomja a rácsot). A felületen az edződött és az át nem alakult rész között, az utóbbiban magas húzófeszültség lép fel. Mivel a nagyobb teljesítmény nagyobb energiabevitelt jelent, a hőmérséklet nagyobb térfogatban (mélyebben és szélesebben) hat, ezért változik szélességében a feszültség maximumának helye. A hőhatástól távolodva ez a húzófeszültség lassan visszaáll a kezdeti értékre. A mérési tartománynak a tárcsa közepe felőli szélén jelentkező, kismértékű felugró értékek a vibro iron hatásának tudhatók be. Ilyen felugrások megfigyelhetők még néhány ponton, amely pontok közelében szintén voltak a készülékkel felrajzolt vonalak. A kismértékű csúsztatófeszültséget gyakorlatilag leépíti az edzés. A csúsztatófeszültség esetén is a tárcsa közepén mutatkozó kisebb eltérések szintén a vibro iron nyomával magyarázhatók.

Az edzett felületen a hő hatására alakulhattak ki az azonosított vas-oxid fázisok. Ez a felső oxidos réteg viszonylag könnyen, már polírozás hatására eltávolítható volt. A felső igen

vékony rétegben az abszorbensként használatos grafitpor beoldódásával is számolni lehet, mely az itt kialakuló legfelső, vékony edzett rétegben növeli a maradék ausztenit mennyiségét. A mechanikai tisztítás (polírozás) ezt a réteget is eltávolította, így a mélyebb rétegekben már csak a ferrit (martenzit) fázis van jelen.

Az előkészített csiszolatokon jól látható, hogy a teljesítmény növelésével egyre nagyobb (szélesebb, mélyebb) az edződött réteg. A teljesítmény növelésével és az előtolási sebesség csökkentésével nő az energiabevitel, ez intenzívebb hőhatást eredményez, nagyobb térfogatban ausztenitesedik a felület, ami aztán átalakul martenzitté. A lézersugaras edzés technológiájának gyors hevítési ciklusát igazolja, hogy az edzett réteg élesen elkülöníthető a kiinduló szövetszerkezettől. A mélységben változó hőhatással változik a martenzit mennyisége, szerkezete, finomsága. Főleg nagyobb energiabevitelnél a felülethez közeledve durvul a szemnagysága is. A nagyobb hőhatás segíti a diffúziót, ezért ezeknél a mintáknál a felületen már nincsen ferrit. Amennyiben több ferrit alakul ausztenitté a kialakult fázis karbontartalma csökken, és ez jól megfigyelhető változást okoz a belőle képződött martenzit szerkezetében is.

A keménység görbék a felületszilárdítási technológiáknál megszokott módon futnak a felülethez közeledve. Egyes esetekben megfigyelhető egy-egy kiugró pont, a nagyobb hőhatásoknál pedig már egyértelműen több görbére válnak szét. Ennek a következő lehet a magyarázata: a referenciaként vett 100 μm méretű keménységnyomok az alapszövet ferrit-perlit soraihoz képest néhányszor nagyobbak, így ebben az esetben mindkét fázis keménysége szerepet játszik. Azonban a keménység növekedésével természetesen csökkentek (50 μm -ig), a durvult szemcseméret pedig szintén elősegítette, hogy a nyomok nagyságrendje azonos legyen a szemcsékével. Ezért ezekben az esetekben tisztán martenzit fázis keménységét is mérhettük, ez okozza a magasabb értékeket. A keménységméréssel több sorban létrehozott nyomok párhuzamosak voltak a ferrit-perlit sorokkal, így egy sor esetében egymáshoz képest nem kaptunk ugráló értékeket. Különböző sorokat összevetve viszont ezért lehetséges az eltérés.

Vizsgálataink eredményeként egyértelmű összefüggéseket tudtunk megállapítani a kezelés paramétereinek függvényében a szöveti jellemzők, a feszültségállapot és a keménységprofil lefutása között.

7. További tervek

A továbbiakban munkám folytatásaként szeretném a folyamatban lévő TiO₂ abszorpciós réteggel bevont minták vizsgálatát befejezni, az eredményeket összevetni a jelen dolgozat eredményeivel.

A kialakult feszültségállapotok további vizsgálatához szeretnék elválasztani a fázisátalakulás és a hőtágulás okozta feszültségek hatását. Ezért fázisátalakulást nem mutató ausztenites saválló acélon szeretnék lézersugaras kezelést végezni.

A komplex feladatnak megfelelően hagyományos edzéseket fogok végezni és az eltérő hűtési irányból adódó eltérő feszültségállapotokat fogom összehasonlítani.

Végeredményül az ipar számára is a lézersugaras felületi edzés technológiájához kapcsolódó új ismereteket fogok tudni szolgáltatni.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a mérések és a dolgozat készítése során nyújtott segítségét konzulensemnek, Dr. Benke Mártonnak.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Stefan Kaierle-nek, hogy a Laser Zentrum Hannoverben tölthettem a nyári gyakorlatomat, Dr. Buza Gábornak, a lézersugaras edzéshez nyújtott szakmai segítségért, és hogy a lézersugaras kezelést elvégezhettem a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Anyagtudományi és Technológiai Intézetében.

A dolgozat megszületéséhez nyújtott segítségét szeretném megköszönni Dr. Mertinger Valériának.

A vizsgálatokhoz nélkülözhetetlen előkészítési műveletekben segítségemre volt Márkus Zoltánné, Márkus Zoltán, a keménységmérésnél pedig Bodnárné Nyári Napsugár, az ő segítségüket is köszönöm.

Irodalomjegyzék

- [1] Buza Gábor: Lézersugaras technológiák I., 2012
- [2] Buza Gábor: Lézersugaras technológiák II., 2012
- [3] Krauss: Principles of Heat treatment of steel, ASM Metals Park, Ohio 1980 pp 268
- [4] Valery Rudnev: Handbook of Induction Heating, Library of Congress Cataloging – in-Publication Data, USA 2003 pp 303
- [5] Dr. Bárczy Pál, Dr. Fuchs Erik: Metallográfia I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1981
- [6] Sólyom Jenő: Maradó feszültség mérése röntgendiffrakciós módszerrel gépalkatrészekben, Tanulmány, Miskolc, 2007
- [7] A. D. Krawitz: Introduction to diffraction in materials science and engineering, John Wiley 2001, pp 119-143, 278-318
- [8] Cseh Dávid: Fárasztó igénybevétel maradó feszültségre gyakorolt hatásának vizsgálata, diplomadolgozat, Miskolci Egyetem, 2013
- [9] Xstress 3000 G3/G3R system, Operating instructions and instrument documents, 2012