

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet



Lézersugaras felületi edzés okozta maradó feszültség vizsgálata C45 acélon

Diplomamunka

Készítette:
Filep Ádám
BSc anyagmérnök

Konzulensek:

Dr. Benke Márton
posztdoktor,
Magyar Tudományos Akadémia - Miskolci
Egyetem Anyagtudományi Kutatócsoport,
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai
Intézet

Dr. Buza Gábor
tudományos főtanácsadó, osztályvezető,
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú
Nonprofit Kft. Anyagtudományi és
Technológiai Intézet,
Lézertechnológia Osztály

2013

Tartalomjegyzék

Bevezetés és célkitűzés.....	2
1. Lézersugaras felületedzés	3
2. Hőkezelések okozta maradó feszültség	7
3. Maradó feszültség mérése röntgendiffrakcióval.....	12
4. Elvégzett vizsgálatok.....	15
4.1. Próbadarabok	15
4.2. Lézersugaras felületedzés	16
4.3. Feszültségmérés.....	19
4.4. Fáziselemzés.....	23
4.5. Szövetvizsgálat	25
4.6. Keménységmérés.....	26
5. Eredmények.....	28
5.1. Feszültségmérés.....	28
5.2. Fáziselemzés.....	34
5.3. Szövetvizsgálat	35
5.4. Keménységmérés.....	41
6. Összefoglalás	47
7. További tervek.....	49
Köszönetnyilvánítás	50
Irodalomjegyzék	51

Bevezetés és célkitűzés

2013 nyarán szakmai gyakorlat keretében, a Campus Hungary ösztöndíj támogatásával hat hetet töltöttem a Hannoveri Lézerközpont (Laser Zentrum Hannover) Dr. Stefan Kaierle által vezetett Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik osztályán, ahol lézersugaras felületkezelési technológiával foglalkoztam. A szakmai gyakorlatról hazatérve a Miskolci Egyetem és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. közös kutatásában vettem részt.

Kutatómunkám célja a különböző paraméterekkel végzett lézersugaras felületi edzések okozta maradó feszültségállapotok vizsgálata acél mintadarabokban, továbbá a kialakult szövetszerkezet és keménységprofilok jellemzése. Edzés során a munkadarabban a fázisátalakulásból, a különböző fázisok eltérő hőtágulási együtthatójából és a munkadarabon belül kialakuló hőmérséklet különbségekből adódóan komplex feszültségállapotok alakulnak ki. Hagyományos edzés során a munkadarab (a hevítés során ausztenitesedett rész) hőelvonását hűtőközeg, míg lézersugaras edzés során a munkadarab hidegen maradt részének hőkapacitása biztosítja. Ez a különbség drasztikusan megváltoztathatja a munkadarabban a hőkezelés végén kialakuló feszültségállapotokat.

Jelen munkában C45-ös minőségű, melegen hengerelt acél felületén 5 kW teljesítményű (cw: folytonos sugárzású) CO₂ lézersugárral felületi edzést hajtottunk végre különböző lézersugár teljesítmény, előtolási sebesség és munkadarab abszorpció bevonati réteg alkalmazása mellett. A lézersugaras felületi edzéseket a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Anyagtudományi és Technológiai Intézetének Lézer technológiai Osztályán végeztük. A kezelt próbák vizsgálatait a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karának Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetén belül üzemelő Komplex Képelemző és Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban (LISA) végeztük.

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. Folytonos üzemmódról akkor beszélünk, ha a sugárzás időtartama nagyobb, mint 0,25 másodperc. Ha ennél rövidebb impulzus, vagy impulzusok sorozata alatt adja le a lézer az energiát, akkor impulzusüzemű lézerről van szó.

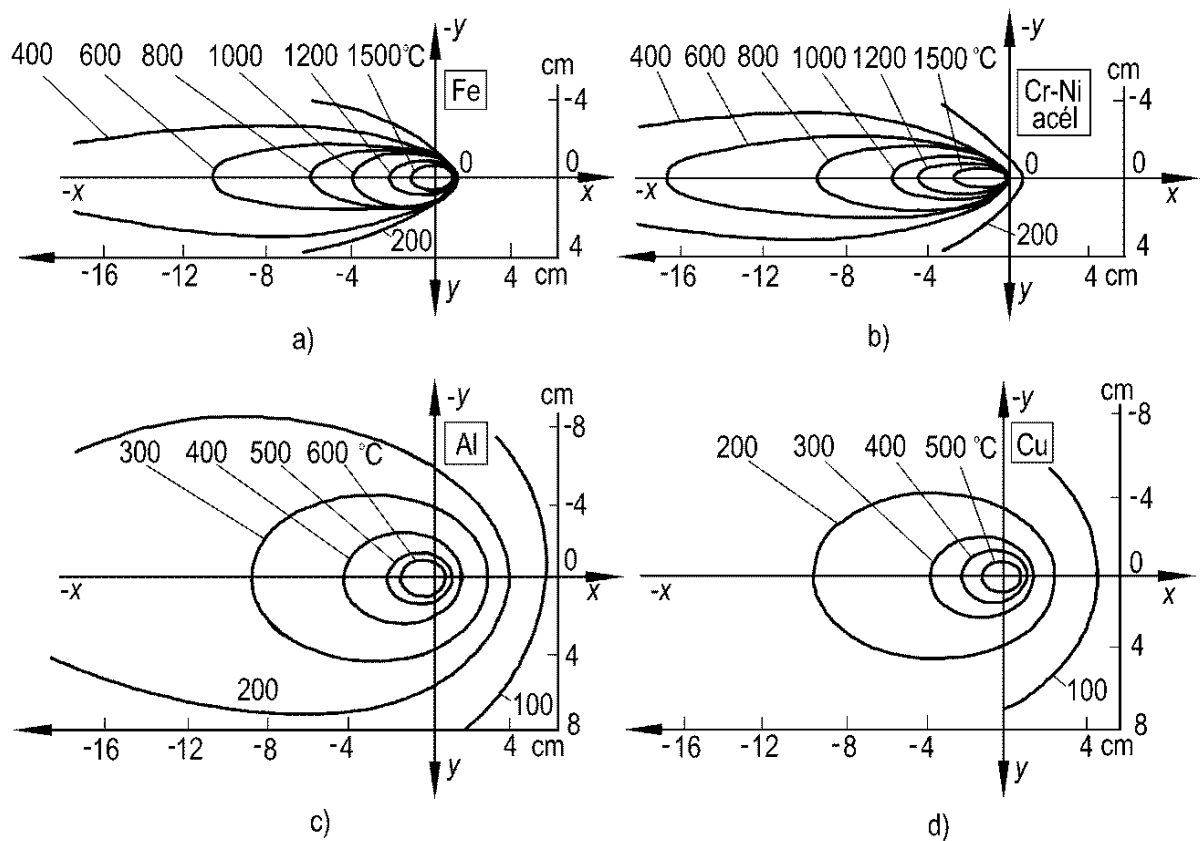
Lézersugár segítségével az anyagok sok fajtáját meg lehet munkálni: fémeket, műanyagot, kerámiát, üveget, fát és kompozitokat is. Az elvégezhető technológiák anyagtípustól függőek, de lehetséges megmunkálások lehetnek a vágás, fúrás, hegesztés, forrasztás, szinterelés, feliratozás és edzés [1].

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 ausztenitisedés. Ezután a hűtés sebességének elég nagynek 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 anyagréssz hővezetéssel ne melegítse túlságosan a többi anyagrészt. Ugyanakkor elegendő idő kell ahhoz is, hogy megfelelő mélységben játszódjon le az α - γ fázisátalakulás.

A nagy intenzitású energiaközlés következtében nagy hőmérséklet gradiensek alakulnak ki az anyagban. A gradiens nagyságát befolyásolják a lézersugár jellemzői (teljesítmény, teljesítménysűrűség, intenzitáseloszlás, hullámhosszúság) és a munkadarab jellemzői (abszorpció, hővezető képesség, hőkapacitás, geometriai jellemzők). Legjelentősebb hatással a hővezető képesség és a teljesítménysűrűség bírnak, amelyek ráadásul egymás ellen hatnak. A nagyobb teljesítménysűrűség és a kisebb hővezető képesség a termikus gradiens növekedését okozza. Az 1. ábra azt mutatja, hogy négy különböző anyagban milyen hőmérséklet-eloszlás alakul ki, amennyiben a hőbevitel többi paramétere változatlan. A kör keresztmetszetű lézersugár x irányban halad [2].

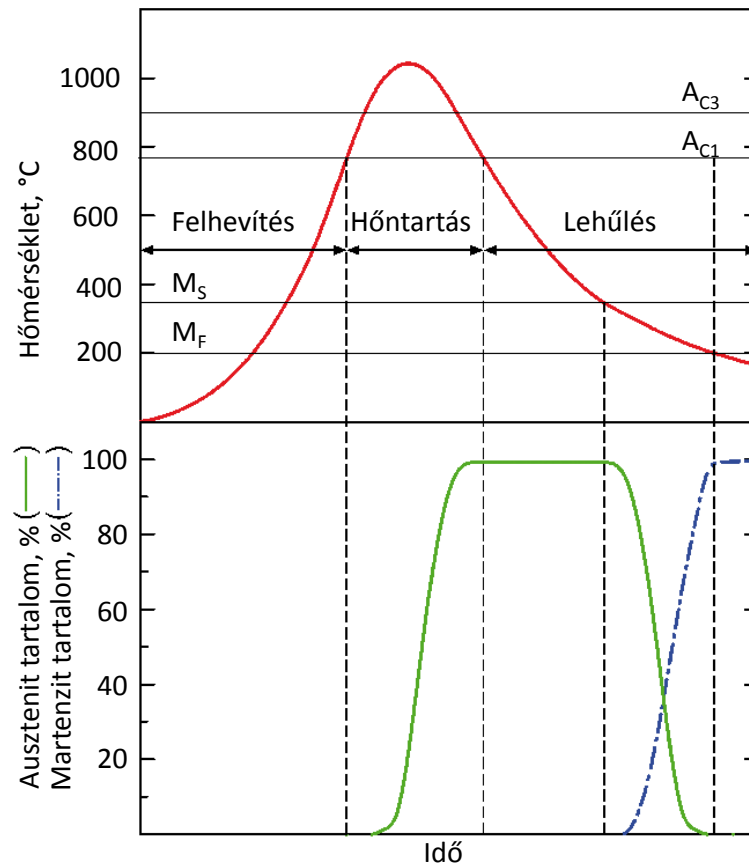


1. ábra: Azonos hőbevitel esetén kialakuló hőmérséklet-eloszlás különböző anyagokban [2]

Az izotermák közti különbségek a különböző anyagjellemzőkből erednek. A réz abszorpciós képessége a legrosszabb, a hővezetése viszont a legjobb, ezért ott alakul ki a legkisebb hőmérséklet gradiens.

A lézersugaras edzésnél lényeges, hogy a lézersugár mekkora területet képes ausztenitesíteni, illetve, hogy a továbbhaladás után a térfogat mennyi idő alatt hűl M_s , azaz a martenzites átalakulás kezdőhőmérsékletére. A 2. ábra megmutatja, hogy miközben egy kis térfogatrészen áthalad a lézersugár, hogyan változik az anyag hőmérséklete és a jelenlevő fázisok aránya.

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



2. ábra: Lézersugaras edzés során a hőmérséklet és a fázisok arányának változása [2]

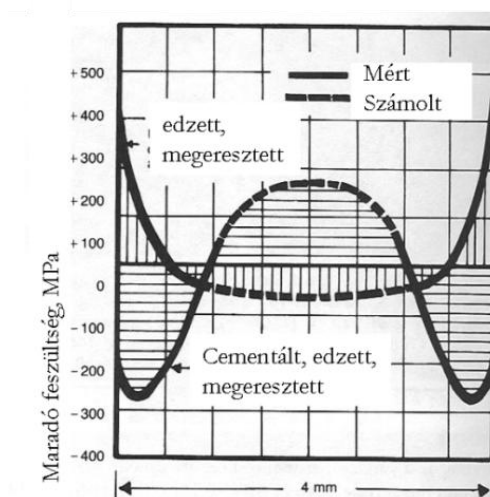
A lézersugaras edzés előnyei:

- 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. Általában a hőkezelés okozta feszültségeknek két forrása van: a hevítés és lehűlés során a munkadarabban kialakuló hőmérsékletkülönbségekből származó feszültségek (termikus feszültségek), illetve a fázisátalakulásból származó feszültségek. A termikus feszültségek tehát a hőmérséklet gradiensekből származnak. A fázisátalakulásból származó feszültségek a mikroszerkezet változásából, azaz az ausztenit, bénit, martenzit képződéséből erednek. Az eredő feszültség ezeknek a vektoriális összege. A hőkezelés különböző lépéseiben ezeknek a komponenseknek a hatása a teljes feszültségre különböző. A munkadarabban kialakuló feszültségek szoros kapcsolatban vannak a repedésképződéssel.

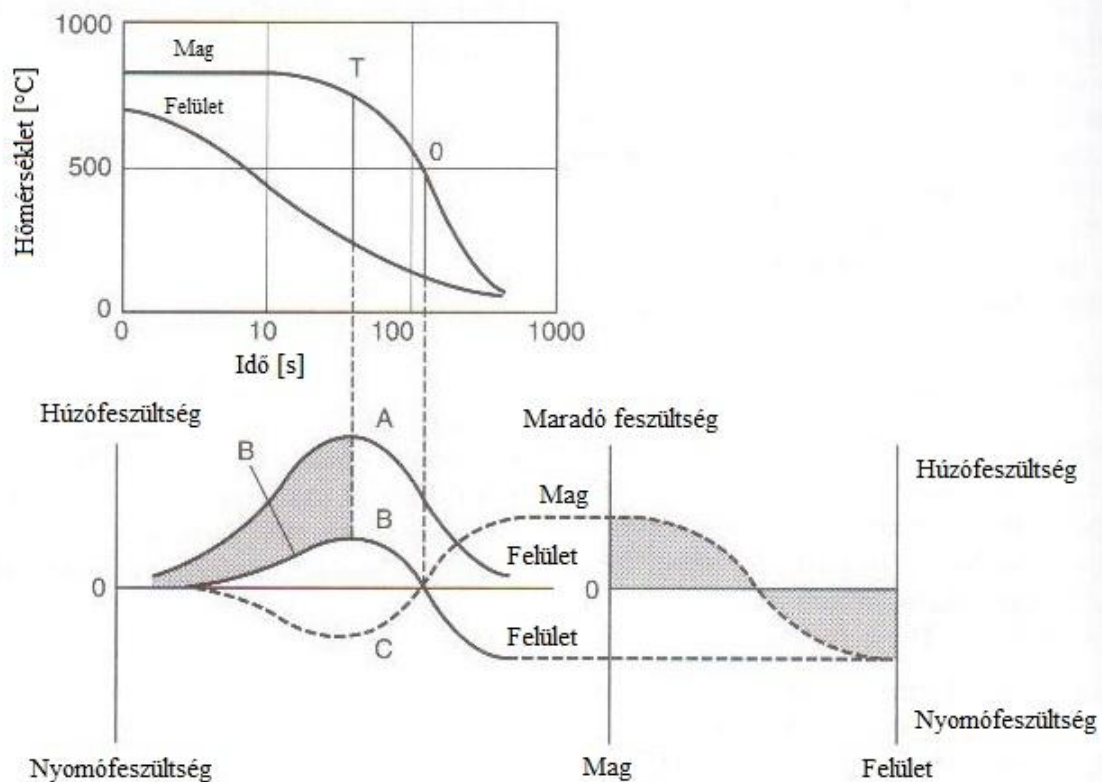
A hőkezelések típusa nagyon sokféle lehet, és ebből következik, hogy az ebből származó maradó feszültség is rendkívül változatos lehet. A 3. ábra hagyományos edzés és cementálás okozta maradó feszültség eloszlását mutatja.



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

Egy felhevített munkadarab hűlése során a felület és a mag között hőmérsékletkülönbség alakul ki, ami mechanikai feszültséget okoz az anyagban. A feszültségek alakulását a hűtés során szemlélteti a 4. ábra.

Hagyományos edzés során kezdetben a felület a környezet hatására gyorsabban hűl, mint a mag. Az eltérő sebességű hűlés miatt a felület jobban össze akar húzódní, mint a mag, ezért a felületen húzófeszültség (A és B görbe), a magban nyomófeszültség (C görbe) alakul ki. Az idő-hőmérséklet diagram T időpillanatában a legnagyobb a kettő közötti hőmérsékletkülönbség. Értelmszerűen ehhez az időponthoz tartozik a feszültség maximuma is. Ha a felületi rétegben a pillanatnyi feszültség eléri az adott hőmérsékletre jellemző folyáshatárt, (B görbe), akkor a feszültség egy része a folyással leépül, ezért a B görbe maximuma kisebb lesz, mint az A görbéé.



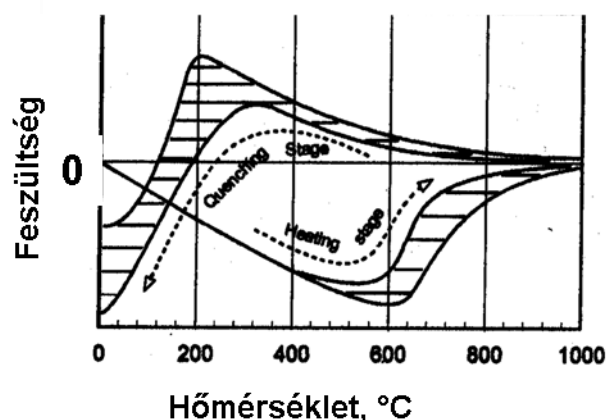
4. ábra: A pillanatnyi feszültség változása lehűlés során egy acél mintadarabban (A: felületi feszültségeloszlás csak rugalmas alakváltozás esetén, B, C: a mag ill. a felület feszültségeloszlása rugalmas és képlékeny alakváltozás esetén), illetve a maradó feszültség eloszlás (jobb oldal)[4]

A T időpillanat után a mag és a felület közötti hőmérséklet gradiens nagyobb lesz, mint a felület és a környezet közötti. Emiatt ettől a pillanattól kezdve a mag hűlése gyorsabb lesz, mint a felületé. Ennek eredményeként csökken a felület és a mag közötti hőmérsékletkülönbség, ezáltal csökken a fellépő feszültség is. Ha csak a rugalmas alakváltozást vesszük figyelembe (A görbe), akkor a feszültség értéke akkor válik nullává,

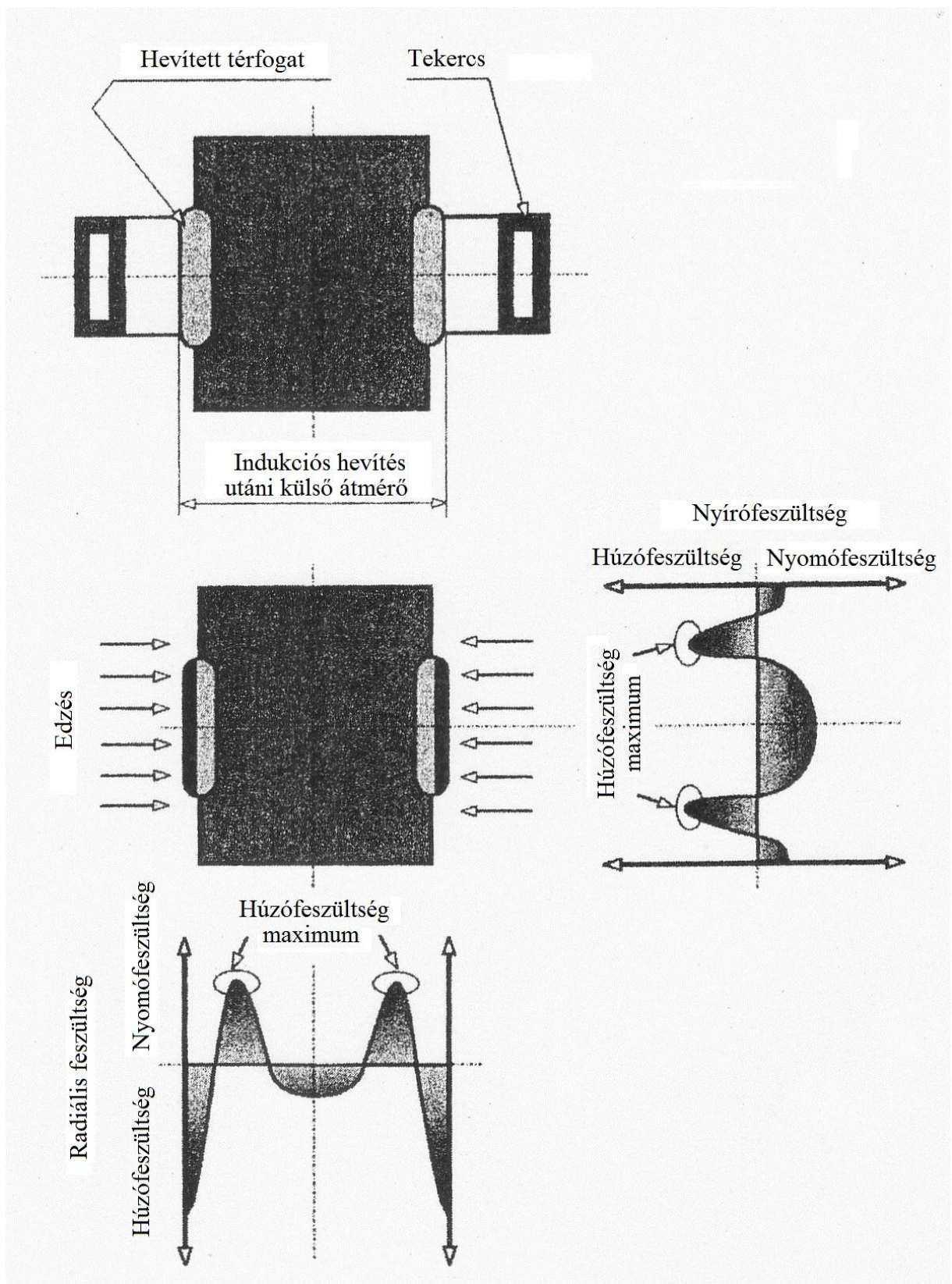
amikor a hőmérsékletkülönbség is zérus lesz. Ha képlékeny alakváltozás is lezajlik, akkor ennél korábban, az O időpillanatban válik nullává a felületben és a magban fellépő feszültség. Ezután a mag még mindig gyorsabban hűl, mint a felület, ezáltal jobban zsugorodik, így ott húzófeszültséget, a felületben pedig ez a hatás nyomófeszültséget ébreszt. A felület és a mag között végül kialakuló feszültségeloszlás az ábra jobb oldalán látható.

Indukciós hevítés során a lézersugaras edzéshez hasonlóan, csak egy bizonyos felületi rétegen végzünk hőkezelést, a darab közepe nem alakul át. Az indukciós hőkezelés okozta feszültségeket három csoportra bonthatjuk: kezdeti, átmeneti és maradó feszültségek. A kezdeti feszültség értéke és eloszlása a hőkezelést megelőző műveletek eredménye. Az átmeneti feszültségek a hevítés és hűtés során lépnek fel, a hőkezelés módjától függően. Ezek kezelés után részben, vagy teljesen leépülhetnek. A maradó feszültségek a kezdeti és az átmeneti feszültségek eredményei.

Az 5. ábra és a 6. ábra mutatják az indukciós hevítés okozta maradó feszültségek eloszlását egy hengeres próbatest esetén. A hevítési szakasz elején a tekercs alatt elhelyezkedő térfogat ki akar tágulni. Ekkor a munkadarab hőmérséklete viszonylag alacsony (500°C alatti). Ebben a szakaszban a karbonacélok csak rugalmas alakváltozásra képesek, nem tudnak könnyen tágulni, ez feszültséget ébreszt a darabban. A hőmérséklet emelése során az így kialakuló nyomófeszültség növekedni fog a felületen. 520°C és 750°C között az acélok képlékeny alakváltozással kísért térfogat növekedésen mennek keresztül (folyás jelensége), ezért a feszültség elkezd leépülni. Amikor a hőmérséklet eléri a 850°C -t, akkor az acél felülete szabadon tágul és az áthevült átmérő nagyobb, mint a kezdeti átmérő. A folyáshatár a felületi rétegben lecsökken a magas hőmérséklet miatt, ezért az acél képlékenyen alakváltozik [5].



5. ábra: Indukciós edzés során a maradó feszültség változása a próba felületén (heating - fűtés, quenching - edzés) [5]



6. ábra: Indukciós edzés okozta maradó feszültség eloszlása [5]

Miután a hűtőfolyadékot ráfűjják a felhevült felületre, a külső réteg elveszíti a melegalakíthatóságát (hőmérséklet lecsökken, folyáshatár megnő), és a zsugorodás miatt a hőmérséklet csökkenésével erős húzófeszültség lép fel a darab felületén. A feszültség maximuma éppen az M_s hőmérséklet felett alakul ki. A martenzit megjelenése csökkenti a felületi húzófeszültséget, és végül maradó nyomófeszültséget eredményez. Amikor a teljes darab lehül, a nyomó- és húzófeszültségek komplex kombinációja alakul ki.

Hőkezelésnél a maradó feszültségek a munkadarabon belül egyensúlyban vannak. Ha bizonyos térfogatokban maradó nyomófeszültség van, akkor más térfogatokban húzófeszültségnek kell lennie. A felületen kialakuló nyomófeszültség általában hasznos, mivel a repedésterjedéssel szembeni ellenállást megnöveli, továbbá hajlító és csavaró igénybevételek esetén az alkatrész élettartamát megnöveli.

Fontos kiemelni, hogy a húzófeszültség maximuma az átedződött felület alatt helyezkedik el. Ez a húzófeszültség felelős az edzési repedés keletkezésért [5].

A fejezetben említett folyamatokból látható, hogy a hőkezelések során kialakuló feszültségállapotnak mennyi befolyásoló tényezője van, ami 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 a rugalmassági modulus [6].

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

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 [6]:

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

ahol

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

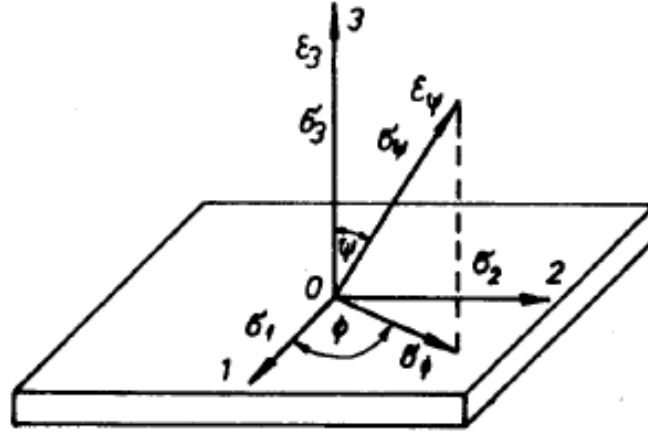
ν : a Poisson tényező

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 (rácscsíkok) közötti távolságok megváltoznak. Az atomsík-távolságok változása arányos a rugalmas deformációval, továbbá a maradó feszültséggel [6, 7].

Ha egy test sík felületét vesszük (7. ábra), akkor az arra merőleges feszültségkomponens zérus, azaz ebben az esetben $\sigma_3 = 0$. A felületen tehát síkfeszültségi állapot létezhet. Ilyen esetben a maradó feszültség a felület síkjában bármilyen irányú lehet (σ_Φ).



7. ábra: Egy felület síkjában lévő Φ irányban ható feszültség meghatározása [6]

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 [6].

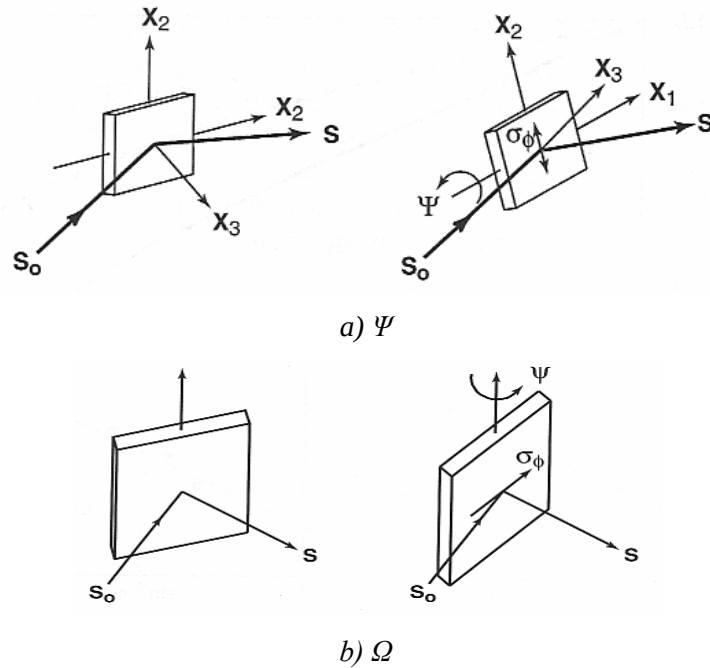
A Φ irányra merőleges rácssík-távolságok mérésével a Φ irányú ϵ_Φ deformáció mérésével a keresett Φ irányú σ_Φ feszültség közvetlenül mérhető lenne. Ez a rácssík-távolság röntgendiffrakciós módszerrel közvetlenül azonban nem mérhető, mert ilyen irányú mérésnél a sugárzás elnyelődne az anyagban. A probléma 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 8. ábra mutatja a két módszer vázlatos rajzát, ahol: S_0 a röntgencsőből 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 [6, 8, 9].



8. ábra: A darab felszínével párhuzamosan, tetszőleges irányban ható maradó feszültség meghatározására használható két alpmódszer vázlatos rajza [6, 7, 9]

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 [6, 10].

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 a 9. 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.



9. 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 (10. ábra).



10. 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 teljesítményekkel hoztuk létre az edzett sávokat. A lézersugaras felületedzés paraméterei az alábbiak voltak:

- kétféle felületi abszorbeáló réteg
 - grafitpor
 - TiO₂ emulzió
- két előtolási sebesség
 - 300 mm/perc
 - 400 mm/perc

- négyféle lézerteljesítmény
 - 70%
 - 80%
 - 90%
 - 100%

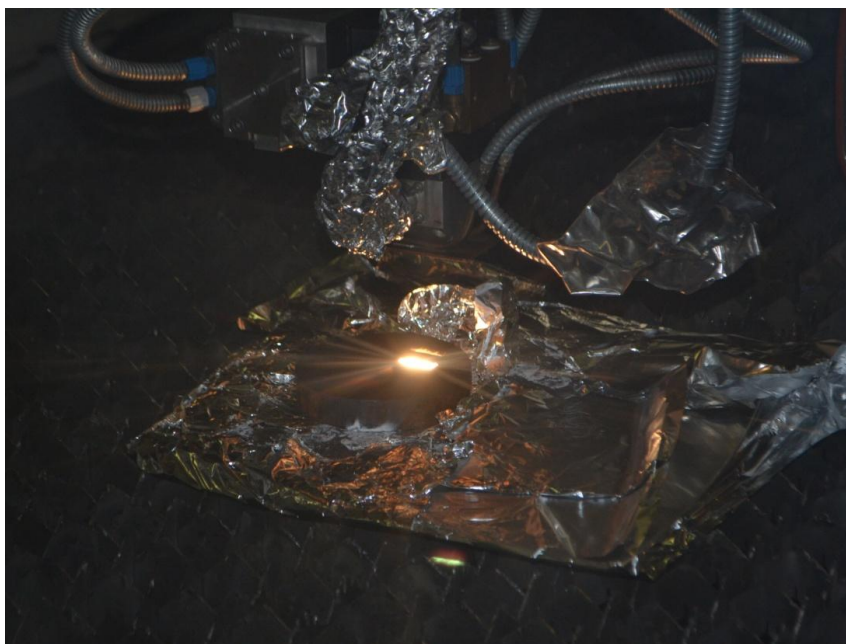
A különböző paraméterekkel végzett lézersugaras edzések után összesen 16, különböző paraméter kombinációval kezelt edzett sávot kaptunk (kétféle felületi abszorbeáló réteg x két előtolási sebesség x négyféle lézersugár teljesítmény). A TiO_2 emulzióval bevont próbák vizsgálata még folyamatban van, ezért ez 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.

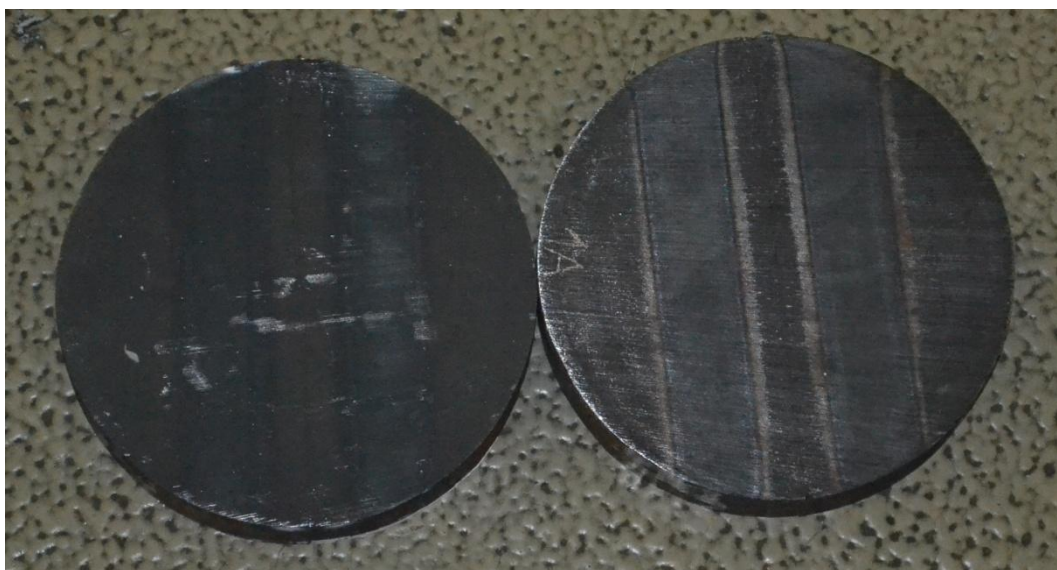
Az abszorbens felvitele után a lézerfej alá helyeztük a mintát. A célzólézer segítségével a létrehozni kívánt edzett sáv szélességét ellenőriztük, 20 mm-re állítottuk be. A minták középvonalától 10 mm-re, így egymástól 20 mm-re hoztunk létre minden felületen két edzett sávot a kétféle előtolási sebességgel.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

A nagyobb lézerteljesítmények 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 11. ábra, a kezelt mintákat pedig a 12. ábra. A folyamat után vízzel tisztítottuk meg a darabok felületét.



11. ábra: A lézersugaras felületedzés



12. 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 Fémteni, 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 (13. 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, így valós feszültségértékeket mérhetünk.

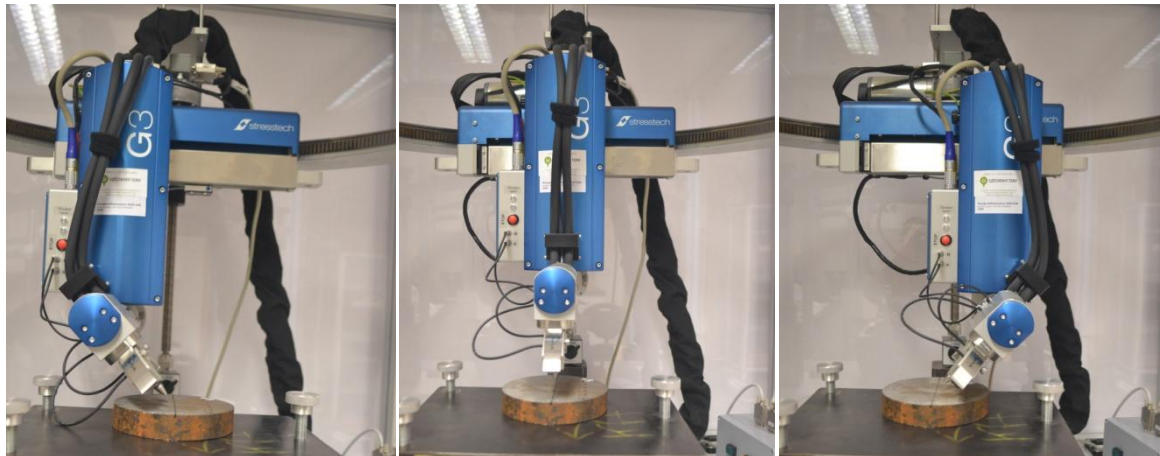


13. ábra: Stresstech XStress 3000 G3R típusú központ nélküli röntgendiffraktométer

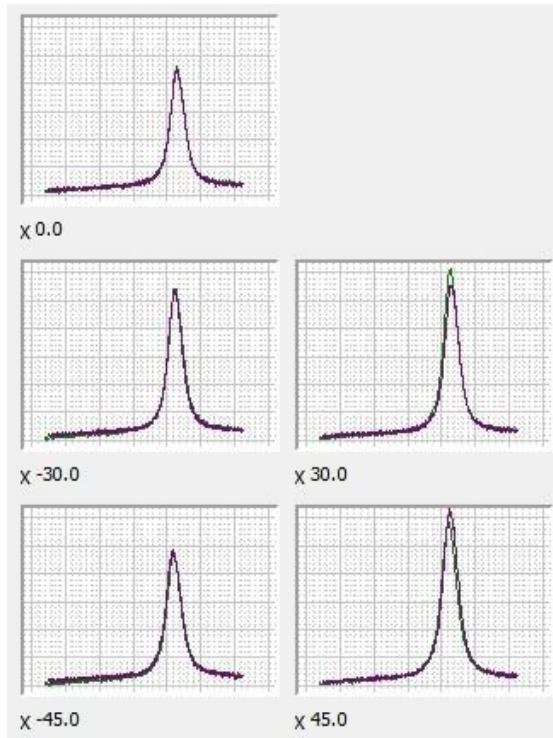
Méréseinkhez az 50 mm-es detektortartó ívet és az 1 mm átmérőjű kollimátort választottuk. A berendezés vonaldetektorainak helyzete egy ív mentén kézzel beállítható és rögzíthető. A detektorok helyzetét a ferrit {211} reflexiójának szögértékéhez, kb. 156°-hoz állítottuk be. Mérés előtt a berendezést a 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 (14. 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 (15. ábra).

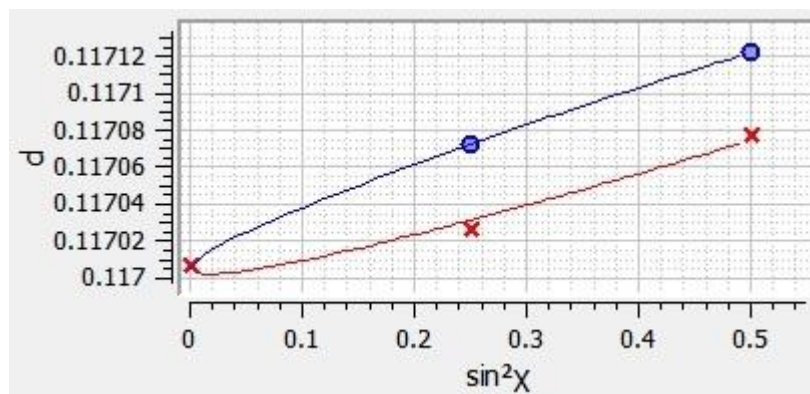


14. ábra: A röntgendiffrakciós berendezés három döntési pozícióban ($\Psi = -45^\circ$, 0° ill. 45°)



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

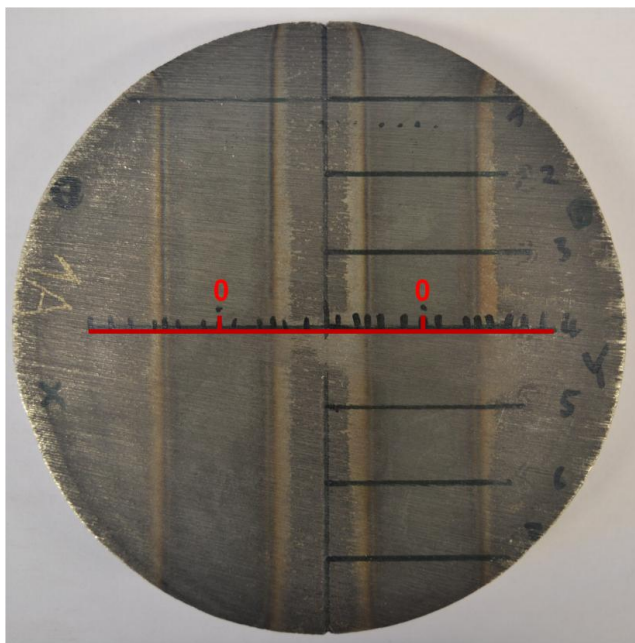
Az EN 15305 “Non-destructive testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction” szabvány szerint az adatgyűjtési időt úgy kell megválasztani, hogy a reflexiók detektált intenzitása minimum 60 cps legyen. Ennél kisebb érték esetén a jel/zaj arány túl kicsi lenne. Méréseink során a 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) rácstávolságokat (16. ábra). A pontokra görbét illeszt, amely görbe középvonalának meredeksége a normálfeszültséggel, szétnyílása pedig a csúsztatófeszültséggel arányos.



16. 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 (9. ábra). Minden mérési ponton a fűrészelés irányával párhuzamos és arra merőleges irányú maradó feszültséget is lemertük. A kiinduló feszültségállapot mérései során 3 mm átmérőjű kollimátort és 5 másodperces gyűjtési időt használtunk.

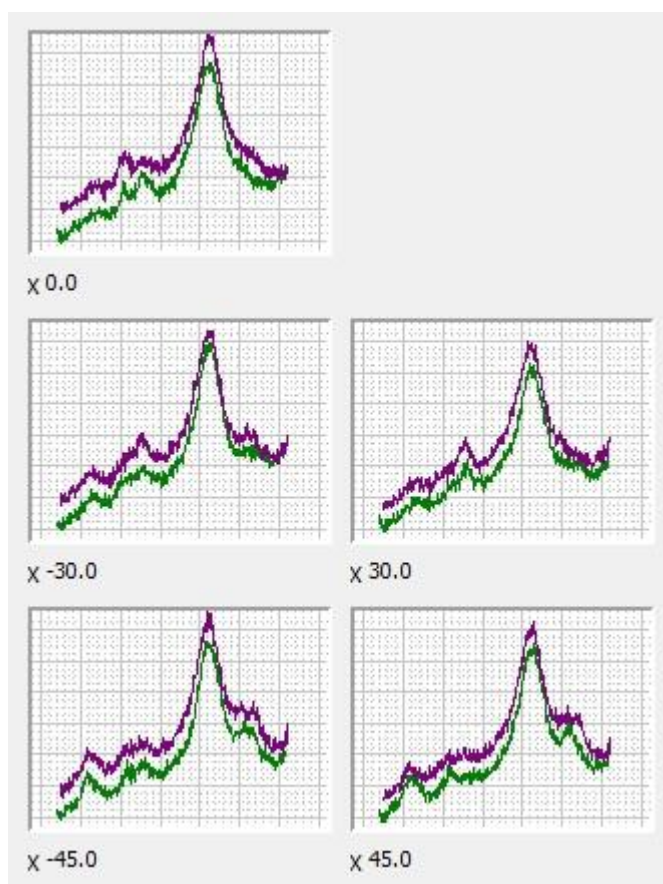
Lézersugaras edzés után az edzett sávok hossztengetyére merőleges vonal mentén választottuk meg a mérési pontokat. Ezt a vonalat mutatja pirossal megjelölve a 17. ábra. A vonal a minta középvonalán fekszik, a felületedzés előtti mérés 4-es pont magasságánál. A sávok közepét választottuk „0” pontnak, 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.



17. ábra: Lézeredzés utáni mérések helyzete

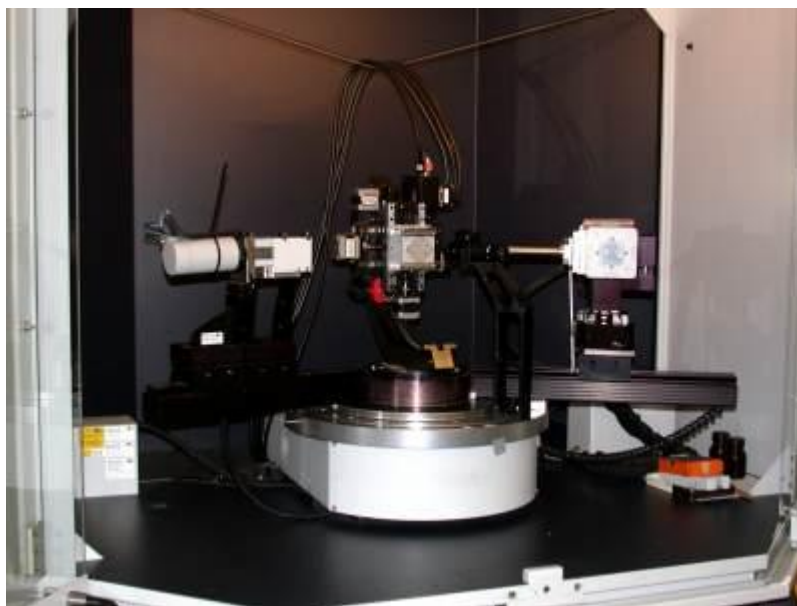
4.4. Fáziselemzés

A feszültségmérés során az edződött részen a ferrit (martenzit) {211} reflexiójának közelében egyes minták esetében más reflexiók is jelentkeztek (18. ábra). A zavaró csúcsokat a 100%-os lézersugár teljesítmény (5 kW), mindkét előtolási sebesség esetén és a 90%-os teljesítmény, 300 mm/perc előtolási sebesség esetén tapasztaltuk, vagyis a legnagyobb energiabecsatolással járó lézersugaras kezelések esetében.

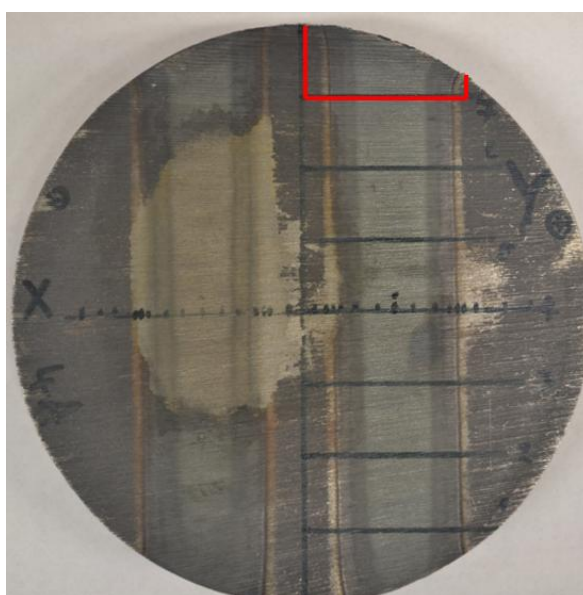


18. ábra: Egyes minták esetében jelentkező zavaró reflexiók

A felületen lévő fázisok vizsgálatára egy Co röntgencsővel és Euler bölcsővel felszerelt Bruker D8 Advance típusú röntgendiffraktométert (19. ábra) 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 20. ábra. A vizsgált felület párhuzamos a tárcsa felületével. A mérést elvégeztük alapállapotban, majd a felület polírozása után is.



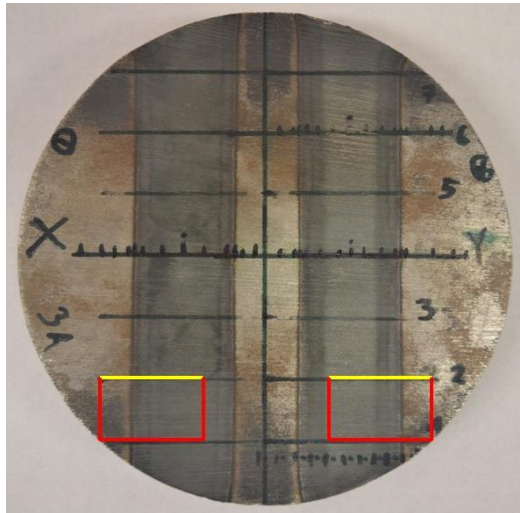
19. ábra: Euler bölcsovel felszerelt Bruker D8 Advance röntgendiffraktométer



20. 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 21. ábra. A minták belső széle az edzett sáv középpontjától 5 mm-re volt. A vizsgált felület sárga színnel van megjelölve.

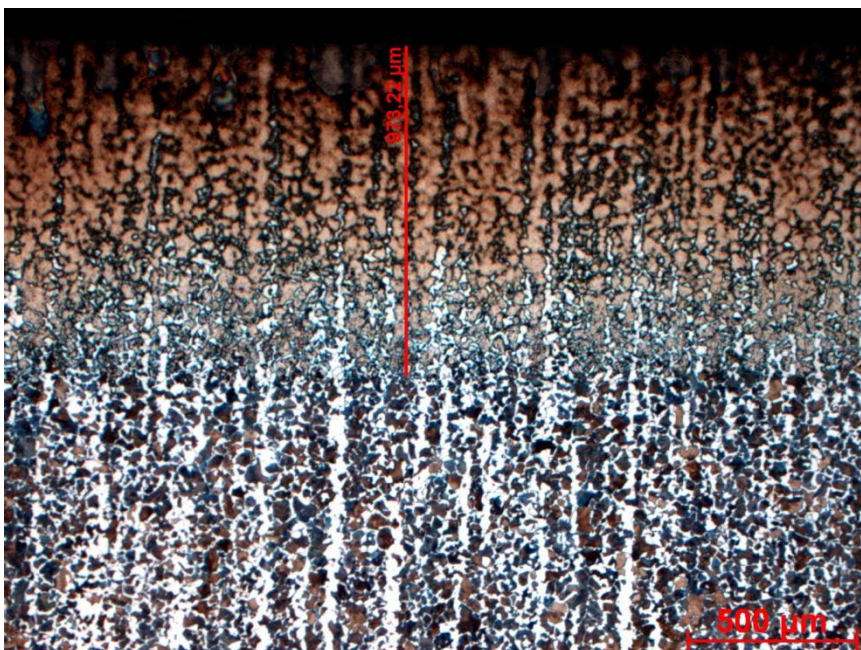


21. ábra: A hengeres próbákból vett metallográfiai minták helyzete

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.

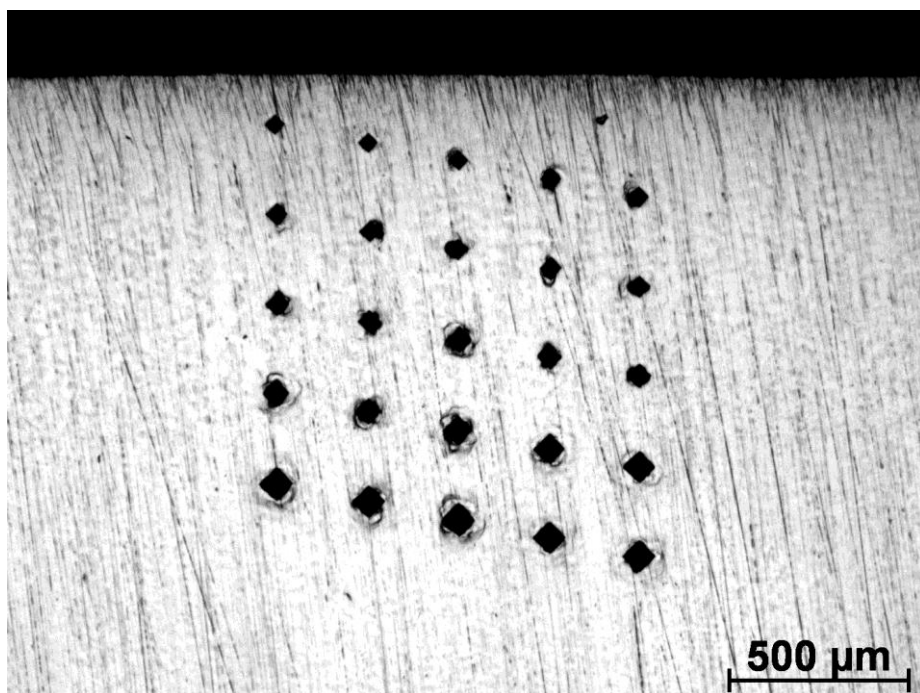
A fénymikroszkópos felvételek készítéséhez is használt AxioVison 4.8 szoftverrel lemértem a beedződött legnagyobb mélységet. A mérést a legkisebb méret esetében a 200x nagyítású felvételen, a többi esetben az 50x nagyítású felvételeken végeztem, a szöveti jellemzők alapján. Egy mérést mutat a 22. ábra.



22. 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 (23. 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.

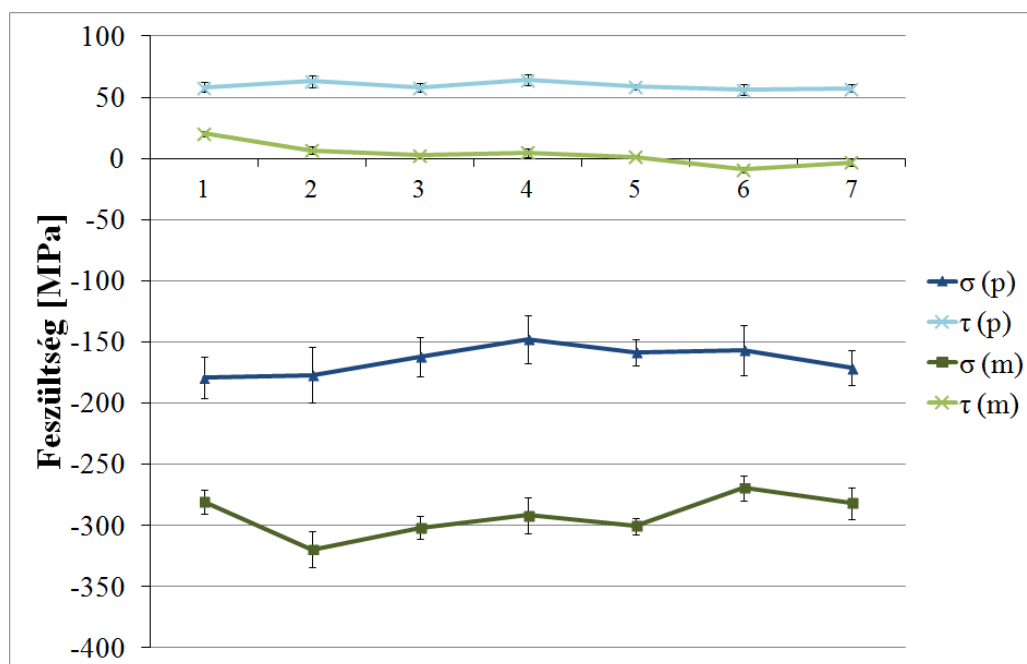


23. ábra: A keménységmérési nyomok pozíciója

5. Eredmények

5.1. Feszültségmérés

A lézersugaras kezelés előtti feszültségállapotot mutatja a 24. 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.

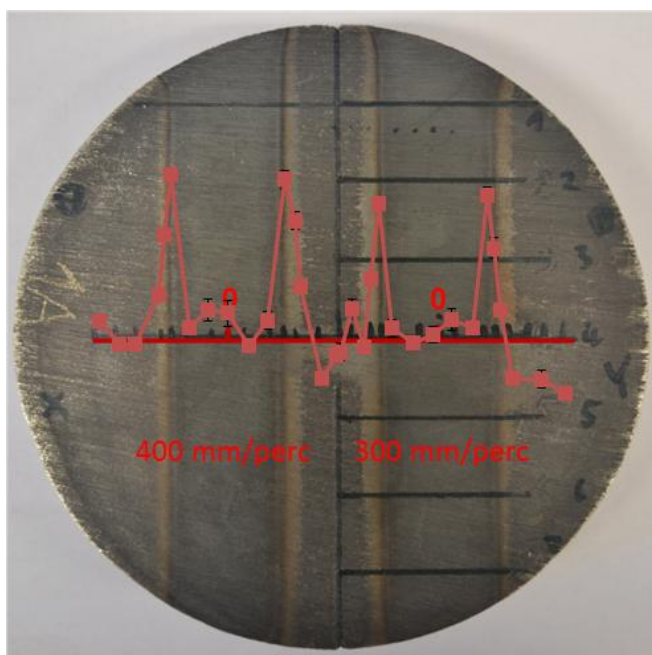


24. ábra: Lézersugaras edzés előtti feszültségállapot jellemző eloszlása

(σ : normálfeszültség, τ : csúsztatófeszültség, p =fűrészelés irányával párhuzamosan, m =fűrészelés irányával merőlegesen, 1-7 pontok: tárcsa felületén 9. ábra szerint jelölt pontok)

A lézersugaras edzések okozta maradó feszültség diagramok értelmezését a 25. ábra mutatja. Ennek az ábrának megfelelően a 26. ábra és a 27. ábra FP irányban, a 28. ábra és a

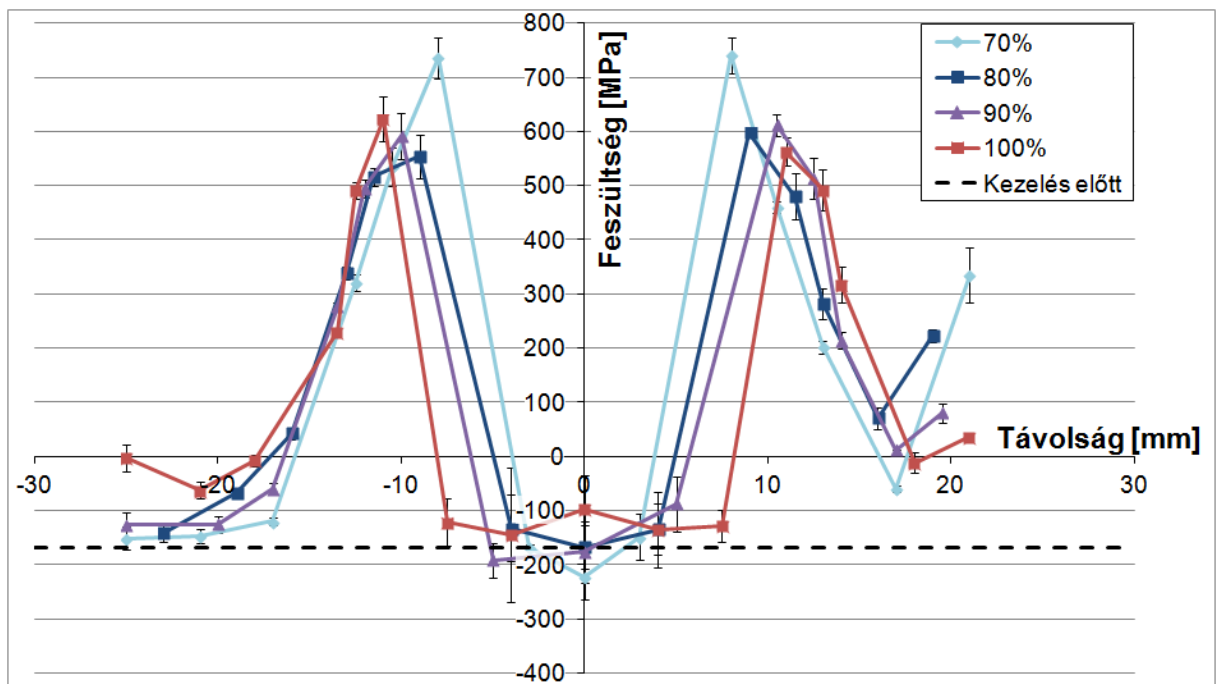
29. ábra FM irányban mutatja a mért feszültségeket, az edzett sáv szélességének függvényében ábrázolva.



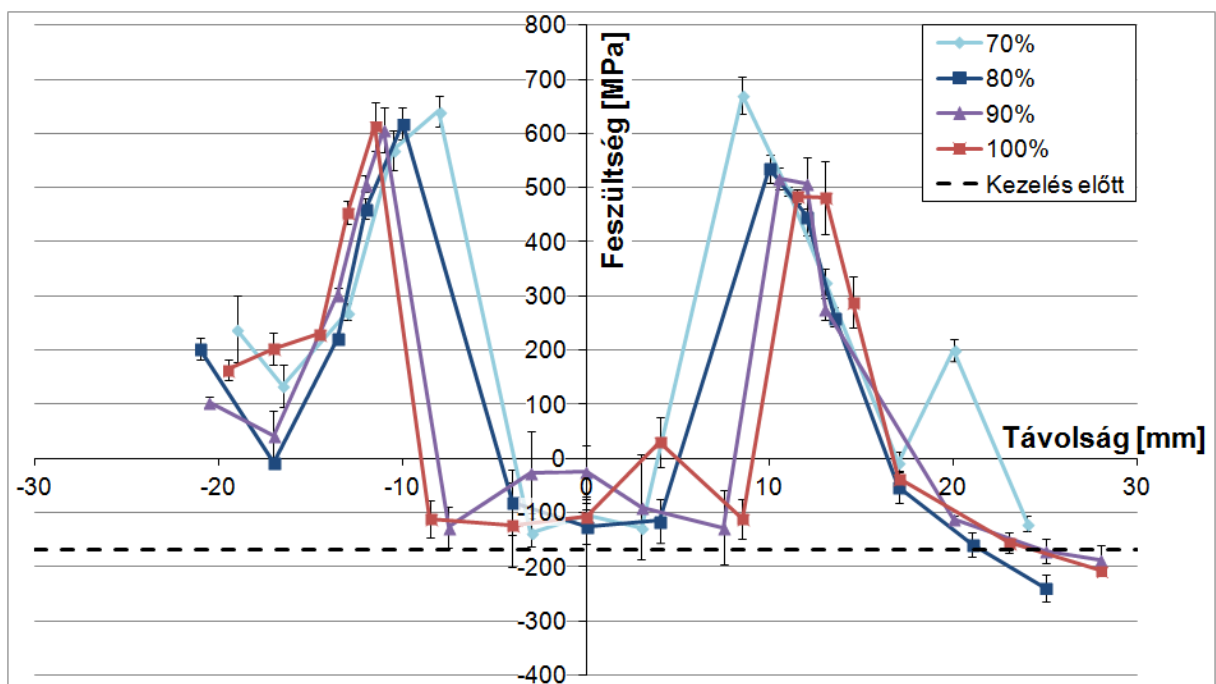
25. ábra: A lézersugaras edzés okozta feszültség-eloszlások

A normál feszültségek eloszlása a sávok közepétől (0 mérési pont) kiindulva mindkét irányban (jobbra és balra) mérve hasonló. A sáv közepénél mért kis (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 az edzési kísérletet kivéve, a teljesítménnyel és az előtolás sebességével jelentős változást nem tapasztaltunk. FM irányban a maximum értéke kisebb, gyorsabb előtolásnál közel 500 MPa, lassabb esetén kb. 400 MPa (29. 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 kiugróan nagy normál feszültség mérhető.

A csúsztatófeszültség FP irányban mindkét előtolási sebességnél hasonló lefutást eredményez (27. 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 feszültségértékére. FM irányban a kiinduló állapothoz hasonló értékeket tapasztaltunk (29. ábra). Néhány kiugró értéken kívül a 0 MPa körül mozog a ± 10 MPa közötti sávban.

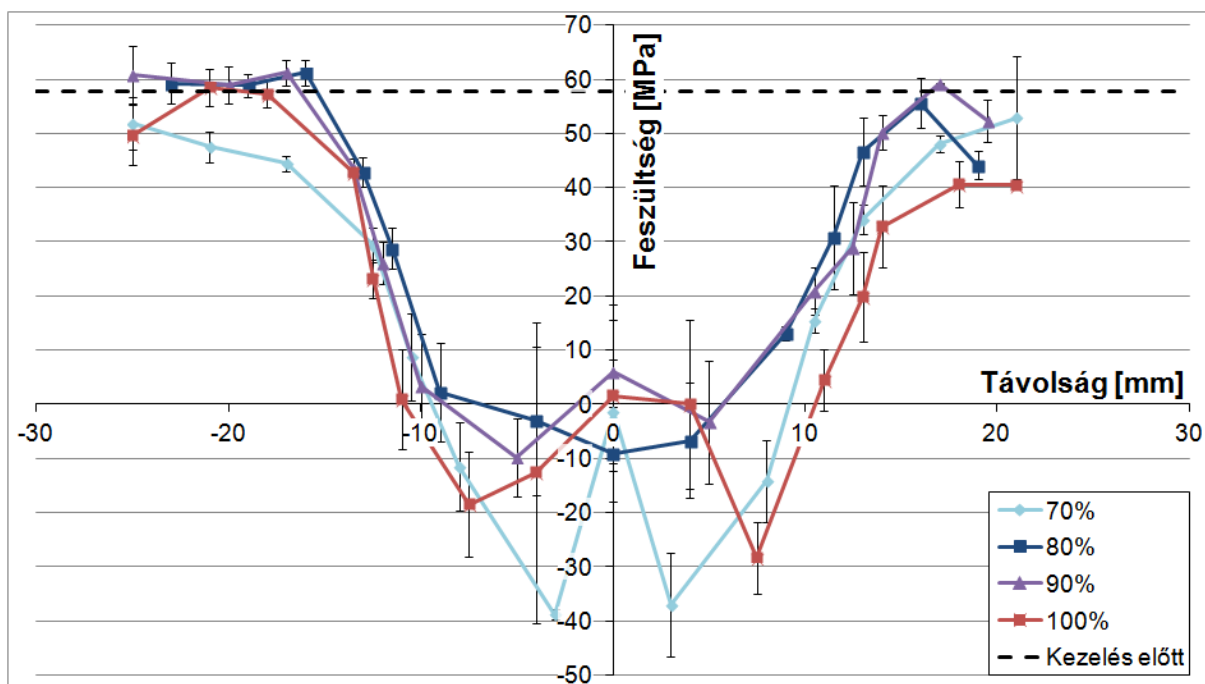


a) 400 mm/perc előtolás

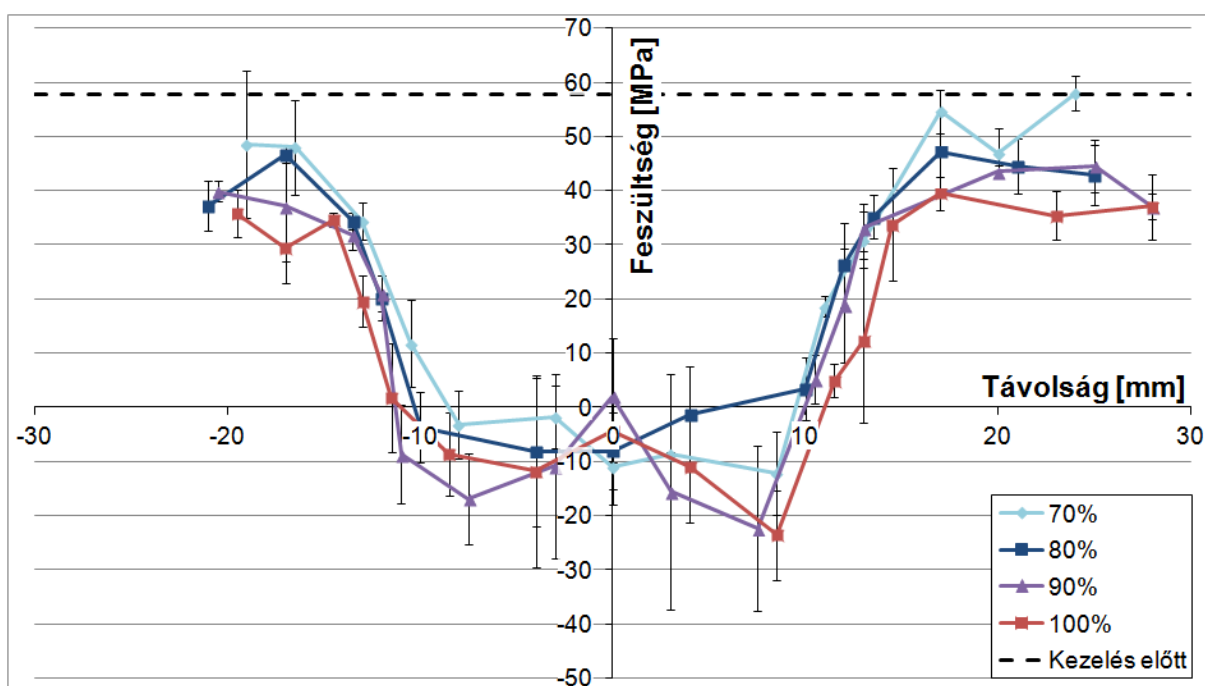


b) 300 mm/perc előtolás

26. ábra: Lézersugaras edzés utáni normál feszültség (σ) a fűrészelés irányával párhuzamosan (az előtolás irányára merőlegesen)

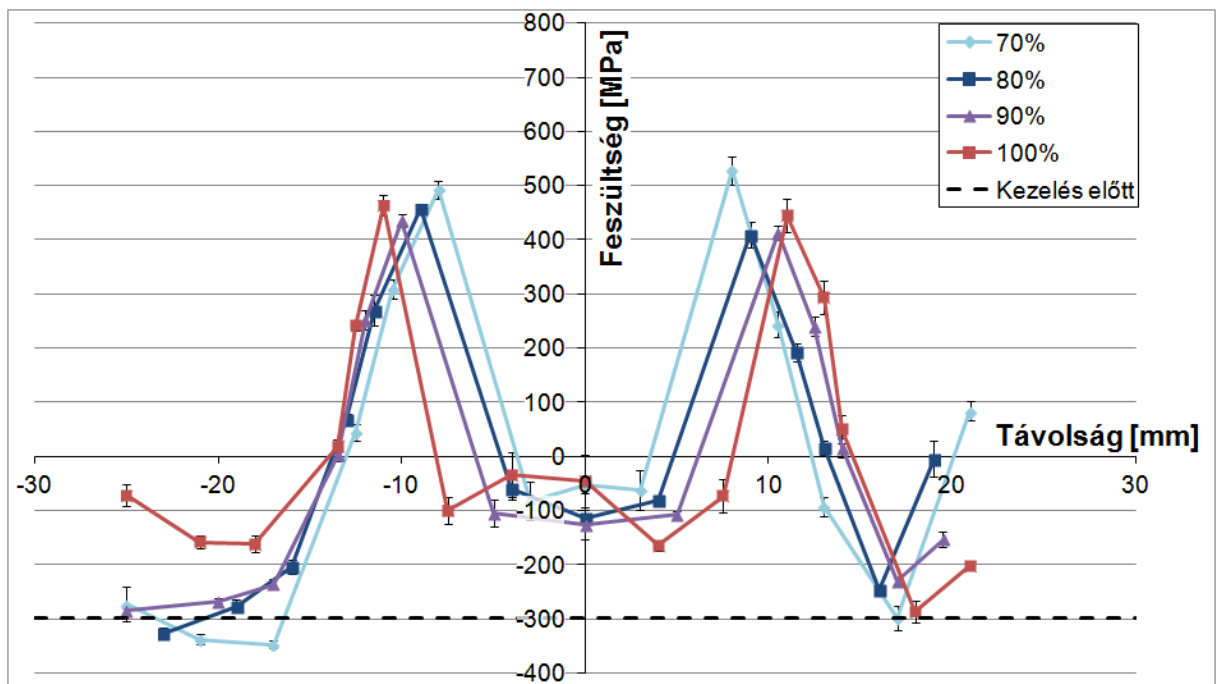


a) 400 mm/perc előtolás

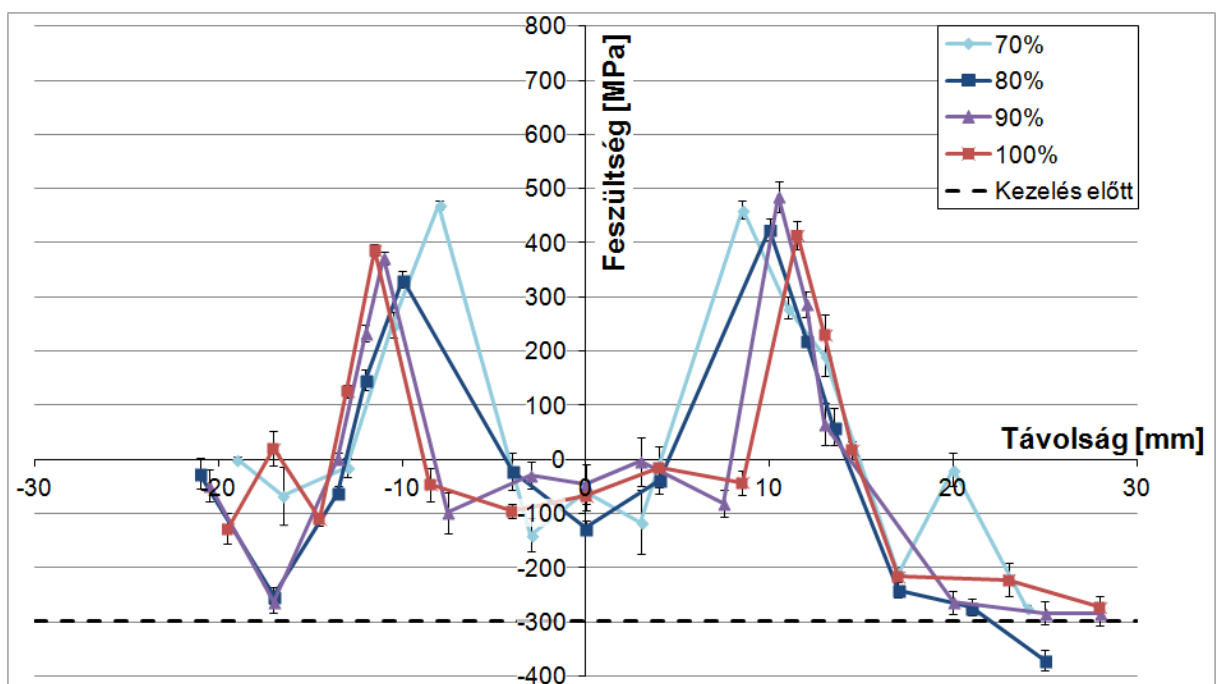


b) 300 mm/perc előtolás

27. ábra: Lézersugaras edzés utáni csúsztatófeszültség (τ) a fűrészelés irányával párhuzamosan (az előtolás irányára merőlegesen)

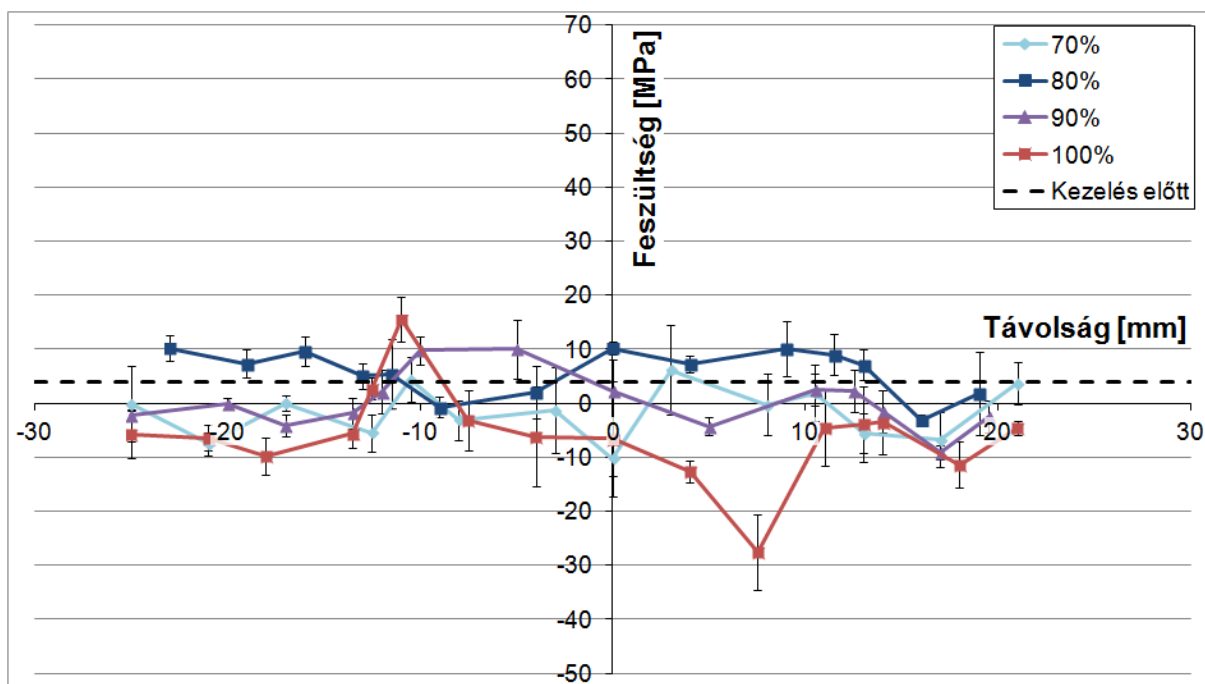


a) 400 mm/perc előtolás

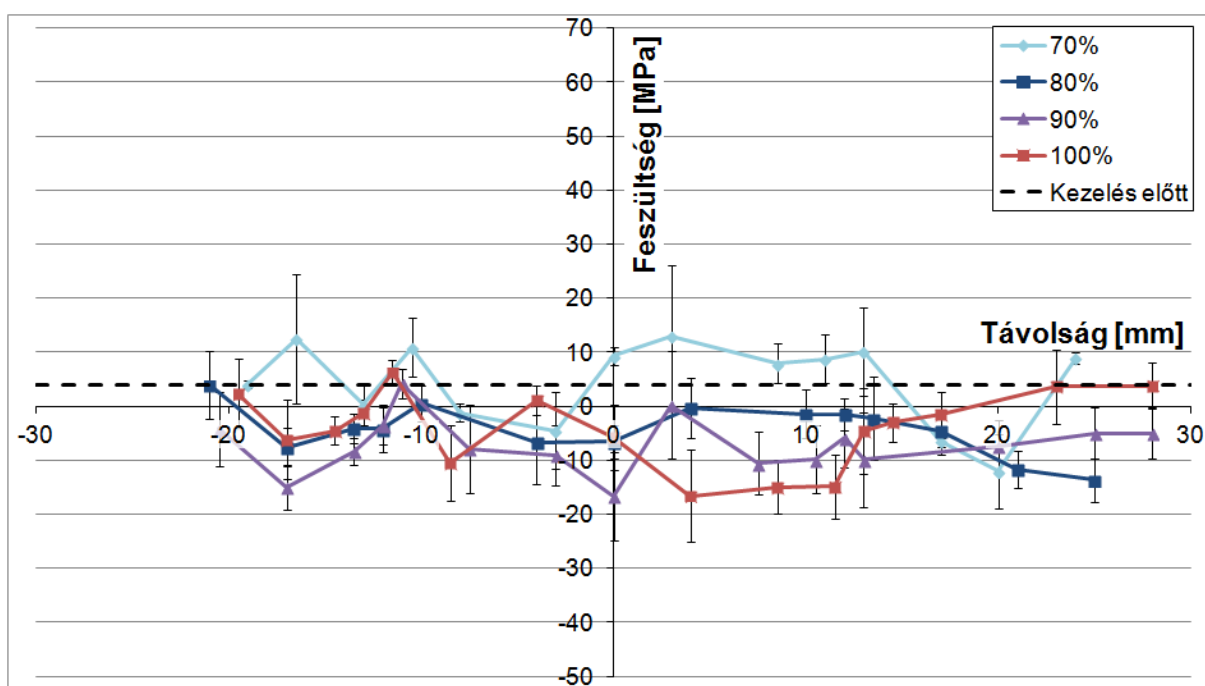


b) 300 mm/perc előtolás

28. ábra: Lézersugaras edzés utáni normálfeszültség (σ) a fűrészelés irányával merőlegesen (az előtolás irányával párhuzamosan)



a) 400 mm/perc előtolás



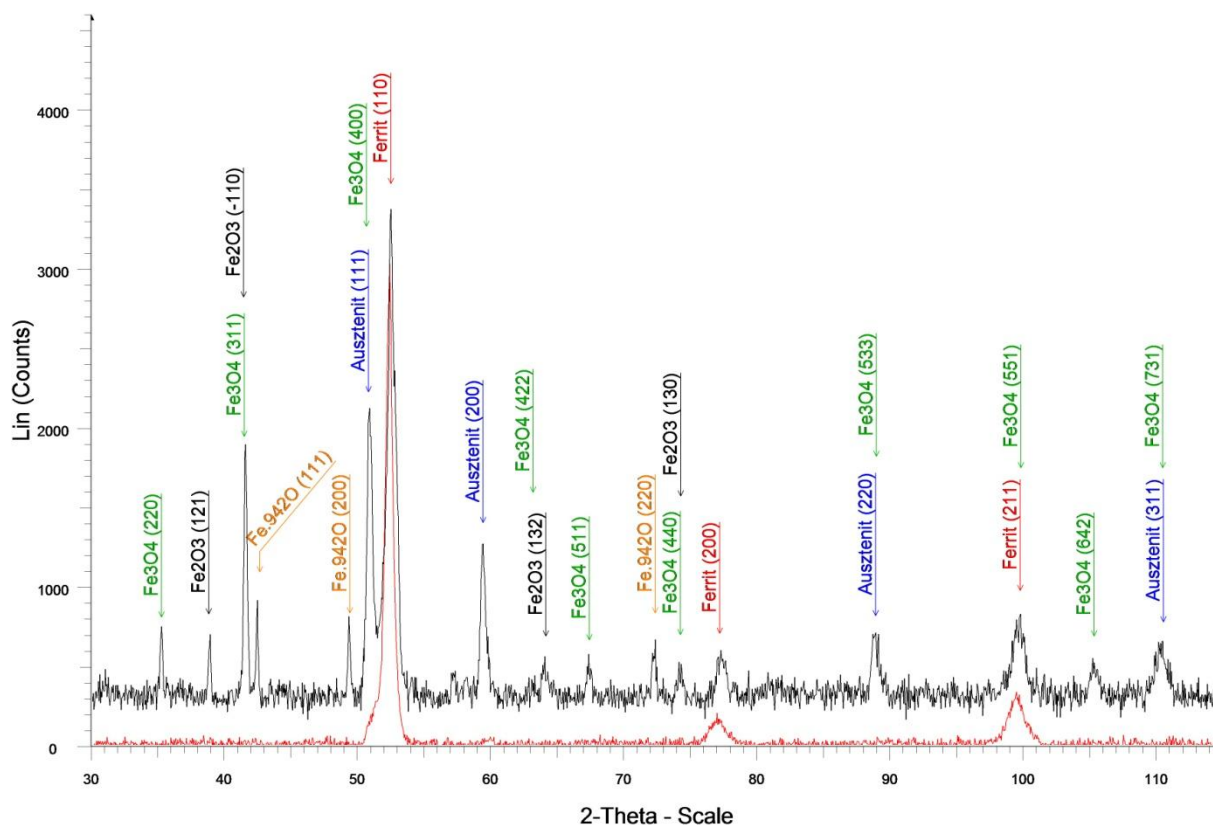
b) 300 mm/perc előtolás

29. ábra: Lézersugaras edzés utáni csúsztatófeszültség (τ) a fűrészelés irányával merőlegesen (az előtolás irányával párhuzamosan)

5.2. Fáziselemzés

A fáziselemzéshez felvett diffraktogramokat mutatja a 30. ábra. A polírozás előtt felvett diffraktogram (fekete) mindössze a láthatóság kedvéért van kissé eltolva a függőleges tengelyen.

Polírozás után csak a ferrit (martenzit) reflexiók jelentkeztek. 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.

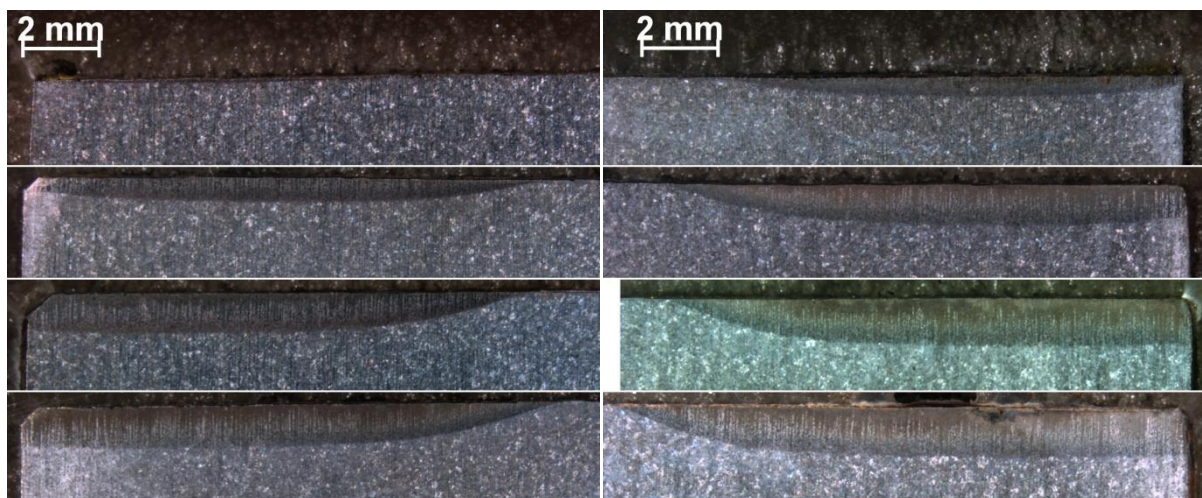


30. ábra: A lézersugárral edzett felületen felvett diffraktogramok polírozás előtt (fekete) és után (piros)

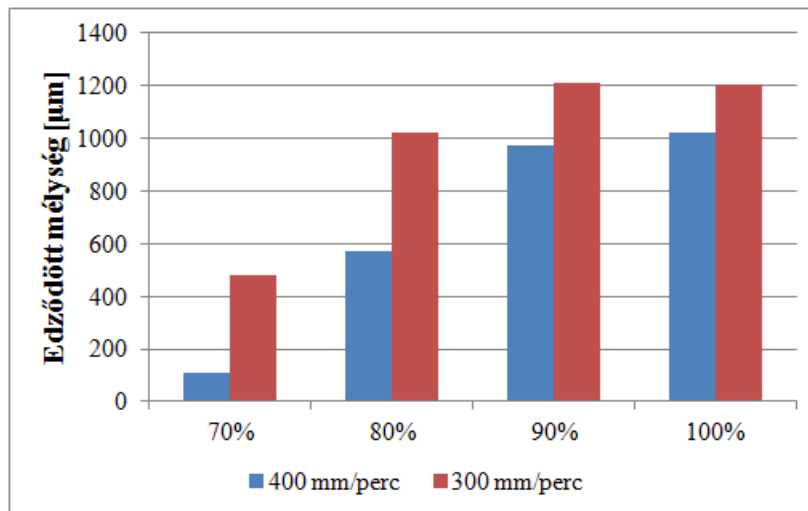
5.3. Szövetvizsgálat

A lézersugárral edzett sávok keresztmetszetét mutatja 12x nagyításban a 31. 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 32. 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.



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

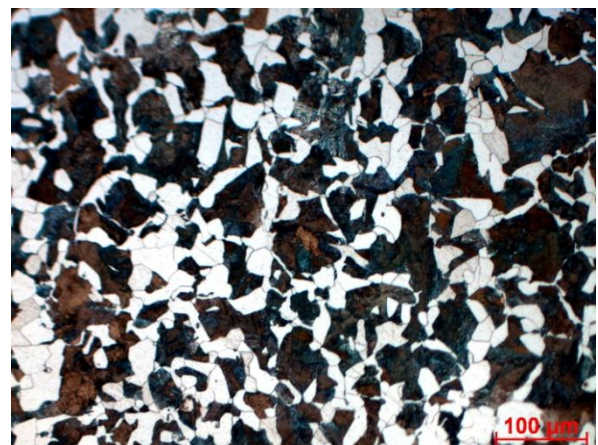


32. ábra: A lézersugaras edzés paramétereinek hatása a beedződött mélységre

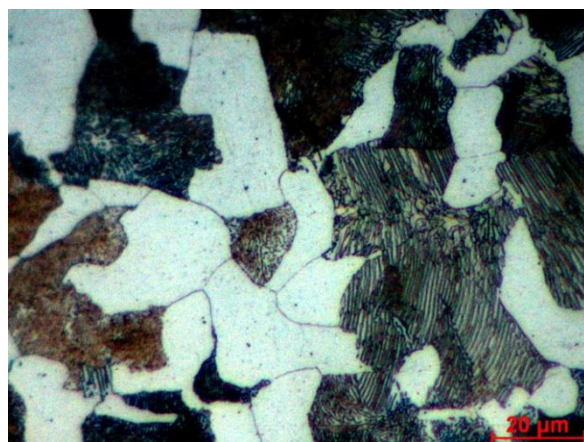
A minták belsejében lévő, azaz a kiinduló szövetszerkezetet mutatja a 33. ábra. Ez egy soros, ferrit-perlites szövet.



50x nagyítás



200x nagyítás

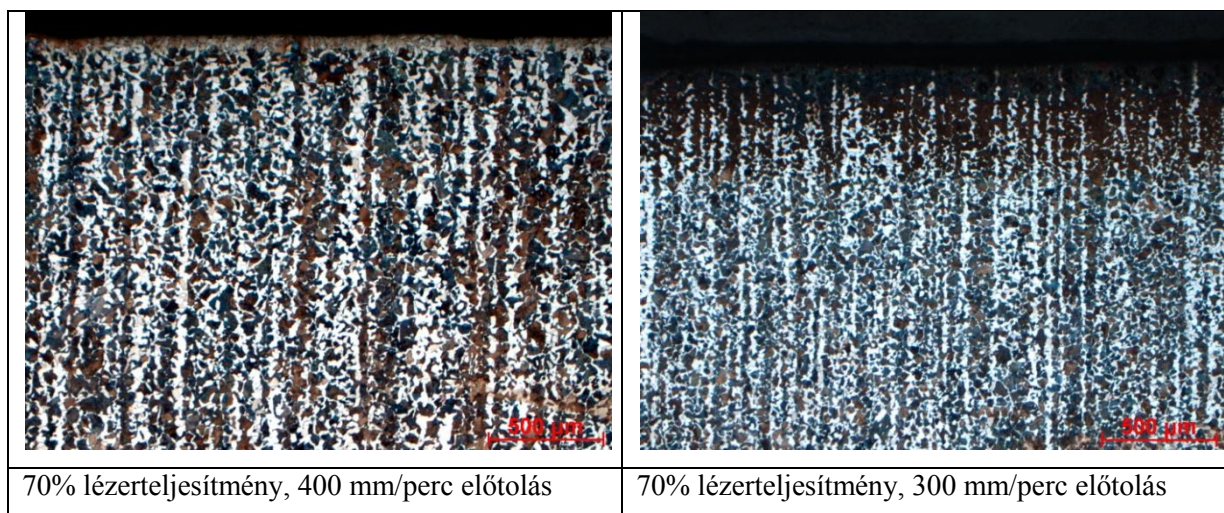


1000x nagyítás

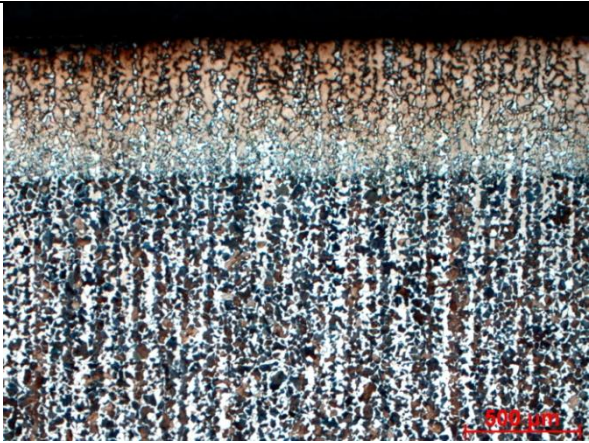
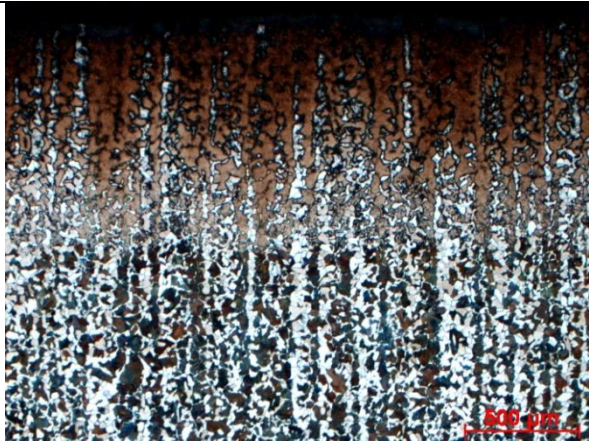
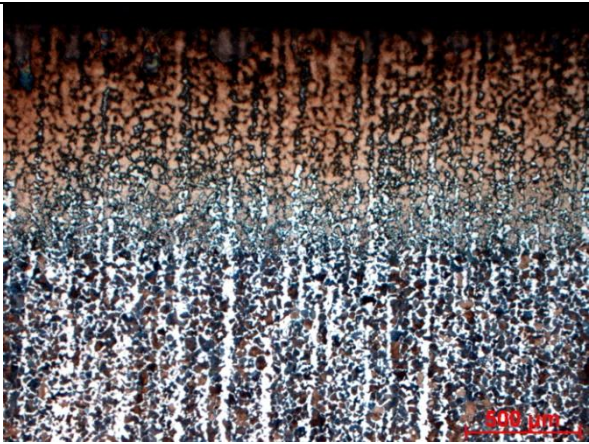
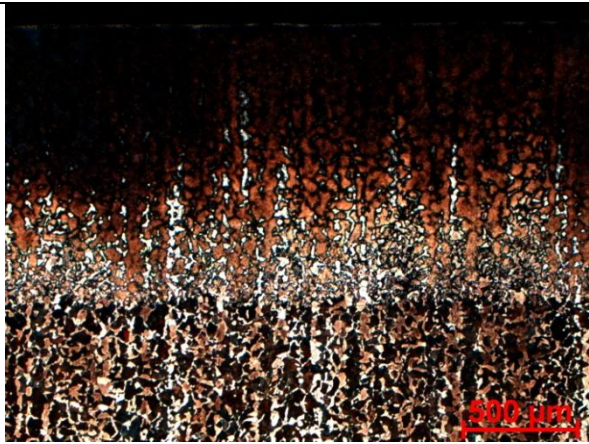
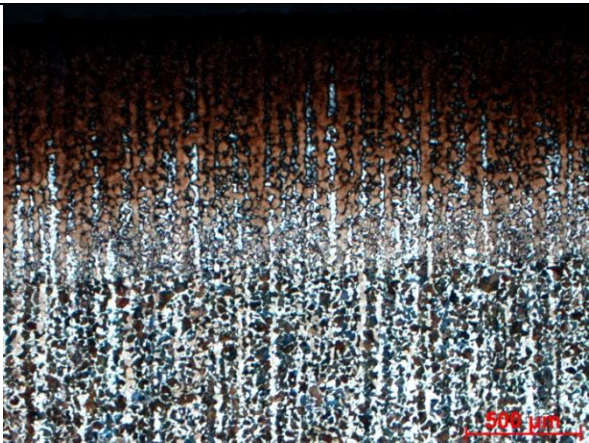
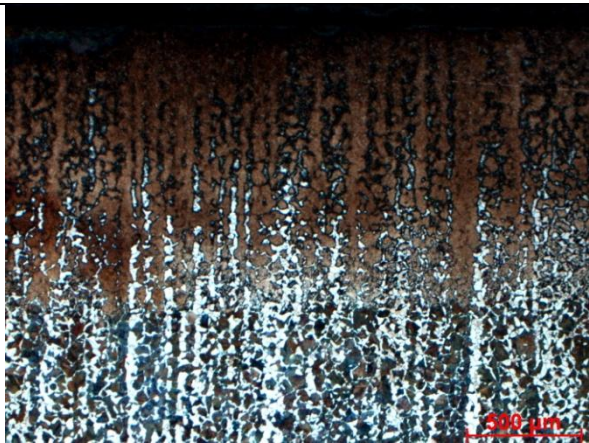
33. ábra: Kiinduló szövetszerkezet különböző nagyításokban

A lézersugárral edzett felületeket mutatja 50x nagyításban a 34. ábra és a 35. ábra. A felülethez közeli szövetszerkezetet nagyobb nagyításban a 36. ábra és a 37. ábra képein figyelhetjük meg. A legkisebb és legnagyobb teljesítmény esetén a szövetszerkezet változását a minta belseje felé haladva mutatja a 38. ábra és a 39. ábra.

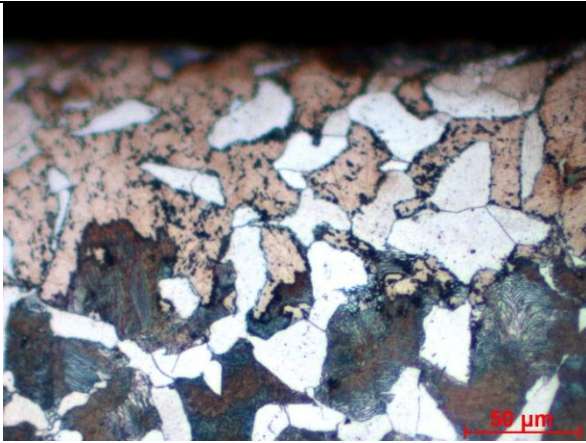
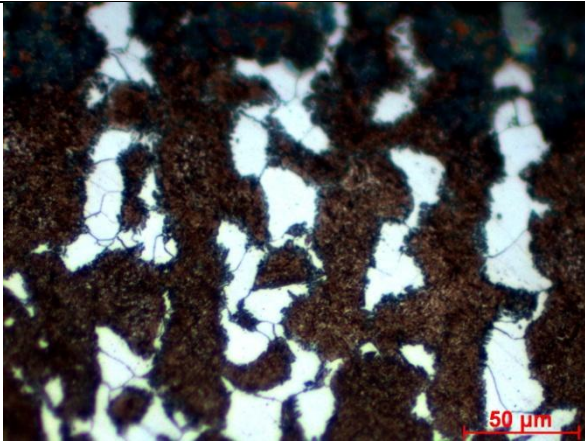
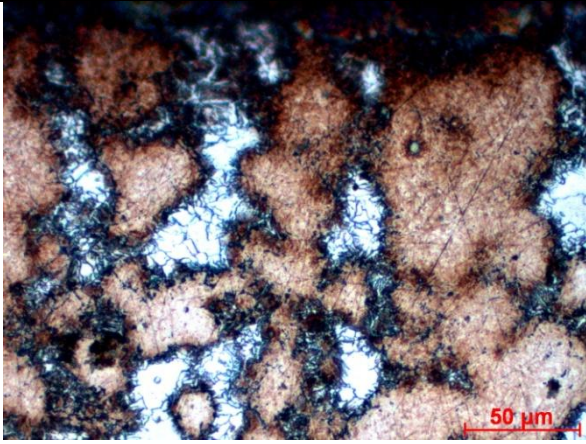
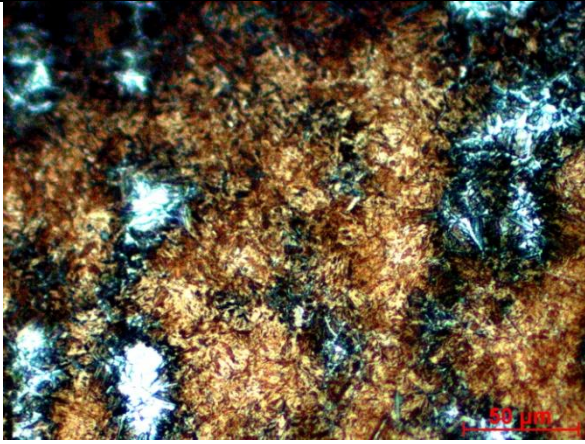
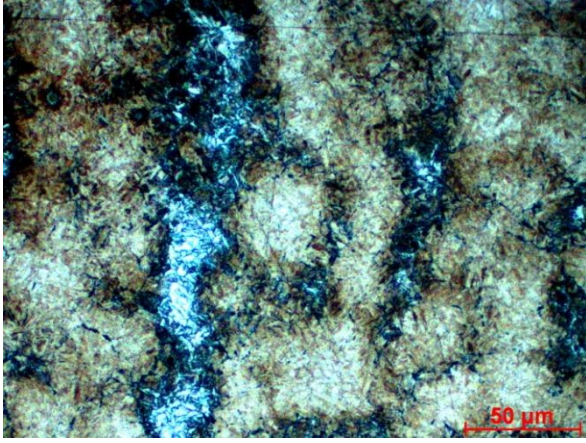
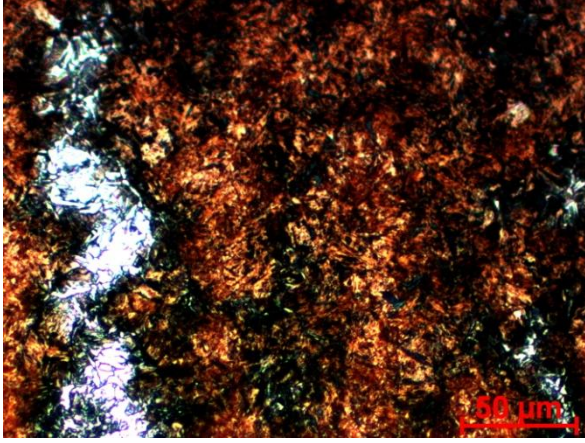
A képeken többféle hatás is megfigyelhető. Ferrit, martenzit és perlit szövetelemeket különböztethetünk meg a hőhatás övezetben. A képeken a beedződött réteg vastagsága jól kivehető. Egyértelműen látszik, hogy a lézersugár teljesítményének növelésével és az előtolási sebesség csökkentésével nő az átalakult 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% teljesítmény esetén már nem érnek ki a minta felületére. A lézersugár teljesítmény növelésével megfigyelhető a martenzit szemcsék méretének durvulása is, főként a felszínhez közeledve. Ez a jelenség a gyorsabb előtolásnál 90%, a lassabbnál 80% lézerteljesítmény felett jelentős. A kisebb előtolási sebesség alkalmazása, nagyobb hőbevitelt jelent, ezáltal megnövekszik a martenzites beedződött réteg vastagsága. A nagyobb lézersugár teljesítményeknél megfigyeltük, hogy a minta belseje felé haladva a martenzit szerkezete egyre finomabb (39. ábra).



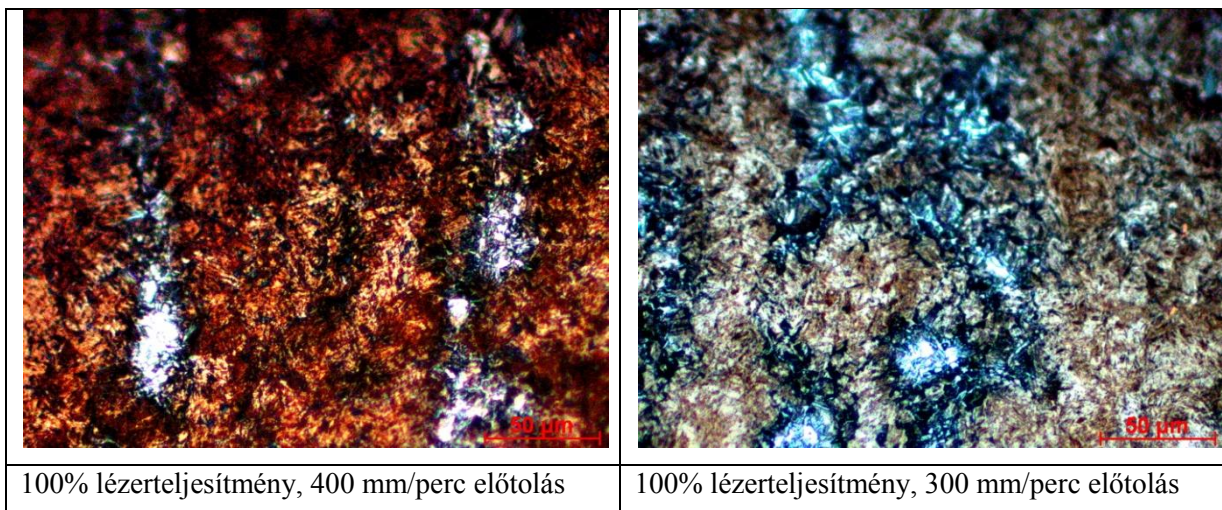
34. ábra: A lézeredzett felületek 50x nagyításban (70 teljesítmény)

	
80% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	80% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás
	
90% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	90% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás
	
100% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	100% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás

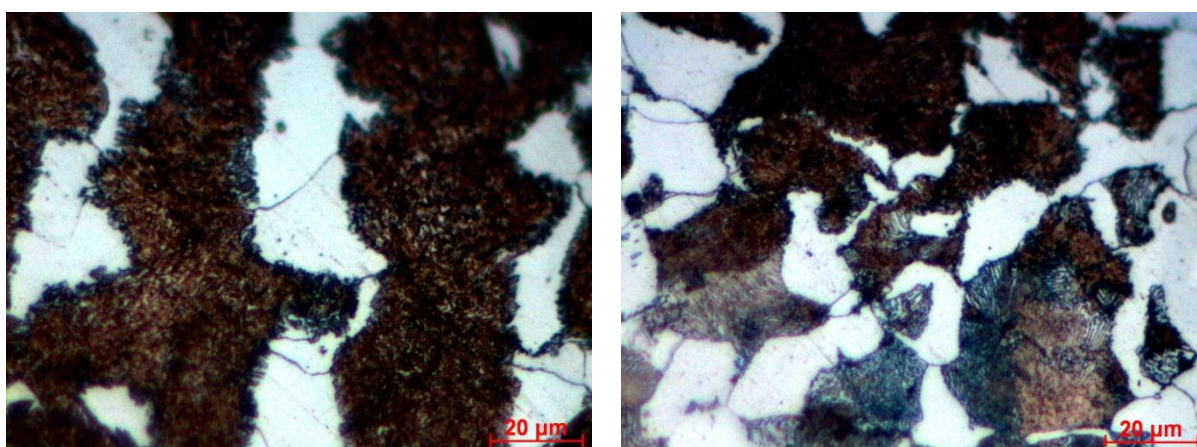
35. ábra: A lézeredzett felületek 50x nagyításban (80-100% teljesítmény)

	
70% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	70% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás
	
80% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	80% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás
	
90% lézerteljesítmény, 400 mm/perc előtolás	90% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás

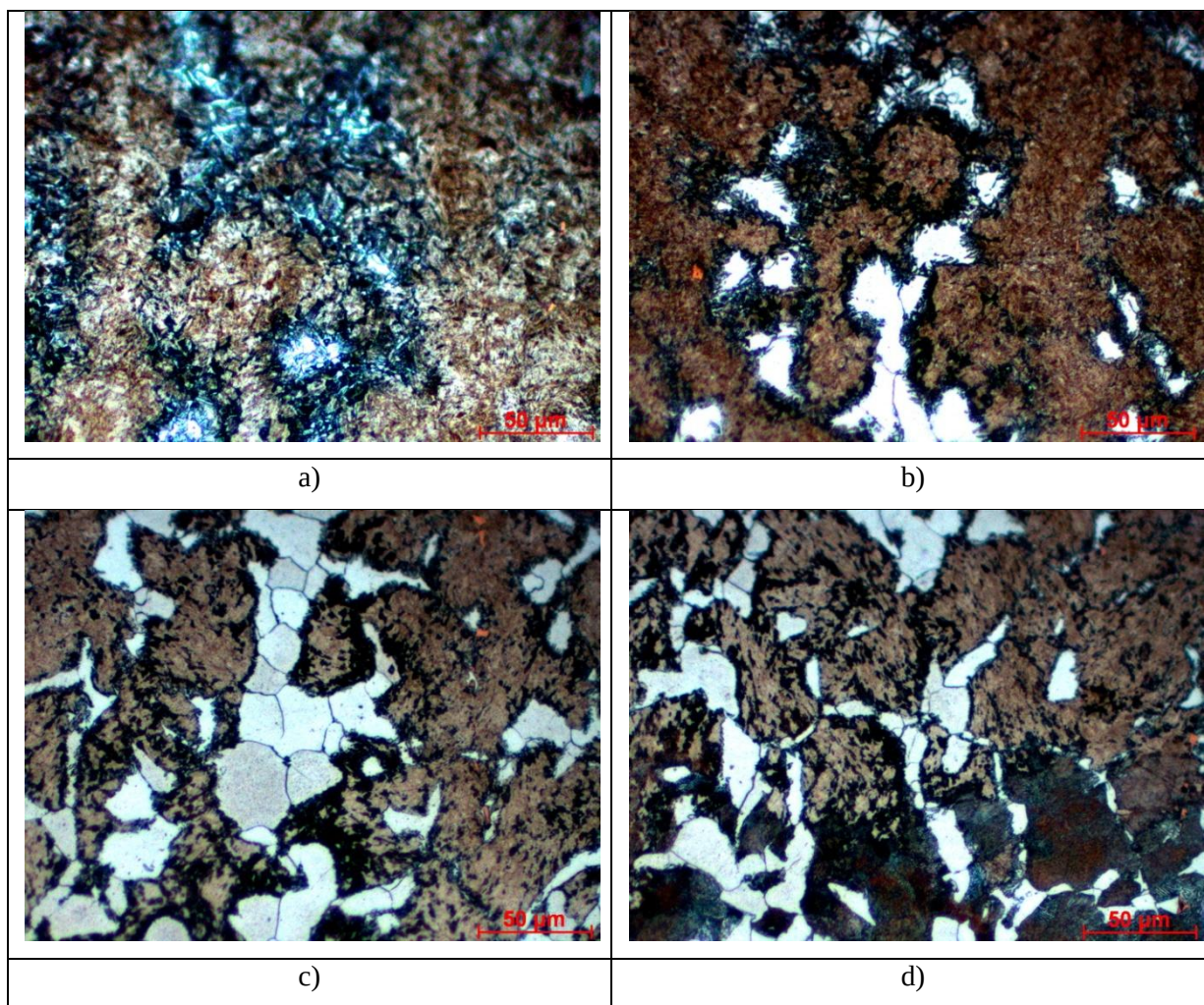
36. ábra: Martenzit szerkezete a felület közelében, 500x nagyítás (70-90% teljesítmény)



37. ábra: Martenzit szerkezete a felület közelében, 500x nagyítás (100% teljesítmény)



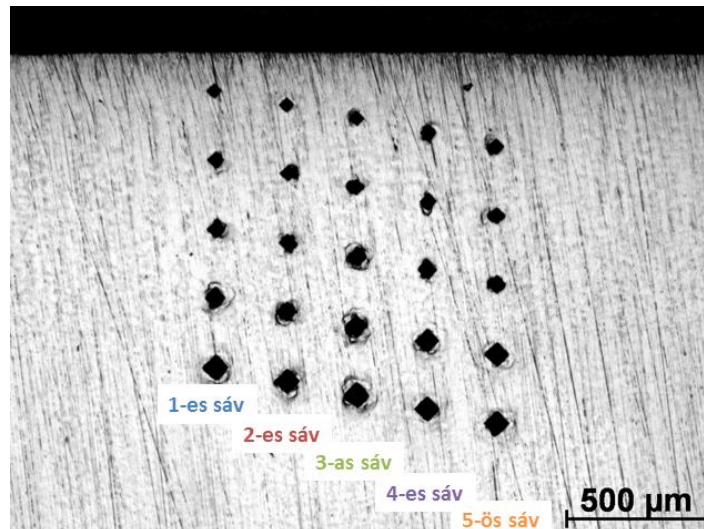
38. ábra: 70% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás, 1000x nagyítású felvételek, a minta szélétől (balra) befelé haladva (jobbra)



39. ábra: 100% lézerteljesítmény, 300 mm/perc előtolás, 500x nagyítású felvételek, a minta szélétől befelé 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 érdekében), 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 40. ábra mutatja. A keménységmérések során kapott diagramokon a sávokhoz tartozó pontok jelölő színei az ábrán használt színekkel.

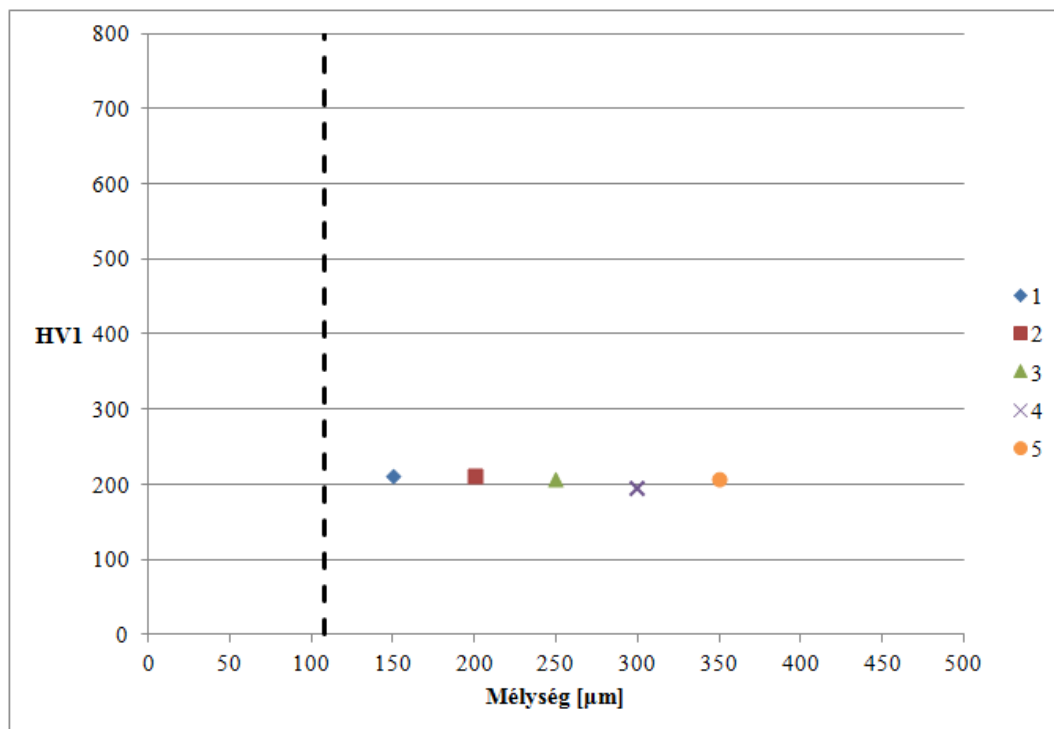


40. ábra: A keménységmérés adatpontjainak elhelyezkedése az öt függőleges sávban

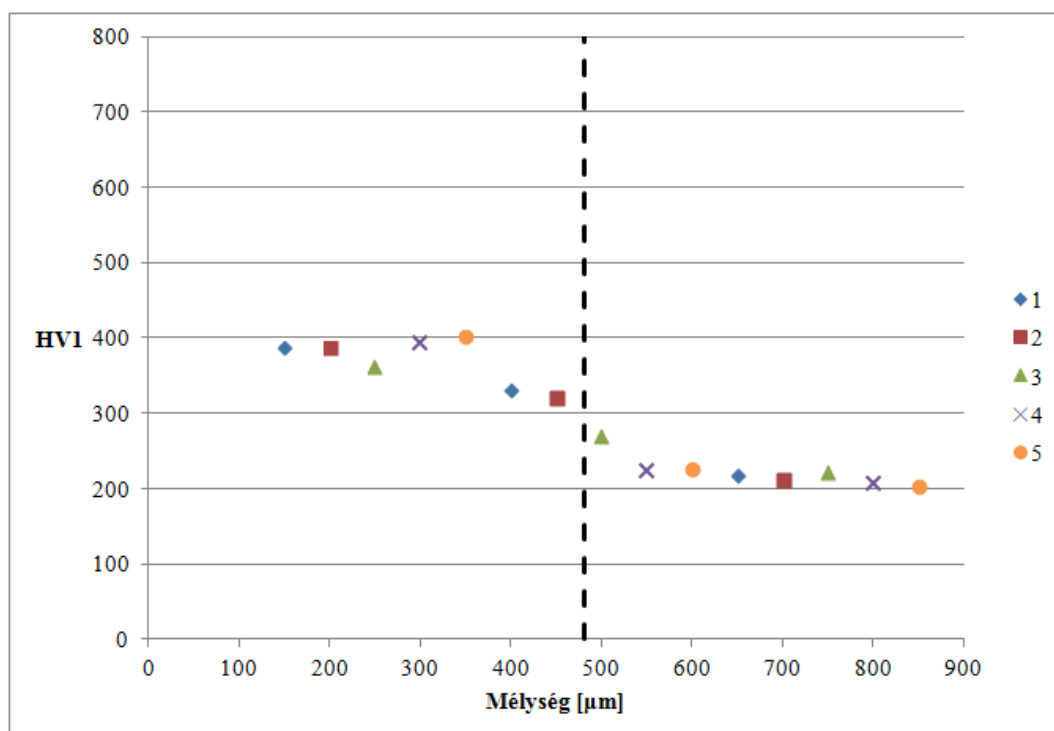
A mért keménység értékeit mutatja diagramok formájában a 41. ábra - 44. ábra. A szaggatott vonal a diagramokon a fénymikroszkópos képeken mért edződött mélységet jelöli.

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% lézerteljesítmény 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, 42. ábra, „b” diagram), hol martenzit-perlit sorban (1-es, 4-es sávok, 42. ábra, „b” diagram) helyezkedtek el. A 43. ábra „b” diagramján 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 40. 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 választani 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.

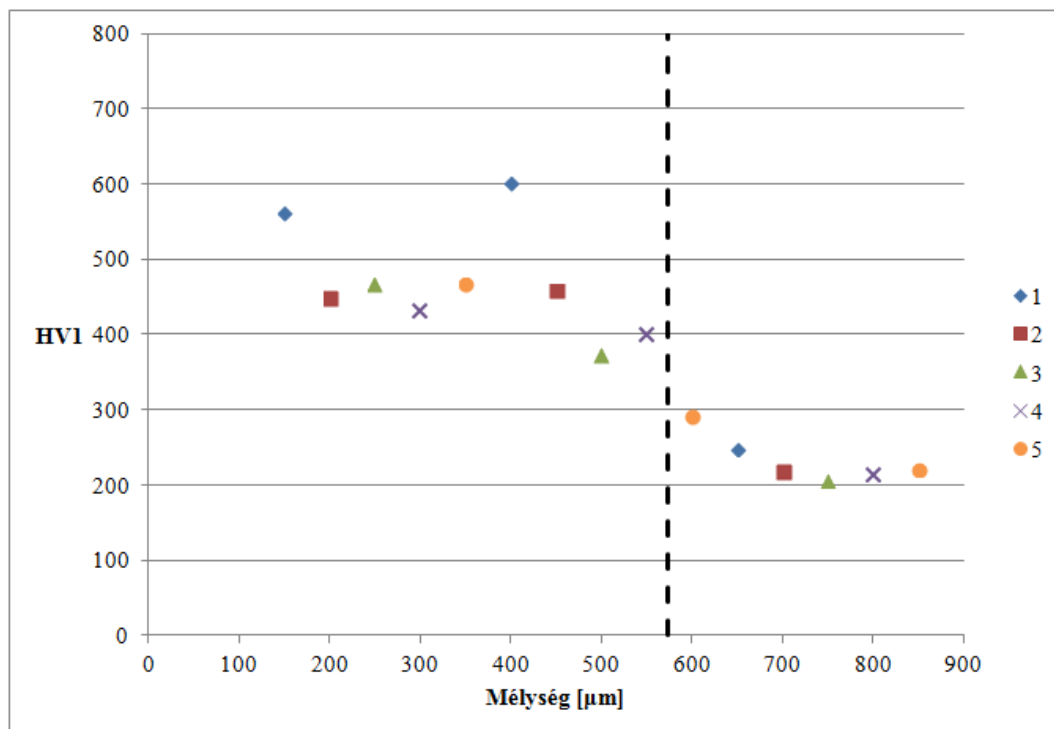


a) 400 mm/perc előtolás

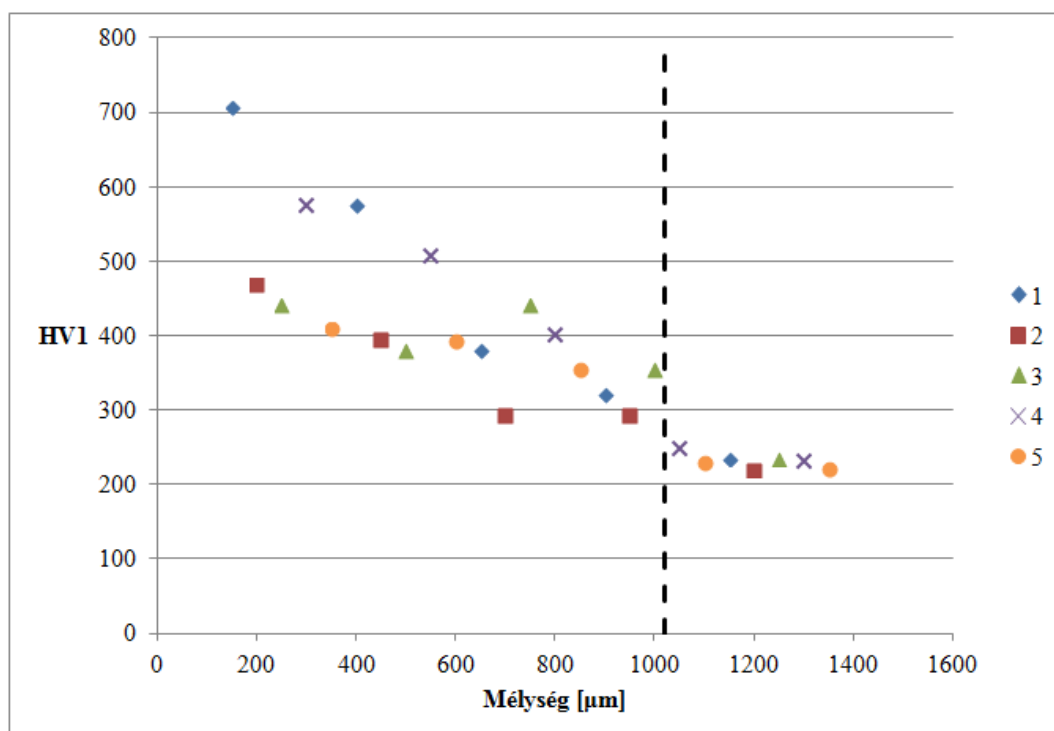


b) 300 mm/perc előtolás

41. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon (70% lézerteljesítmény)

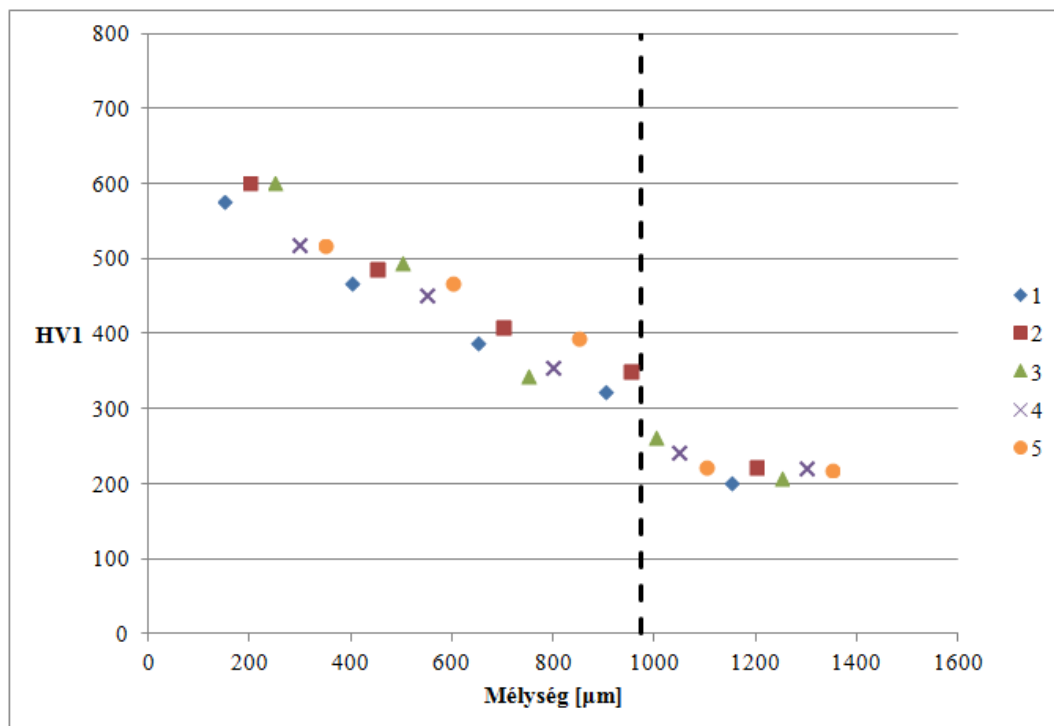


a) 400 mm/perc előtolás

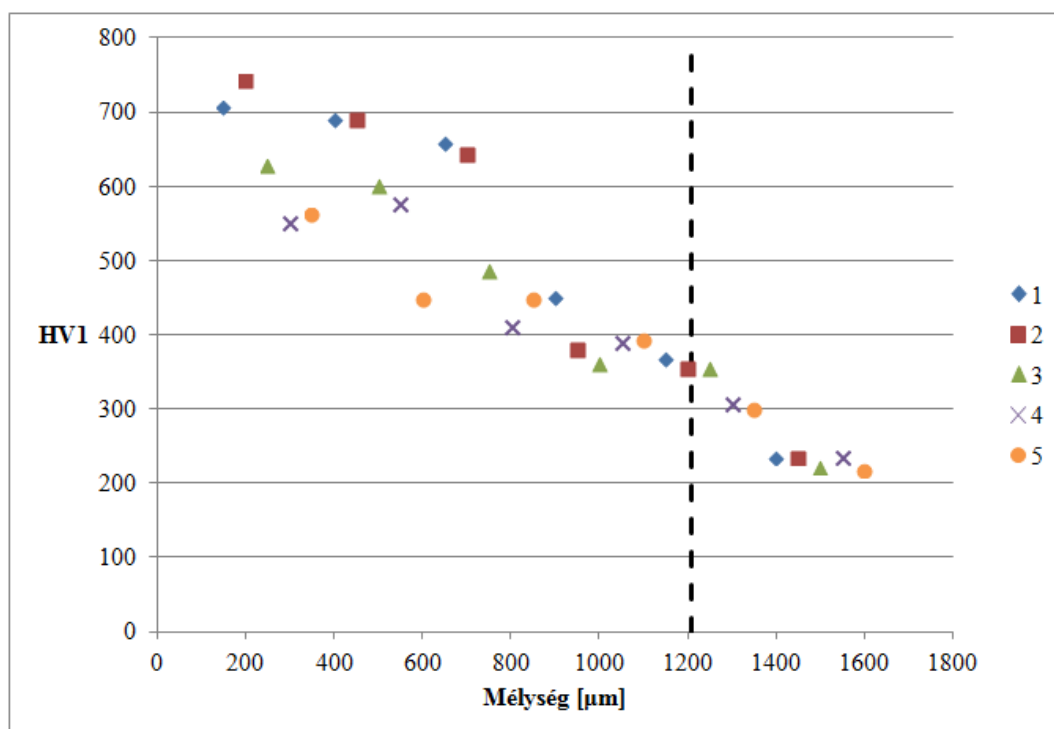


b) 300 mm/perc előtolás

42. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon (80% lézerteljesítmény)

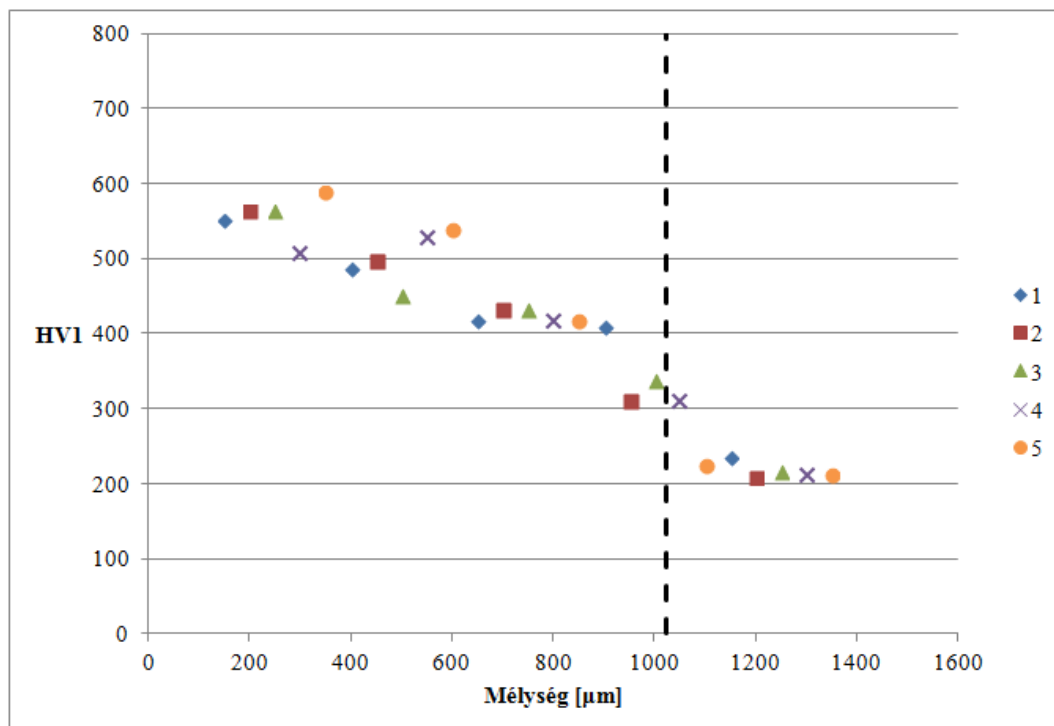


a) 400 mm/perc előtolás

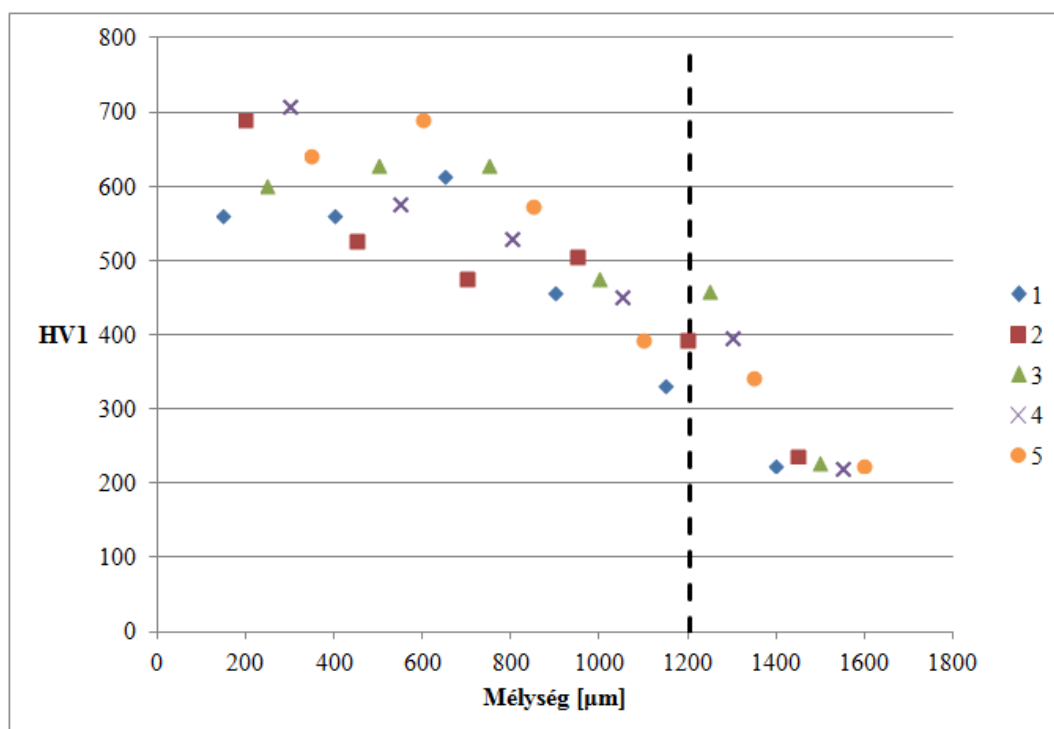


b) 300 mm/perc előtolás

43. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon (90% lézerteljesítmény)



a) 400 mm/perc előtolás



b) 300 mm/perc előtolás

44. ábra: Az egymás melletti sorokban (1-5) mért keménység értékek a lézersugárral edzett mintákon (100% lézerteljesítmény)

6. Összefoglalás

C45-ös melegen hengerelt acél felületén 5 kW teljesítményű CO₂ lézerberendezéssel hajtottunk végre felületi edzést, különböző lézerteljesítmény, 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 (vizsgálati anyag) 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 kimutatható. 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 lézersugár teljesítmény nagyobb energiabevitelt jelent, az abszorbeált hőmennyiség 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 feszültség 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 (korlátozott mértékű diffúziójával) 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, ami 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 és a kisebb előtolási sebesség segíti a karbon diffúzióját, 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 nagyobb 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 további vizsgálataimat PhD tanulmányaim keretében tervezem folytatni. Célom lesz a folyamatban lévő TiO_2 abszorpciós réteggel bevont minták vizsgálatát befejezni, az eredményeket összevetni a jelen dolgozat eredményeivel.

További terveim közt szerepel a lézersugaras edzés okozta feszültségek mélység szerinti vizsgálata.

A kialakult feszültségállapotok további vizsgálatához célom elválasztani a fázisátalakulás és a hőtágulás okozta feszültségek hatását. Ehhez fázisátalakulást nem mutató fémötvözetben is tervezünk lézersugaras kezelést végezni.

A komplex feladatnak megfelelően hagyományos edzéseket tervezünk végezni, majd az eltérő hűtési irányból adódó eltérő feszültségállapotokat fogjuk összehasonlítani.

További terveim között szerepel a lézersugaras felületi edzés ipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, továbbá gépalkatrészek lézersugaras felületi edzése során kialakult feszültségek vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek: Dr. Benke Mártonnak a mérések és a dolgozat készítése során nyújtott segítségéért, Dr. Buza Gábornak a lézersugaras edzéshez nyújtott segítségért.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Stefan Kaierle-nek, hogy a Laser Zentrum Hannoverben tölthettem a nyári gyakorlatomat, és a Balassi Intézetnek, hogy a Campus Hungary ösztöndíjprogram segítségével sikerült ezt megvalósítanom.

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

A vizsgálatokhoz nélkülözhetetlen előkészítési műveletekben sokan segítségemre voltak. Köszönöm a munkáját Márkus Zoltánnénak, Márkus Zoltánnak, a keménységmérésnél nyújtott segítségét pedig Bodnárné Nyári Napsugárnak.

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] G. Totten, M. Howes, T. Inoue: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, Ohio, 2002

- [5] Valery Rudnev: Handbook of Induction Heating, Library of Congress Cataloging – in-Publication Data, USA 2003 pp 303

- [6] Dr. Bárczy Pál, Dr. Fuchs Erik: Metallográfia I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1981

- [7] Sólyom Jenő: Maradó feszültség mérése röntgendiffrakciós módszerrel gépalkatrészekben, Tanulmány, Miskolc, 2007

- [8] A. D. Krawitz: Introduction to diffraction in materials science and engineering, John Wiley 2001, pp 119-143, 278-318

- [9] Cseh Dávid: Fárasztó igénybevétel maradó feszültségre gyakorolt hatásának vizsgálata, diplomadolgozat, Miskolci Egyetem, 2013

- [10] Xstress 3000 G3/G3R system, Operating instructions and instrument documents, 2012