

Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar  
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

# Fogasléc előgyártmány előállításának maradó feszültség vonatkozásai

PhD értekezés

**Szerző: Majtényi József**

okleveles kohómérnök



Tudományos vezetők:

Prof. Dr. Mertinger Valéria, egyetemi tanár

Dr. Benke Márton, egyetemi docens

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Doktori iskolavezető Prof. Dr. Gácsi Zoltán

**Miskolc**

**2020**

## Tartalom

Bevezetés.....	5
1. Maradó feszültség értelmezése és jelentősége.....	6
2. Maradó feszültség vizsgálati módszerei .....	8
3. Indukciós edzés fémfizikai folyamatai és hatása a maradó feszültség állapotra .....	10
4. Rúdszerű autóiipari előgyártmányok maradó feszültsége.....	19
5. Tudáshiány, célkitűzés és kutatási terv .....	23
6. Autóiipari kormány fogasléc előgyártmány fő gyártási lépéseinek bemutatása.....	27
7. Vizsgált rudak állapotának részletes jellemzése .....	30
8. Vizsgálati módszerek és paraméterek bemutatása .....	32
8.1. Röntgendiffrakciós maradó feszültség vizsgálat .....	32
8.2. Feszültség aszimmetria.....	34
8.3. Félértékszélesség .....	34
8.4. Maradék ausztenit tartalom .....	35
8.5. Makroszkopikus deformáción alapuló mérés marópróbával.....	36
8.6. Keménységmérés.....	38
8.7. Szövetvizsgálat .....	38
8.8. Az edzett rudak többlépéses hőkezelési folyamatának végeselemes szimulációja .....	39
9. Kutatási eredmények bemutatása.....	42
9.1. Marópróbával meghatározott deformáció értékek.....	42
9.2. Felületi maradó feszültség, feszültség aszimmetria és félértékszélesség értékei .....	46
9.3. A maradó feszültség mérés során tapasztalt kiugró pontok ellenőrzése .....	64
9.4. Mélységi maradó feszültség eloszlás vizsgálatok .....	64
9.5. Kimarózás hatásának tisztázása .....	74
9.6. Maradék ausztenit vizsgálat eredménye .....	78
9.7. Keménységtraverz vizsgálat eredménye .....	79
9.8. Szövetvizsgálat eredmények.....	83

9.9. Végeselemes szimulációval kapott eredmények .....	84
10. Összefoglalás.....	87
11. Summary .....	90
12. Tézisek .....	93
13. Az eredmények hasznosulása.....	97
Irodalmi hivatkozások.....	98
A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk jegyzéke.....	101

**Témavezetői ajánlás**

Majtényi József

Fogasléc előgyártmány előállításának maradó feszültség vonatkozásai

című PhD értekezéséhez

Majtényi József 2014-ben nagyon határozott hozzáállással kezdte doktori tanulmányait, saját konkrét kutatási elképzeléssel. Témája rendkívül aktuális, hiszen az akkori munkahelyén felmerült – és a járműipar egy jelentős területét érintő – probléma tárgyalását tűzte ki céljául. Az ipari háttér egyrészt nagy előnyt jelentett a Jelöltnek a kutatásai elvégzéséhez, hiszen lehetősége volt valós körülmények között előállított félkésztermékek vizsgálatára, sőt, a termelési rutintól eltérő módon kezelt próbadarabok készítésére is. Másrészt, PhD tanulmányai folytatása mellett a németországi munkahelyén is helyt kellett állnia. Az, hogy mind az akadémiai, mind az ipari szféra követelményrendszerének megfelelt, Majtényi József céltudatosságáról és kitartásáról tanúskodik. A Jelölt ötletességének és alaposságának egyik legegységesebb bizonyítéka, hogy az általa kidolgozott marópróbás vizsgálati módszert a Daimler AG átvette, és beszállítói követelményként alkalmazza. A közös gondolkodások, ötletelések során egyértelműen tapasztalhattuk tudományos fejlődését, melynek köszönhetően a maradó feszültség jellemzésének számos apró részletein sikerült finomítania. Ezek eredményeként 3 darab első szerzős publikációt készített, melyek közül az egyik Q3-as, egy másik pedig Q4-es minősítésű. Ezeken túl, további két szakmai cikk társszerzője.

Majtényi József személyében egy rendkívül céltudatos, kitartó és ötletes kollégát ismerhettünk meg, akiben egyaránt jelen van az ipari szférában jártas mérnöki, valamint az akadémiai pályára jellemző kutatói szemlélet. A szakma iránti szeretete, elhivatottsága és lendületes munkastílusa minket is inspirált. Nagy öröm volt számunkra, hogy lehetőségünk volt Majtényi József doktorjelölttel együtt dolgozni.



Dr. Mertinger Valéria



Dr. Benke Márton

## Bevezetés

A modern jármű-, autó- és gépgyártásban a félkésztermékek vagy alkatrészek megmunkálásakor a maradó feszültség okozta problémák jól ismertek (Withers, 2007). Sokszor ez a gyártást nem csak lassítja, hanem magas számú selejthez, ezen okok miatt pedig jelentős termelés kieséshez vezethet. Ebből kifolyólag a gyártók a gyártási paraméterek optimalizálásával igyekeznek csökkenteni az anyagban ébredő maradó feszültséget (Jang, 1996), (Kristoffersen, 2001), (Outeiro, 2002), (Outeiro, 2002), (Leppert, 2012), (Stenberg, 2013). Ez ugyanis a tovább feldolgozásokor termelési problémákat, nagyfokú plusz költségeket, valamint hatalmas környezeti terhet jelent. Németországban az autó, gép, és erőátviteli gyártók körülbelül évi 850 millió eurót költenek feszültségmentesítési hőkezelésekre (Brzoza, 2006) amikor is a gyártási technológia nem teszi lehetővé, hogy kellőképp kis vagy teljesen feszültségmentes terméket állítsanak elő, akkor a fém félkészgyártmányok valamint alkatrészek feszültségmentesítése egy jól szabályozott hőkezelési eljárással nagymértékben minimalizálhatja az anyagban lévő maradó feszültséget.

Jelenleg a beszállítók számára az ilyen fajta termékekre nincs olyan általánosított autóiipari szabvány, mely szerint ezeket a félkésztermékeket, előgyártmányokat maradó feszültség szempontjából egyszerűen, gyorsan, helyben minősíteni lehetne. Egyes autó- és gépgyártók saját előírásaik szerint megkövetelik, anyageltávolítás (marózás) hatására történő deformációs vizsgálatot. Ebben az esetben kizárólag a kész rúd marózás utáni elhajlását nézik.

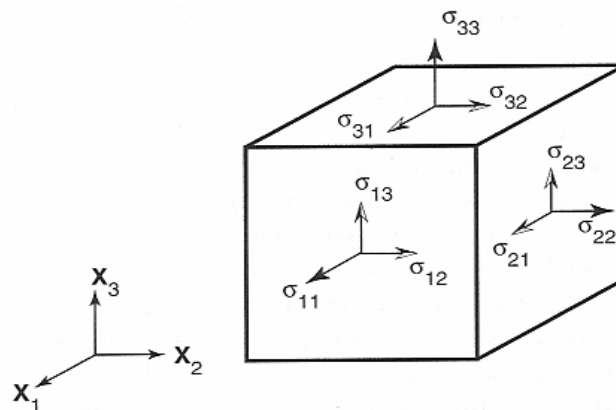
Kutatómunkám alapgondolata, hogy a végtermék maradó feszültség állapotát nem feltétlen az utolsó gyártási lépés határozza meg, hanem az folyamatosan változik gyártás közben, akár visszafordíthatatlan folyamatot is előidézve. A feszültség monitorozásával olyan gyártásközi műveletek tervezhetők, melyek alkalmazásával a selejtszám és a gyártási összköltség jelentősen csökkenthető. Ezért kutatómunkám során kör alakú acélrudakon roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokat végeztem annak érdekében, hogy kimutassam a kormánymű fogasléc ipari környezetben történő gyártásakor, a fogazási folyamatot megelőzően, az egyes technológiai lépések során, a maradó feszültség állapotban bekövetkező változást. Céлом volt, hogy kimutassam melyek a kritikus gyártási lépések a továbbfeldolgozás során deformációt okozó maradó feszültség állapot szempontjából. Feszültség állapot alatt azt értem, hogy milyen feszültségi állapotok (húzó-, nyomófeszültségek) vannak és milyen azok térbeli, felületi és felület alatti eloszlása.

Roncsolásos vizsgálatokhoz az ún. marópróbás, alakdeformáción alapuló módszert (Verzugsprüfung) alkalmaztam, melyet a saját kísérleteim eredményei, tapasztalatai, valamint a vevői visszajelzések alapján továbbfejlesztettem, amelynek köszönhetően több információt tudhatunk meg az anyagban lévő maradó feszültség mértékéről, valamint annak eloszlásáról. Céлом volt, hogy a vizsgált alkatrésze vonatkozóan a mérési módszerhez szükséges, anyagminőségtől független határértékeket definiáljak.

Ezen roncsolásos mérési módszer validálására a maradó feszültség jellemzésére talán leggyakrabban alkalmazott röntgendiffrakciós (XRD) módszert alkalmaztam. A módszer jellegéből adódóan kis anyagi térfogatra, és nem az alkatrész egészére vonatkozóan ad meg vitathatatlan, számszerű adatot. Ezért további célom volt, hogy az általam vizsgált, rúd félkésztermék XRD vizsgálaton alapuló minősítésének metodikáját is kidolgozzam.

## 1. Maradó feszültség értelmezése és jelentősége

Maradó feszültségről (saját feszültségről, belső feszültségről) akkor beszélünk, ha egy adott munkadarabra semmilyen külső erő, illetve nyomaték nem hat, külső ponthoz viszonyított inercia rendszerben egyensúlyban van, ám a darab belsejében különböző nagyságú és irányú, de egymással egyensúlyt tartó mechanikai feszültségek hatnak. Az 1. ábra a feszültségkomponenseket mutatja egy rugalmas test térfogategységében, ahol fel vannak tüntetve a térfogatban ható normálfeszültségek ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ ), valamint a nyírófeszültségek ( $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{32}$ ,  $\sigma_{21}$ ). A normálfeszültségek jellegüket tekintve lehetnek húzó-, vagy nyomófeszültségek. Általános megállapítás, hogy egy munkadarabban nem csak az egyik típus van jelen, hanem mindkét jellegű feszültség egy komplex eloszlás szerinti egyensúlyban.



1. ábra Feszültségkomponensek egység kockán (Krawitz, 2001)

Amint azt a bevezetésben írtam, a gyártási problémák elkerülése miatt a gyártók az anyagban lévő maradó feszültséget csökkenteni, 0 közeli állapotba hozni igyekeznek. Bizonyos esetekben azonban pont az ellenkezőjét teszik, azaz a maradó feszültség egyik fajtáját a nyomó maradó feszültséget növelni igyekeznek az anyagban. A legelterjedtebb maradó nyomófeszültség létrehozására irányuló technológia a szemcseszórás. Emellett ugyanilyen kedvező hatású a görgőzés, a mángorlás, a cementálás és a lézersokkolás is (John, 2011), (Shin & Tian, 2006). A maradó feszültség célzott felhasználáshoz történő optimalizálása, különös tekintettel a fásztó igénybevételnek kitett alkatrészekre, mára az ipari gyakorlat részévé vált. A direkt maradó nyomófeszültség előállítható változatos módokkal kompozit anyagokban is (Nestler, 2015). Létező eljárás fém alkatrészek szelektív lézer olvasztásos 3 dimenziós nyomtatása esetén, hogy a nyomtatott belső rétegeket azok egymásra építése közben lézersokkolással kezelik, így az elkészült darab maradó nyomófeszültségének mélységi eloszlásában a feszültség maximum értékének platon tartása minden más ismert technikánál (Zhuang, 2001) mélyebben megvalósítható (Kalentics, 2017), (Cseh, 2018).

A próbatest felületén direkt maradó nyomófeszültség létrehozására irányuló technológiák közül a két legelterjedtebb módszer a szemcseszórás és a görgőzés. Ezen felül egyes felületötvözési technikákkal különösen a cementálással (Palaniradja, 2010), lézeres sokkolással (Ochi, 2010), az indukciós hőkezeléssel (Coupard, 2008) is hasonló maradó feszültségeket építhetünk fel (Paquet D. L., 2012), (Cseh, 2018).

A maradó feszültségek kiterjedésüket tekintve hagyományosan három csoportba sorolhatók, mely felosztás feltételezi, hogy fémes tulajdonságú anyagokról beszélünk (Bárcyz, 1981), (Bhadeshia, 2013), (Haimbaugh, 2006), (Krawitz, 2001).

### **Elsőrendű feszültség**

Azokat a belső feszültségeket, amelyek kiterjedésüket tekintve a darab méreteivel azonos nagyságrendben vannak, összehasonlíthatók vele, elsőrendű, vagy makroszkópos feszültségeknek nevezzük. Ezeknek a feszültségeknek kialakulásában szerepet játszhat a darab képlékeny hideg alakítása; forgácsoló megmunkálás; hegesztés; nagyobb kiterjedésű darabok esetén, ha a lehűlést nem tudjuk precízen szabályozott keretek között véghez vinni bármiféle meleg technológia (öntés, hőkezelés, képlékenyalítást megelőző izzítás) után, a darab méreteiből következő, a keresztmetszetében a hőelvonás irányából a darab közepe felé haladva egyre kisebb lehülési sebességek okozta eltérő mértékű hő dilatáció.

### **Másodrendű feszültség**

Másodrendű, vagy mikroszkópos feszültségeknek nevezzük azokat a feszültségeket, melyek kiterjedésüket tekintve a szemcsék átlagos méretével vannak azonos nagyságrendben. Ezeknek a feszültségeknek az értéke, előjele, azaz iránya szemcsehatárt átlépve megváltozhat. Kialakulásának oka az adott irányú alakító erőre különböző módon reagáló, egymással határos eltérő kristálytani orientációjú, vagy különböző fázisú szemcsék eltérő mértékű alakváltozásából következik. Az alakító erő hatására környezetüknél kisebb mértékben képlékenyen alakváltozó térfogatú részekben és határaikon húzó mechanikai feszültséget ébresztenek az alakváltozásaik mértékének különbségével arányosan. Ezzel ellentétes hatással van környezetére, de elviekben ugyan ezzel a jelenséggel magyarázható, hogy az adott feszültséggel terhelt, a heterogén anyagi térfogat részben az adott feszültségre nagyobb mértékben képlékenyen alakváltozó rész a határain nyomófeszültséget hoz létre. Ez a másodrendű feszültség az adott térfogat részben anizotróp módon ébreszt feszültségeket, mely a képlékeny alakváltozás mechanizmusának kristálytani irányoktól való függéséből következik.

### **Harmadrendű feszültség**

Harmadrendű, vagy szubmikroszkópos feszültségnek nevezzük azokat a feszültségeket, melyek kiterjedésüket tekintve néhány atom átmérő távolságon belül hatnak, s melyeknek oka rendre valamely kristályrácsban belüli rendellenesség: vakancia, intersztíciós vagy szubsztitúciós atom, illetve minden kétdimenziós rácshiba, azaz diszlokáció. Belátható, hogy adott (fémes) kristályrácsba beépülő idegen, az adott kristályrácsot alkotó atomoknál nagyobb átmérőjű atomok környezetükre nyomófeszültséget gyakorolnak, míg a kisebbek körül húzott térfogat rész alakul ki. Éldiszlokációk esetén az extra sík két oldala nyomott, míg az extra síkkal szembeni térrész húzófeszültséggel terhelt. Az egyes technológiai műveletek hatására kialakulhatnak első, másod és harmadrendű feszültségek együttesen is.

Néhány esettől eltérően – amikor a cél a magas nyomófeszültség a felület közeli rétegben a kopásállóság növelése érdekében – a gyakorlatban a maradó feszültségek értékét csökkenteni, vagy ha lehetséges teljesen megszüntetni törekszünk. A maradó feszültség hőkezeléssel jelentős mértékkel csökkenthető, eliminálható.

## 2. Maradó feszültség vizsgálati módszerei

A minőségbiztosítás és irányítás megköveteli a maradó feszültséget létrehozó eljárások kontrolálását. A mérési módszerek alapvetően kétfélék lehetnek roncsolásos (mechanikai módszerek) vagy roncsolásmentes (fizikai módszerek) (Totten, Howes, & Inoue, 2008). A mérési eljárás kiválasztásánál célszerű figyelembe venni a vizsgálandó mintát és a gyártási technológiát egyaránt. A mechanikai módszerek a feszültség relaxációjával együtt járó deformáció mértékéből következtetnek a feszültség állapotra. Ilyen vizsgálati módszerek például a lemunkálás, a lyukfúrásos módszer (Sharman, 2006), marópróbás valamint a felhasítással járó eljárás (Withers, 2007), (Bhadeshia, 2013) (Totten, Howes, & Inoue, 2008). A fizikai módszerek közül a legelterjedtebb a röntgendiffrakción alapuló módszer, melyet a vizsgálataimhoz én is alkalmaztam (Jang, 1996), (M'Saoubi, 1999), (Kristoffersen, 2001), (Outeiro, 2002), (Withers, 2007), (Leppert, 2012), (Bhadeshia, 2013), (Vourna, 2015), (Jinkai, 2017), illetve a neutrondiffrakció (Withers, 2007), (Bhadeshia, 2013), (Vourna, 2015), (Totten, Howes, & Inoue, 2008). Mindkét módszer a rácsszerkezetben bekövetkező változásokat határozza meg. További fizikai módszer az akusztikus emissziós (Pan, 2017), mágneses tulajdonságok változásán alapuló módszerek (Ng, 1995), (Bhadeshia, 2013), (Einav, 2016), az ultrahangos módszer (Shiping, 2009), (Bhadeshia, 2013), illetve a Raman spektroszkópiát alkalmazó eljárás (Sun, 2014), (DIN EN 15305, 2009). A maradó feszültség mérési módszerein túl napjainkban elterjedten alkalmazzák a maradó feszültség számítására alkalmas végeselemes (VE) alapú eljárásokat is. Korábban az egyszerűbb, kétdimenziós módszereket alkalmazták (Kim, 1992), melyeket felváltottak a háromdimenziós eljárások (Stenberg, 2013). Stenberg és társai kimutatták, hogy a pontosabb háromdimenziós módszerek mellett a praktikusabb, kétdimenziós modelleknek is megmaradt a létjogosultsága (Stenberg, 2013).

### Maradó feszültség meghatározásának röntgendiffrakciós alapjai

A diffrakció rácson történő elhajlást jelent. Ha az anyag kölcsönhatásba lép valamilyen sugárzással, a sugárzás egy része elnyelődik (abszorbeál), egy része szóródik. Az anyag térfogatából, illetve felületéből visszaszóródó hullámok hatnak egymásra (gyengíthetik, kiolthatják vagy erősíthetik egymást), azaz interferencia figyelhető meg. Diffrakció jelenségét megfigyelhetjük akkor, ha a sugárzott hullámok szórócentrumai periodikusan helyezkednek el a térben. Diffrakció során a fotonok és az anyagot felépítő atomok elektronjai között kölcsönhatás lép fel, az elektronok berezonálnak, és a rezonancia következtében ugyanolyan hullámhosszú sugárzást bocsátanak ki magukból a tér minden irányába. Ez esetben a szóródás koherens. Ha a kibocsátott hullámhossz eltér a belépő sugárétól, inkoherens szóródásról beszélünk. A visszaszórt hullámok intenzitásának térbeli eloszlása az interferencia kép. Az interferencia kép intenzitását alapvetően meghatározza a visszaszórt hullámhossz ( $\lambda$ ), illetve a besugárzott atomsík távolság ( $d$ ). Ennek köszönhetően, meg tudjuk határozni egy adott anyag rácsát, egy ismert hullámhossz ismeretében, mert a sugárzás nem csak az anyag felületére terjed ki, hanem a térfogatára is (mikron nagyságrendű mélységig). A hullámelhajlás jelenségét a **2. ábra** mutatja. A visszaszórt hullámok teljes erősítése akkor történik, ha a mélyebb fázisokba jutó hullámok által megtett úthossz többlet megegyezik a hullámhossz egész számú többszöröseivel ( $n$ ), vagyis teljesül a Bragg – egyenlet a **2. ábra** jelölései alapján:



$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

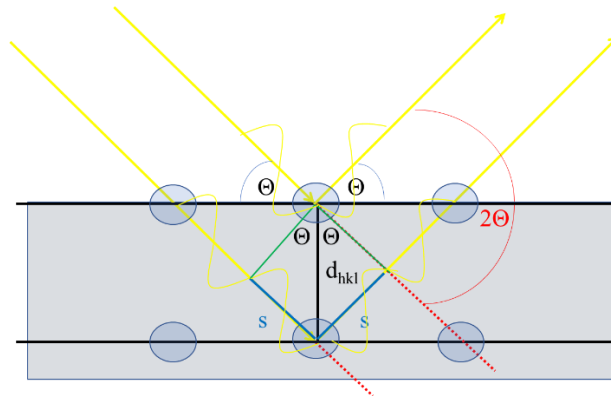
ahol:

$n$  - egész szám a reflexió rendjét jelöli,

$\lambda$  - a röntgensugár hullámhossza,

$d$  - a rácssíkok távolsága,

$\Theta$  - a diffrakció szöge.



2. ábra Hullám elhajlása kristálysíkon (Krawitz, 2001)

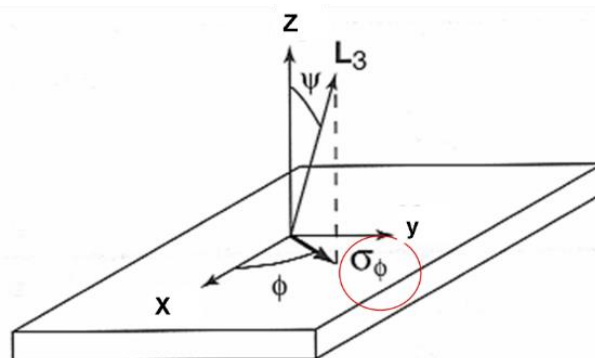
A makroszkopikus maradó feszültség a fém anyagban a fémrács rácspontjaiban elhelyezkedő fém atomtörzsek egyensúlyi helyzetből való kitérését eredményezi. Kristálytani megközelítésben ez azt jelenti, hogy változik a darab rácsparamétere. Mivel az anyagban a maradó rácsfeszültség hatására a rácssíkok távolsága megváltozik, a rácssík távolságok megváltozásának mérésével, a rugalmas konstansok ismeretében visszszámolható a feszültség. Tehát maradó feszültség meghatározásakor a mérésnél alkalmazott röntgensugárzás hullámhosszának ismeretében ( $\lambda$ ) az adott  $d_{hkl}$  rácssík távolság változás okozta Bragg-szög ( $\theta$ ) eltolódását mérjük (Bárczy, 1981), (Bhadeshia, 2013).

A 3. ábra szerint a próbadarabon a tetszőlegesen választott  $\sigma_\phi$  irányú feszültség meghatározásakor abba a problémába ütközünk, hogy direkt módon nem lehet megmérni az ilyen irányú rácstorzulást. Ahhoz, hogy az ilyen irányú feszültséget mérni tudjunk, az úgynevezett  $\sin^2\psi$  módszert kell alkalmaznunk. A módszer lényege, hogy a kiválasztott síksorozat távolságának változását az 3. ábra szerint  $Z$  illetve azzal  $\psi$  szöget bezáró  $L3$  irányból ( $d, d\psi$ ) határozzuk meg. A  $d, d\psi$  értékek, valamint a vizsgált anyag rugalmassági modulusa ( $E$ ) és Poisson-száma ( $\nu$ ) ismeretében a keresett irányú feszültség számítható (Bárczy, 1981), (Krawitz, 2001):

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

Méréstechnikailag ez azt jelenti, hogy egy adott pont feszültség értékének a meghatározásához minimálisan két irányba kell a diffrakciós profilt felvennünk, ami vagy a minta, vagy a berendezés  $\Psi$  szögének döntésével valósítható meg. Konvencionális diffraktométerek Euler bölcső alkalmazásával a mintadarabot döntik, jellemzően csak egy irányba. A központ nélküli diffraktométerek esetében a diffraktométer „feje” dől, a minta mozdulatlan marad. Könnyű belátni, hogy az utóbbi esetben nincs geometriai és mintaméret korlát a vizsgálat során. A döntés iránya akár tetszőleges is lehet, ezzel jóval nagyobb lehetőséget ad a vizsgálat elvégzésére.

Kutatómunkám során az utóbbi, kimondottan maradó feszültség és maradék ausztenit mérésére kifejlesztett központ nélküli diffraktométert használtam.



3. ábra A  $\sigma_\phi$  irányú feszültség meghatározása (Krawitz, 2001)

### 3. Indukciós edzés fémfizikai folyamatai és hatása a maradó feszültség állapotra

#### Indukciós hevítés elméleti háttere

Ha egy elektromos vezetőre – tekercsre, ami egy felcsévált spirál alakú vezető – váltóáramot kapcsolunk, változó mágneses tér jön létre a tekercs körül. Ez a mágneses tér, melynek időbeli változása a frekvenciától függ, örvényáramokat kelt a tekercs mágneses terébe elhelyezett fémbe. Az örvényáramok hatására elektromos áram kezd folyni a fémdarab tekercshez közeli felületén. Ennek az indukált áramnak azonos a frekvenciája a tekercsben folyó áraméval, miközben iránya ellentétes azzal. Ez az áram biztosítja a darab felmelegedését, melyet Joule-hőnek nevezünk (3) (Mika, 1991).

$$Q_w = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (3)$$

ahol:

U – feszültség [V]

Q – az átáramló töltés

W – vezetőben fejlődő hő (Joule hő)

I – áramerősség [A]

R – a vezető ellenállása

t – az áramáthaladás ideje

A hiszterézis veszteség csak a Curie-pontig lép fel. A permeabilitása a melegítendő anyagnak hideg állapotában igen magas, majd a hevítés hatására jelentősen lecsökken.

A lényeges különbség a más típusú hevítési, izzítási eljárások és az indukciós hevítés között az, hogy az anyag indukcióval történő melegítéskor az összes hőmennyiség a munkadarabban jön létre (Eckstein, 1976).

A különböző fajta hőkezelésekkel átvihető teljesítményt az **1. táblázat** foglalja össze.

**1. táblázat, Néhány átvihető teljesítmény adat fémekre vonatkozóan különböző melegítési módszerrel (Eckstein, 1976)**

Hőátadás, hőképzés fajtája	Teljesítmény nagyságrendje, W /cm <sup>2</sup>
Konvekciós	0,5
Sugárzásos	10
Kontakt	20
Láng	1000
Indukciós	15000

A táblázatból jól látható, hogy az indukciós hevítéssel a kívánt hőmérséklet jóval hamarabb elérhető, mint a hagyományos hevítési módszerekkel.

Elektromágneses tér kialakulására vonatkozó alaptörvényeket a Maxwell egyenletek írják le, A négy egyenletet James Clerk Maxwell állította fel, hogy leírja mind az elektromos, mind a mágneses tér viselkedését, valamint kölcsönhatásukat az anyaggal (Wikipedia, 2019):

1. Az elektromos tér forrásos, azaz elektromos töltés jelenlétében erővonalak indulnak a pozitív töltésekről, melyek a negatív töltéseken végződnek. (Gauss-törvény)

$$\oint D \cdot dA = \int_V \rho \cdot dV = Q \quad (4)$$

2. A mágneses indukció változása elektromos teret indukál, melynek iránya ellenkező, mint az őt létrehozó változás. (A Lenz-törvény és Faraday indukciós törvényének egyesítése)

$$\oint_L E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \int_A B \cdot dA \quad (5)$$

3. A mágneses tér forrásmentes, azaz a mágneses tér erővonalai önmagukba záródnak. (Gauss mágneses törvénye)

$$\oint_A B \cdot dA = 0 \quad (6)$$

4. Az elektromos áram, illetve a folytonossági egyenlet kielégítéséből adódó eltolási áram mágneses teret hoz létre. (Ampère - törvény Maxwell kiegészítésével)

$$\oint_L H \cdot dl = \int_A j \cdot dA + \frac{d}{dt} \int_A D \cdot dA \quad (7)$$

Indukciós hevítéskor e fizikai alaptörvényeken alapuló hatások mind a fémes vezető - jelen esetben acélrúd – hőmérséklet növekedését eredményezi.

### Fémek fajlagos ellenállása

Valamely egyenletes keresztmetszetű fémvezető R ellenállása egyenletesen arányos annak L hosszúságával és fordítva arányos S keresztmetszetével. Az ellenállás ezenkívül függ a vezető anyagának  $\rho$  – fajlagos ellenállásától illetve a  $\gamma$  –fajlagos vezetőképességétől is:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{L}{S} \quad (8)$$

ahol:

R – elektromos ellenállás [ $\Omega$ ]

L – vezető hossza [m]

S – a vezető keresztmetszete [m<sup>2</sup>]

$\rho$  – fajlagos ellenállás [ $\Omega$ m]

A  $\rho$  fajlagos ellenállás mérőszámaként a kérdéses anyagból készült 1 cm oldalélű kockának ohm-ban mért ellenállását használjuk  $\Omega\text{m}$  egységekben kifejezve.

Azok a fémek, melyek fajlagos ellenállása  $10^4 \text{ n}\Omega\text{m}$ -nél kisebb jó vezetők, a  $10^{12} \text{ n}\Omega\text{m}$ -nél nagyobb fajlagos ellenállásút szigetelőnek nevezzük.

A jól vezető fémek fajlagos ellenállása melegedéskor növekszik. A változás jellemzésére az egy ohm ellenállású vezető ellenállásának  $1^\circ\text{C}$  melegedéssel járó növekedését, az ellenállás együtthatóját  $\alpha$ -t használjuk:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (9)$$

ahol:

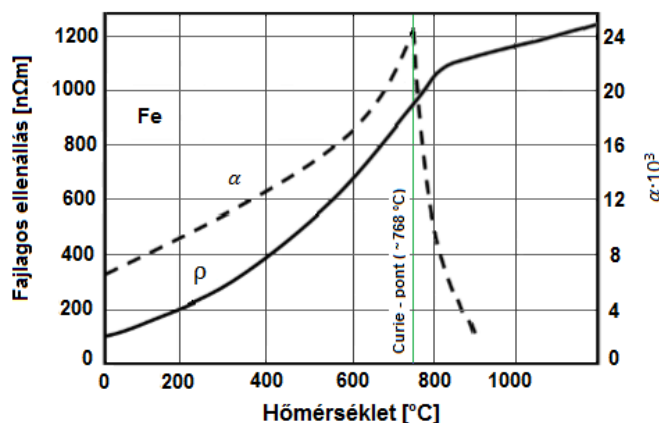
$R_0$  és  $\delta_0$   $0^\circ\text{C}$ -on érvényes értéket jelentenek.

A kifejezések rendezése és integrálása után lineáris összefüggéseket kapunk.

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t) \quad (10)$$

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (11)$$

A lineáris egyenletek azonban legfeljebb  $t=100^\circ\text{C}$ -ig használhatók, mert az  $\alpha$  – tényező a hőmérséklet hatására szintén változik. A ferromágneses fémek ellenállásának hőmérsékleti együtthatója, a Curie-pontnál kisebb hőmérsékleten ennél jóval nagyobb ( $6 - 9 \cdot 10^{-3}$ )  $1/^\circ\text{C}$ . Ezeknek a fémeknek az ellenállása tehát a paramágneses állapotukban erősebben változik, mint a jól vezető fémek esetében, azonban a Curie-pontnál nagyobb hőmérsékleten a változás az egyéb fémekéhez hasonló mértékű (4. ábra).



4. ábra A vas fajlagos ellenállásának változása a hőmérséklet függvényében (Verő J. K., 1977)

A Curie-pont hőmérsékletén az ellenállást feltüntető vonalon irányváltás következik be, amit a hőmérsékleti együttható görbéjén jelentkező csúcsherű maximum még élesebben mutat.

Az allotróp átalakulás a villamos ellenállás vonalán nem okoz töréspontot vagy irányváltást, amit a 4. ábra is jól szemléltet. Ez is azt bizonyítja, hogy a vezetőképesség nem a kristályok szerkezetétől, hanem az atomok elektronkészletének rendjétől függ (Verő J. K., 1977).

## Skin hatás

Ellentétben egy egyenárammal átjárt elektromos vezetővel ahol az áramsűrűség homogén az elektromos vezető egész keresztmetszetében, a váltóáram esetében a frekvencia növekedésével az áram egyre inkább a vezető felületéhez közelebb igyekszik folyni. Az áramsűrűség maximális értéke mindig a vezető felületi részére központosul, és az értéke a vezető belseje felé fokozatosan csökken. Az áramnak ezt az egyenlőtlen keresztmetszet menti eloszlásának jelenségét nevezzük Skin hatásnak. Az áramsűrűség eloszlása a darab keresztmetszetében a következő képlet segítségével számítható ki:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (12)$$

ahol:

$I_x$  - az áramsűrűség a felülettől  $x$  távolságra [A/m<sup>2</sup>]

$I_0$  - az áramsűrűség a munkadarab felületén [A/m<sup>2</sup>]

$x$  - a távolság a munkadarab felületétől a belseje felé [m]

$\delta$  - behatolási mélység [m]

A behatolási mélység

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{f \cdot \mu}} \sim 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \text{ [mm]} \quad (13)$$

ahol:

$\rho$  = a fém fajlagos ellenállása [ $\Omega$ m]

$\mu_r$  = relatív mágneses permeabilitás

$f$  = frekvencia, [Hz]

Az egyenletből (13) látható, hogy a frekvencia növekedésével a behatolási mélység csökken (Eckstein, 1976).

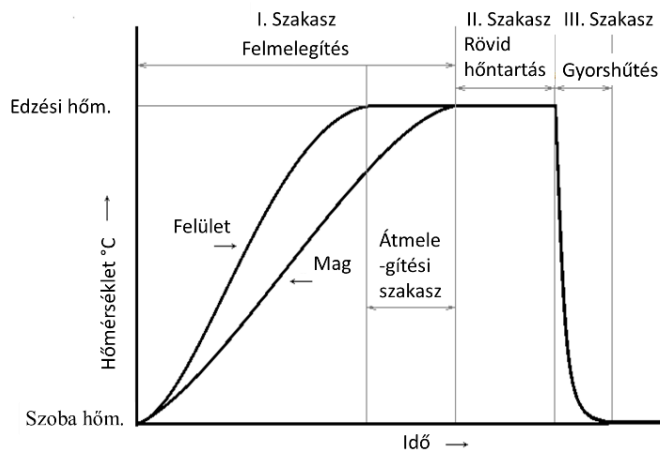
A gyakorlatban a **2. táblázatban** feltüntetett frekvencia tartományokat alkalmazzák acél indukciós edzésénél, ahol az acélt körülbelül 850 °C –ra hevítik.

**2. táblázat A behatolási mélység a frekvencia függvényében**

	Frekvencia	Behatolási mélység
Magas frekvencia	400 – 2500 kHz	1 – 0,4 mm
Középfrekvencia	3 – 10 kHz	8 – 5 mm
Magas- Impulzus frekvencia	27 MHz – Ipari frekvencia	0,1 mm

## Nemesítés fémtani folyamatai

A nemesítés fogalma alatt egy kombinált hőkezelési formát értünk, mely ausztenitesítésből edzésből és megeresztésből áll. Ez utóbbit az edzés során kialakult magas szilárdsági paraméterek mellé társuló alacsony szívósság növelése érdekében alkalmazzák (Volker, 2010). Az edzés alatt egy olyan hőkezelési folyamatot értünk, melynél az ausztenitesítési hőmérséklet elérése és hűntartása után egy jellemzően gyors hűtés következik. Ennek a hűtésnek olyan sebességűnek kell lennie, hogy a martenzites átalakulás végbe tudjon menni akár a darab teljes keresztmetszetében is (**5. ábra**).



5. ábra A hőmérséklet és idő viszonya az edzésnél (Volker, 2010)

Az acél edzhetőségének általános feltételei a következők:

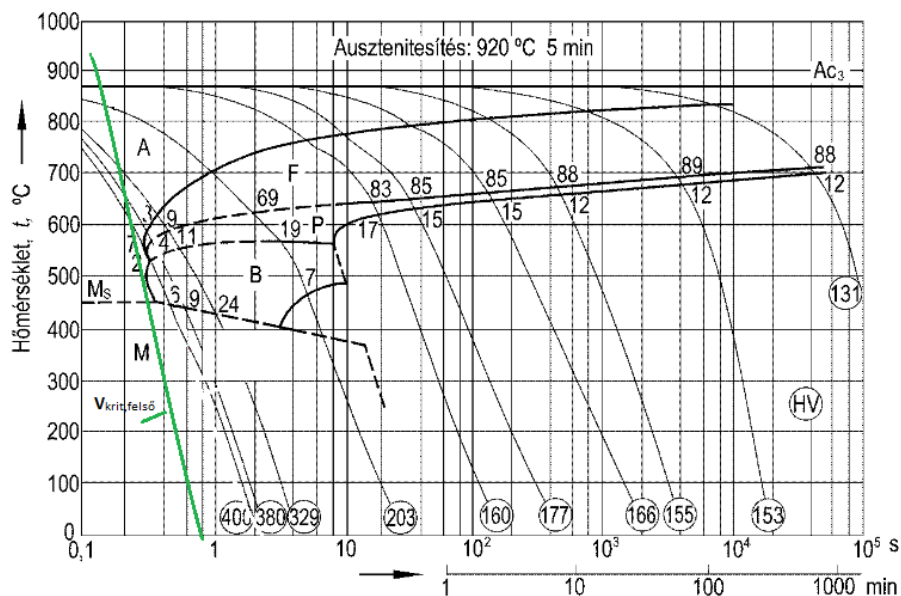
1. ausztenítés (hevítés  $T > A_{c3}$ )
2. hűtés (felső kritikus)  $v_{krf}$ -nél nagyobb sebességgel
3. karbon tartalom  $C > 0,20\%$

Az edzést három hőkezelési szakaszra bonthatjuk. A felmelegítés szakaszban a vas felületen középpontos allotróp módosulata, az ausztenit alakul ki a kívánt edzési hőmérsékletre történő hevítés során a teljes keresztmetszetben. Az edzési hőmérséklet függ az acél típusától, ötvözőitől, és a hevítés módjától is. Folyamatos gyártási soron (indukciós edzés) nagyobb edzési hőmérsékletet alkalmaznak, mint a konvencionális módszernél, mivel kevesebb idő áll rendelkezésre az ausztenit kialakulásához. A hőntartási szakaszban a karbidok teljes keresztmetszetben történő oldódása, és az ausztenit karbon tartalmának kiegyenlítődése zajlik. Egy (ötvözetlen) acél az ausztenites állapotból való hűtése során a felületen középpontsból térben középpontos kockarácscsá alakul. A hűtési sebességtől függ, hogy ez diffúziós vagy átbillenéses átalakulással történik-e. Az alsó és felső kritikus hűtési sebesség közötti hűtés alkalmazásakor az ausztenitből martenzit is kialakul, egyéb szövetelemek mellett. A felső kritikus hűtési sebesség felé haladva, növekszik a martenzit mennyisége. A felső kritikus hűtési sebességtől nagyobb hűtési sebesség esetén csak diffúziómentesen, martenzitesen történik az ausztenit átalakulása. (Pontosításként: az acélokban a martenzites átalakulás soha nem teljes, mindig számolni kell maradék ausztenittel is.) (Volker, 2010), (Haimbaugh, 2006)

A megfelelő edzési hőmérsékletet és a kívánt keménység eléréséhez szükséges hűtési sebességet az acél fajtájának és összetételének függvényében, a folyamatos hűtésre vonatkozó átalakulási diagramból olvashatjuk le (6. ábra).

Nagy intenzitású hűtés esetén, ahol a karbon és vas atomok diffúziója nem lehetséges, martenzit szövetelem alakul ki. A martenzites átalakulás nem diffúzióval, hanem rácsátbillenéssel megy végbe. Azt a hőmérsékletet, ahol az ausztenit effajta átbillenéssel (kooperatív atommozgással) alakul át,  $M_s$  – martenzit start hőmérsékletnek nevezzük. Ez az átalakulás az  $M_f$  – martenzit finish hőmérsékletig tart. Az ilyenfajta átalakuláshoz tartozó kezdő hőmérséklet ( $M_s$ ) lényegesen alacsonyabb, mint a ferrit vagy bainit kialakulásához szükséges hőmérséklet. A  $M_s$  és  $M_f$  hőmérsékletek az acél karbon tartalmától függenek. A ferrit karbon oldóképessége lényegesen

kisebb, mint az ausztenité. Mivel a martenzites átalakulás diffúziómentesen megy végbe, az ausztenitből karbonban túltelített ferrit jön létre. Az acélban interstíciósan jelenlévő karbon atomok a korábban felületen középpontos rácsból a sokkal szűkösebb térben középpontos kristályrácdba kényszerülnek. Ez a kényszerállapot vezet az eredetileg köbös szerkezet tetragonálissá torzulásához. Így alakul ki a martenzit rácsszerkezete, tetragonális térben középpontos elemi cellával. Az előbb leírtakból következik, hogy átalakulás során jelentősen növekszik a rácsfeszültség és a rácshibák száma. (Volker, 2010), (Rudnev & Totten, ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment, 2014).



6. ábra 0,15%-os C-tartalmú hipoeutektoidos acél folyamatos lehülési diagramja (Nyíregyházi Főiskola, 2016)

Ebből adódóan az edzett acél nagyon kemény és rideg. Ilyen állapotban lévő acélok nem csak a nagy keménységük és ridegségük miatt alkalmatlanok a további megmunkálásra, felhasználásra, hanem a nagy visszamaradó feszültségük miatt – ha ki is lehetne munkálni a darabot – nem alak és mérettartóak. A megeresztéssel az edzett acélt, a nem egyensúlyi állapotú martenzites szövetszerkezetből egy egyensúlyihoz közelebb, stabilabb állapothoz juttatjuk. Ezért az edzést mindig valamilyen hőmérsékletű „utóhőkezelés” megeresztés követ.

Megkülönböztetünk: I. (100°C – 200°C), II. (200°C – 320°C), III. (320°C – 400°C) és IV. (400°C – Ac1) hőmérsékletű megeresztést (Volker, 2010).

Az I. Megeresztési fokozat (100 – 200 °C) alkalmazása esetén a megeresztés célja az acél ridegségének és a martenzit rác feszültségének bizonyos mértékű csökkentése, a kristályrác feszültségmentesítése. A tetragonális martenzitből egy kevésbé torzult köbös martenzit jön létre. A kényszerállapotból kiszabaduló karbon atomok a legfinomabb – csak elektronmikroszkóppal látható –  $Fe_xC$   $\epsilon$ -karbidot alkotják. Magasabb karbontartalmú acélok esetén az ún. átmeneti karbidok ( $Fe_2C$  -  $\eta$ -karbid) és  $Fe_{2,5}C$  ( $\chi$ -karbid) keletkezhetnek. Ezen folyamatok 100°C alatt is végbe mehetnek. Az alacsony karbontartalmú acélok esetén (0,2 % karbontartalom alatt) 100 – 200°C között az  $\epsilon$ -karbid képződése még nem indul meg, mert a karbon atomok a torzult rácban, diszlokációk környezetében energetikai szempontból kedvezőbb helyzetben vannak, mint az  $\epsilon$ -

karbid képződése esetén. Az acél keménységéből nem, vagy csak kis mértékben veszít, ridegsége csökken.

A II. Megeresztési fokozat ( $200^{\circ}\text{C} - 320^{\circ}\text{C}$ ) alkalmazása esetén  $200^{\circ}\text{C}$  felett a beékelődött karbon atomok mozgása a martenzit kristályban fokozatosan növekszik, a karbidképződés fokozódik és az esetlegesen megmaradt ausztenit lebomlik. A  $250^{\circ}\text{C}$  és  $400^{\circ}\text{C}$  közötti hőmérséklet tartományt általában kerüljük, mert az acélokban ez a hőmérsékleti tartomány ridegedéshez vezethet.

A III. Megeresztési fokozat ( $320^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ ) alkalmazása esetén minden karbon atom gyakorlatilag a kényszerállapotot elhagyni igyekszik. A tetragonális martenzit karbontartalma egy bizonyos szintig fokozatosan csökken, elszegényedik, majd végül ferrité alakul. Az acél végezetül ferritből és az abba beágyazódott finom cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) szemcsékből áll, melyek a fénymikroszkóp alatt jól láthatók. A martenzitből származó tús szövetszerkezet – legalábbis rövid hőntartási idő esetében – nem változik. Ennél a megeresztési fokozatnál is, bizonyos acéltípusok esetében ridegedés léphet fel.

A IV. Megeresztési fokozat ( $400^{\circ}\text{C} - A_{C1}$ ) esetében az ötvözetlen acéloknál már nem eredményez jelentős szövetszerkezeti változásokat. A ferrit mátrixban elsősorban a még finom eloszlású cementit kiválások nagyobb szemcsékké állnak össze. A szövetszerkezet fokozatosan a lágyított állapothoz közelít.  $550^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$  között az újrakristályosodás oldja fel végül fokozatosan a tús martenzites szerkezetet. Legvégül a szövetszerkezet egy ferrites alapmátrixba beágyazódott karbidokból áll.

Ötvözött acélok esetén a megeresztés jellemzően másként hat. Az ötvözött acélokat nagyban befolyásolják az ötvöző elemek, ezért a megeresztésük eltér az ötvözetlen acélokétól. A megeresztési hőmérséklet tartományok eltolódnak, a megeresztési hőmérséklet növekedésének hatására keménységük kevésbé csökken. Az ötvözőfém karbidok képződése a keménység növekedéséhez és másodlagos keményedéshez vezethet. A megeresztésnél az ötvözött acélok viselkedését legfőképpen az ötvöző elem fajtája határozza meg. Tekintettel az ötvöző elemek hatására, különbséget kell tenni a nem karbidképző és karbidképző elemek között (Volker, 2010).

### **Indukciós edzés hatására létrejövő maradó feszültség**

A maradó feszültség megléte a munkadarabban az indukciós hőkezelés alatt torzulást, repedéseket idézhet elő az izzítási és gyors hűtési szakaszban. Rengeteg kérdés született, hogy mi okozhatja ezeket a hatásokat és a válasz nagyon sokrétű. A munkadarab felületén kialakuló nyomó-, illetve húzófeszültségek lehetséges okokat a 3. táblázat foglalja össze egy általános gyártási folyamat során (Haimbaugh, 2006).

Mint a táblázatból is látható, a hőkezelés mind nyomó- és mind húzófeszültség kialakulásához vezethet, mely méretváltozást, méret deformációt és végső esetben repedést is eredményezhet. Amennyiben repedés nem alakul ki az még nem jelenti a probléma nélküli állapotot, mivel a munkadarab további megmunkálásával megbontják az addigi egyensúlyi feszültség állapotot, mely újra a darab méret deformációjához vezethet. A maradó feszültség csökkentésének a szükségességét az is indokolja, hogy megszűnjön a megmunkálás alatt történő méretváltozás veszélye. Felületi nyomó maradó feszültség esetén egy kedvező állapot alakul ki, melynek előnye,

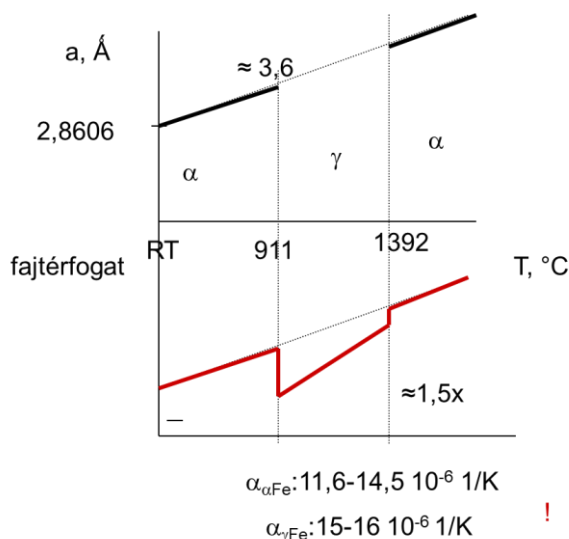


hogy megnöveli a kifáradási ellenállást és az alkatrészt az edzés közbeni repedés kialakulásával szemben ellenállóbbá teszi. A húzó maradó feszültség a felületen általában nem kívánatos, mert nagymértékben növeli a repedés keletkezésének valószínűségét, tehát akár kifáradási hibához, edzési repedéshez, csiszolási problémákhoz vezethet, ezáltal csökkenti a darab élettartamát (Haimbaugh, 2006).

3. táblázat A maradó feszültség létrejöttének lehetséges okai (Haimbaugh, 2006)

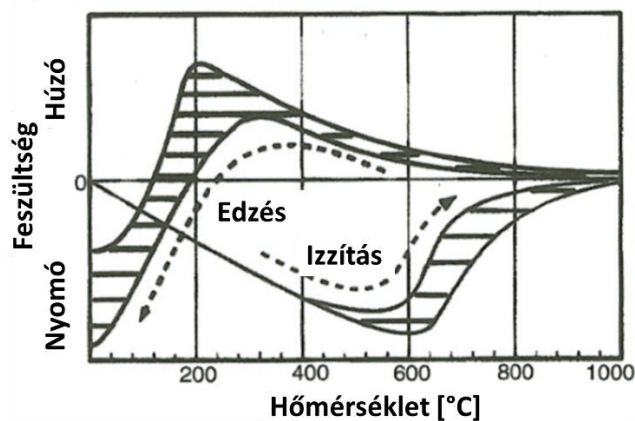
Nyomófeszültség a felületen	Húzófeszültség a felületen
Felületi megmunkálások	Rúd vagy cső hengerlése
Rúd vagy cső hengerlése	Hengerlés
Préselés	Kovácsolás
Finom csiszolás	Préselés
Kalapálás	Durva csiszolás
Fázis átalakulás nélküli hűtés	Acél dekarbonizáció
Acélok felületi edzése	Hegesztés
Indukciós vagy láng edzés	Esztergálás / marás, lángvágás
Ion csere	Edzés

Az edzés során kialakuló mechanikai feszültség alapvetően két okra vezethető vissza a fázisátalakulásra és a hőmérséklet különbségből eredő méretváltozásra, melyet szematikusan a 7. ábra foglal össze. Mindkét ok kifejti hatását mind melegítés mind hűtés során. A ferrit-ausztenit-ferrit allotróp átalakulás során jelentős sűrűség változás történik, illetve a két fázis hőtágulási együtthatója is jelentősen eltér egymástól. Amennyiben hűtés közben edzés történik és az allotróp átalakulás egy karbon túltelítettséggel is társul a martenzites szövet kialakulása során, egy újabb feszültség forrás képződik. Mivel e folyamatok kialakulása mind időben és térben jelentősen eltérhet, ezért a kialakuló végső feszültség állapotban is jelentős különbségek adódhatnak.



7. ábra Vas termikus dilatációja és az allotróp módosulatok hőtágulásának ( $\alpha_{\alpha\text{Fe}}, \alpha_{\gamma\text{Fe}}$ ) különbözősége

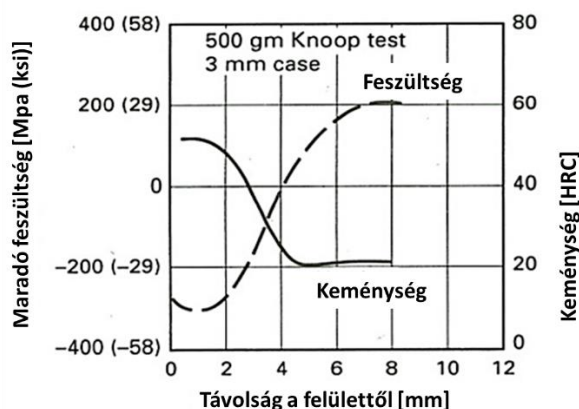
Hűlés közben a darabban a fázisátalakulás nem egyenletesen történik, a felület közelében alakul ki először a martenzites szövetszerkezet. A létrejövő feszültség szintje, függ a rugalmassági modulustól, a hőmérsékleti koefficiensről és az anyag méretváltozásától. Köracél munkadarabban az izzítást követő gyors hűtés hatására létrejövő esetleges feszültségeket a 8. ábra mutatja.



8. ábra A feszültségek lehetséges kialakulása egy karbon köracél felületén izzítás és gyors hűtés alatt (Rudnev & Totten, ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment, 2014)

A szöveti gradiens mellett mindig számolni kell egy termikus gradienssel is. De nem csak hűlés, hanem indukciós hevítés esetében is fennáll a felülettől a mag irányába történő hővezetés és ebből adódó hőmérséklet különbség. A hevítés mértéke és az átvitt hőmennyiség meghatározza a hőmérséklet miatt létrejövő feszültségeket, melyek a hevítést követően a gyors hűtés hatására is létrejönnek. Alacsonyabb hőmérséklet és kisebb intenzitású hűtés mellett, kisebb feszültségek alakulhatnak ki. A hevítésnek kisebb hatása van a maradó feszültségre, kivéve amikor a húzófeszültség szintje nagyon magas az alkatrész belsejében, és a külsején a nyomófeszültség lecsökkent az utólagos képlékeny alakváltozáson keresztül, így a belsejében megmarad a húzófeszültség mely elég nagy ahhoz, hogy az alkatrész repedéséhez, ezzel annak tönkremeneteléhez vezessen. Az indukciós nagysebességű izzítás már melegítéskor is repedéseket okozhat a hengerelt acélrúd termékekben, amikor a rúdban lévő feszültség szintek túl nagyok, nem egyenletes eloszlásúak, valamint a magban még mindig nagy húzófeszültségek vannak jelen. Így érthető, hogy a darabok indukciós edzése során, a hevítést és rövid idejű hőntartást követő hűtés közben különböző, változatos feszültség állapotok alakulnak ki. Ha a darabok edzése elég gyorsan történik, akkor a maghőmérséklet nem olyan magas, a mag kevésbé van hatással a felszíni feszültségekre. Ha a darab teljes keresztmetszetben átizzított, így a maghőmérséklete melegebb, a gyors hűtés közben nagyobb a termikus méretváltozás, melynek jelentős hatása lehet a darabban kialakult feszültségekre. A végső maradó feszültség eloszlása az indukciós hevítésnél még bonyolultabb, ha fázisátalakulás miatt martenzit is létrejön (Haimbaugh, 2006).

A 9. ábra mutatja a feszültség változását az indukciósan edzett és megeresztett darabban. Az ausztenit martenzitté alakulása során körülbelül 4 % - os térfogat növekedés lép fel. A terület, amely martenzites, megpróbál méretileg növekedni, eközben a mag hűlésével nyomófeszültség keletkezik. Ez a hatás csökken, ha a felület és a mag között kisebb a hőmérséklet különbség (Haimbaugh, 2006).

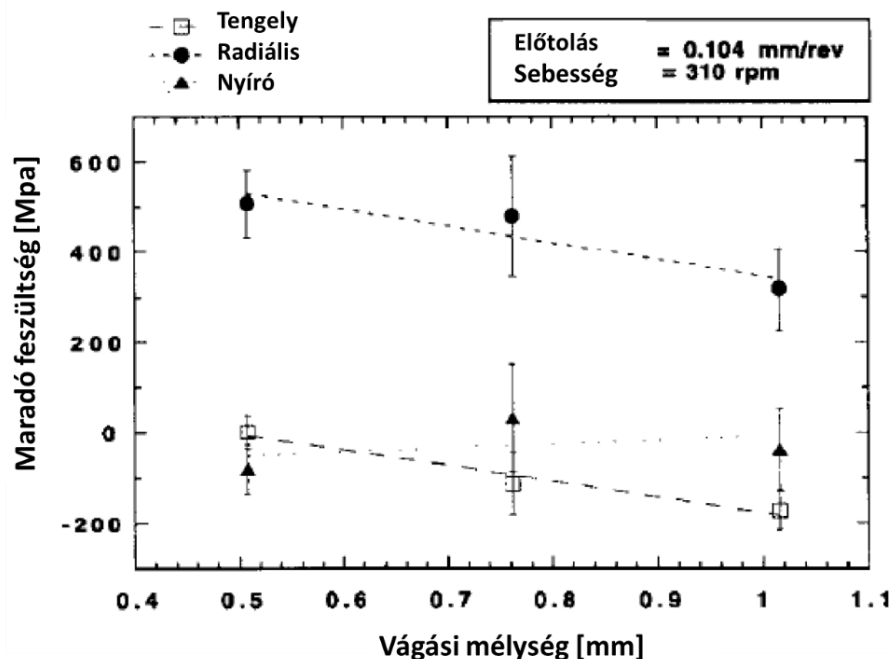


9. ábra Tipikus keménység és maradó feszültség eloszlás, indukciósan felület edzett (körülbelül 3 mm mélységig) és 260 °C – on megeresztett 1045 acél esetében (Haimbaugh, 2006)

Az indukciós edzés után a darabban nyomófeszültség alakulhat ki a felszínen, mialatt martenzit keletkezik a darab széléhez közeli részen. A nyomófeszültségek kialakulása függ az edzés fajtájától és a hűtés közben létrejövő egyéb feszültségektől. A nyomófeszültség nagysága hatékonyan növeli a folyáshatárt, lehetővé téve egy nagyobb fárasztási terhelést. Meg kell említeni, hogy van egy éles átmenet a húzó állapottól az átmeneti zónáig az edzett rész és nem edzett mag között (Kim, 1992). Néhány eljárásnál előmelegítik a darabot, hogy megnöveljék a mag hőmérsékletét, majd ezt követően izzítják a darabot az eredeti izzítási hőmérsékletre, így növelve a nyomófeszültséget a felszínnél, miközben a húzófeszültséget nagymértékben csökkentik a felület alatt. Mialatt a nyomó maradó feszültség a felszínen előnyös, a legnagyobb húzó maradó feszültség épp az edzett rész alatt helyezkedik el. Ez egy potenciálisan veszélyes zóna, mert itt van a legtöbb felszín alatti repedés. Ez a darab elridegését eredményezi, amely az alkatrész élettartamát, megbízhatóságát nagymértékben csökkenti. Az edzést követő megeresztés elengedhetetlen, mellyel mind a mechanikai tulajdonságok (nyúlás, folyáshatár, keménység, megmunkálhatóság) kedvezően befolyásolhatók, mind a maradó feszültség értéke nagymértékben csökkenthető, ideális esetben akár teljesen megszüntethető. Az olyan darabok esetében, ahol a felszín alatti nyomófeszültség fontos, csiszolás vagy egyéb megmunkálás után is meg kell vizsgálni a feszültségeket (Haimbaugh, 2006).

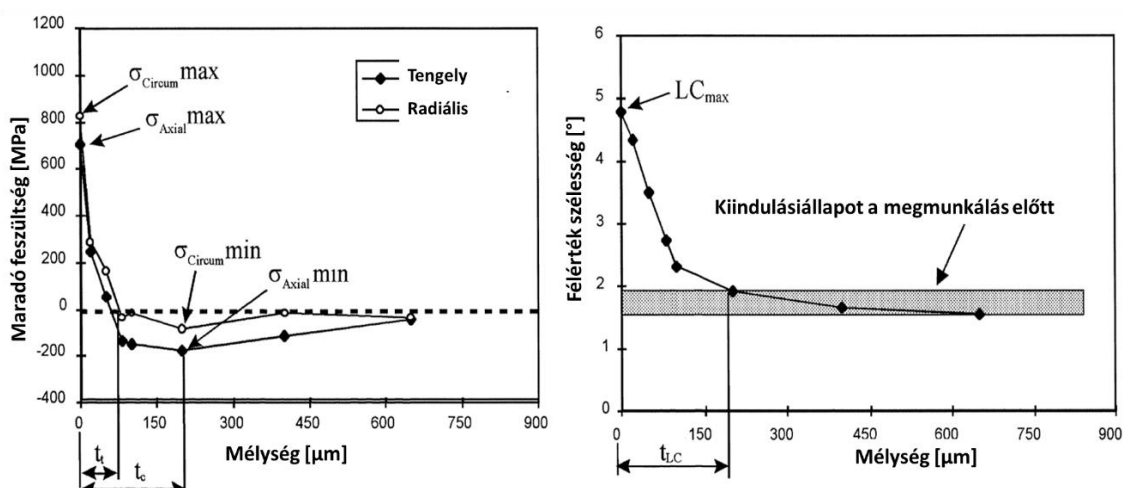
#### 4. Rúdszerű autóiipari előgyártmányok maradó feszültsége

A szakirodalomban számos publikáció foglalkozik rúdszerű, acél félkésztermékek maradó feszültségének meghatározásával. A megmunkálási fázisok közül az esztergálás (hántolás) a kritikus, ezért a legtöbb szakmai cikk erre a megmunkálásra fókuszál. Jang és társai AISI 304 típusú acélon végeztek maradó feszültségmérést röntgendiffrakciós módszerrel. A főfeszültségek az esztergált rúd tengelyéhez viszonyított tangenciális és axiális irányokban léptek föl, a többi feszültségkomponens elhanyagolható volt. Méréseik szerint tangenciális irányban húzó (600 MPa), míg axiális irányban ettől kisebb nyomófeszültség ébredt. A vágási mélység növelése a nyomófeszültségek fele tolja a felületen mért tangenciális és axiális feszültségeket (10. ábra) (Jang, 1996).



10. ábra A vágási mélység és a különböző irányú maradó feszültség viszonya hántoláskor (Jang, 1996)

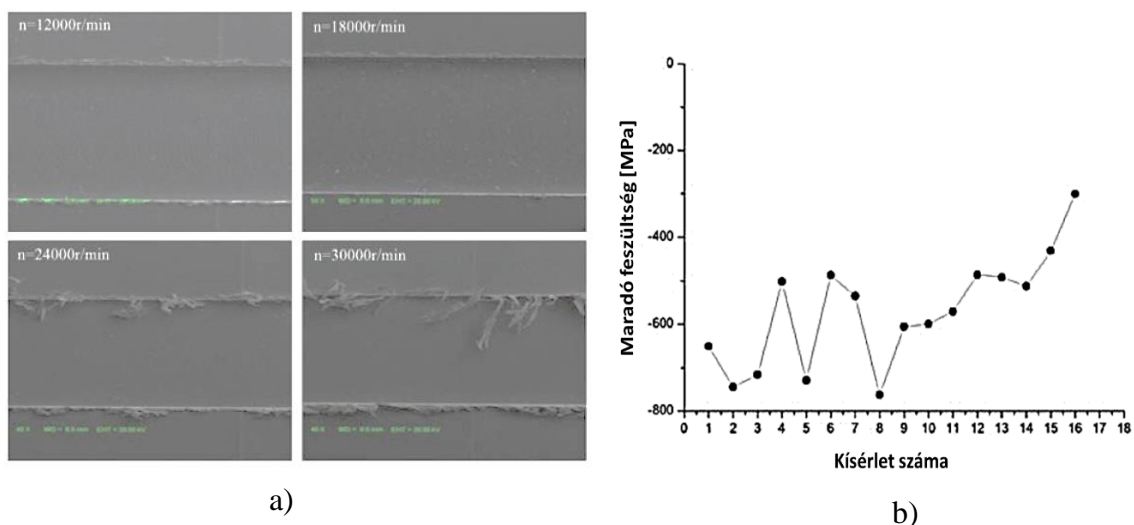
Sauobi és társai mélyégi feszültségeloszlás profilt mértek röntgendiffrakcióval AISI 316L típusú acélon. Méréseik szerint a húzófeszültséggel terhelt réteg vastagsága 50-150  $\mu\text{m}$ , illetve a felületen mért húzófeszültség mértéke 700-950 MPa a tangenciális irányban, axiális irányban ettől valamivel kisebb (11. ábra). Ezen túl kimutatták, hogy a maradó feszültségek értéke erősen függ az esztergálási sebességtől. Nagyobb sebességhez kisebb rétegvastagság, de nagyobb húzófeszültség társult. Az előtolás növelése azonban növelte a rétegvastagságot. Szerintük a nagy felület közeli feszültség forrása a forgácsolás okozta hőtermelődés (közel 900°C) (M'Saoubi, 1999). Az Outeiro által összefoglalt irodalmak is ilyen összefüggésről számolnak be (Outeiro, 2002).



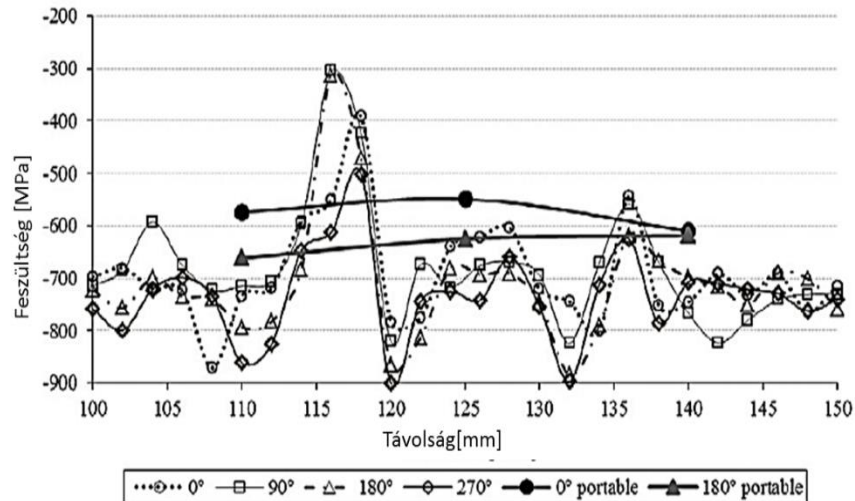
11. ábra Tipikus maradó feszültség és félérték szélesség mélyégi eloszlás esztergálás után (M'Saoubia, 1999)

Kristoffersen és társai XStress 3000 típusú központ nélküli röntgendiffraktométerrel (amelyet én is használtam munkám során) különböző átmérőjű hengeres acélokon mértek maradó feszültséget. A mérést elvégezték edzett (QT), illetve normalizált, majd esztergált próbatesteken. Ők ~300 MPa húzófeszültséget mértek mind a tangenciális, mind az axiális irányokban. Ezután a darabokat indukciósan nemesítették, majd ismét elvégezték a méréseket. Indukciós edzés után -400 MPa nyomófeszültséget mértek az átedződött rétegben mind tangenciális, mind axiális irányokban. Szerintük az indukciós edzés után mért feszültségérték az edzés, az esztergálás és az indukciós edzés szuperpozíciója. (Kristoffersen, 2001).

Outeiro és társai AISI 316L típusú acélon végeztek méréseket röntgendiffrakciós technikával. Eredményeik szerint a felületen tangenciális irányban húzófeszültség ébred, amely átmegy nyomóba a felület alatt, míg axiális irányban nyomófeszültség ébred, amely fokozatosan lecsökken az anyag belseje felé haladva. Megállapították, hogy a vágási sebesség, illetve a vágási mélység növelése a nyomófeszültségek fele tolja a felületen mért tangenciális és axiális feszültségeket, míg az előtolás növelése a húzófeszültségek irányába (Outeiro, 2002) hat. Sharman és társai INCONEL 718 ötvözetten vizsgálták az esztergálás paramétereit és a maradó feszültség közötti összefüggést lyukfúrásos módszerrel. Kimutatták, hogy a felület közeli ~50  $\mu\text{m}$ -ben húzófeszültség ébred, amely mértéke főként az esztergakés minőségétől (új, használt) függ. Ez alatt jelentős nyomófeszültségeket mértek (-1200 ... 0 MPa) mind tangenciális, mind axiális irányokban. Egyes paraméterek mellett előfordult, hogy axiális irányban csak nyomófeszültségek ébredtek (Sharman, 2006). Outeiro és társai ugyanilyen feszültség profilt számoltak végeselemes módszerrel mind tangenciális, mind axiális irányokban (Outeiro, 2002). Leppert és társai a kenőanyag hatását vizsgálták AISI 316L acél forgácsolása során. A felület közeli feszültségeket röntgendiffraktométerrel mérték a vágási sebesség és az előtolás függvényében. Kimutatták, hogy a felület közeli feszültségeknek a vágási sebességtől, előtolástól és vágási mélységtől való függését az alkalmazott kenőanyag erősen befolyásolja (Leppert, 2012). Xu és társai egy lényeges dologra hívják fel a figyelmet. Mikro megmunkált 7075 alumínium és Cr18Ni9 acél alapanyagon kimutatták, hogy a megmunkálás során keletkezett hornyok közötti anyagsávokban eltérő feszültségek ébrednek, melyek közt akár 400 MPa különbség is lehetséges (12. ábra) (Jinkai, 2017).



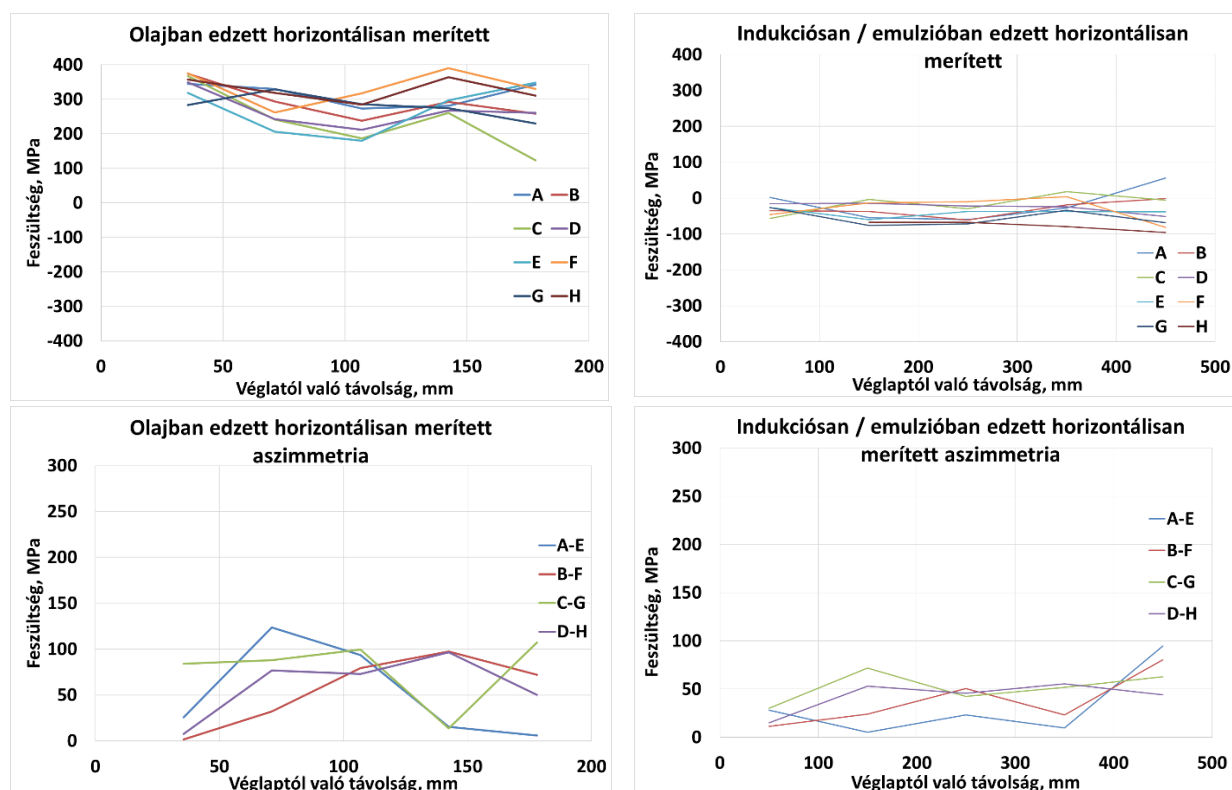
12. ábra A 0Cr18Ni9 típusú acél a), felületi morfológiája a forgácsolás fordulatszámától függően valamint a b) különböző helyeken mért maradó feszültség nagysága (Jinkai, 2017)



13. ábra Maradó feszültség eloszlás a kivágtatlan mintán 3 -3 pontban (portable), valamint a kivágott minta tengely felületén (Lemos, 2014)

Az eddig bemutatott publikációkban kizárólag az esztergálás során kialakult maradó feszültségeket vizsgálták. Lemos és társai DIN38B3 típusú acélból készült rúdszerű előtermék maradó feszültségét térképezték fel indukciós edzés, illetve edzés utáni egyengetés után. A mérésekhez röntgendiffrakciós technikát alkalmaztak. A mérések során mintakivágás nélkül a négy alkotóból egy alkotón mindössze csak 2-3 pontban végeztek méréseket, a valódi feszültségtérképezést 50 mm hosszúságú, az eredetiből kivágott mintákon végezték. Jelentős eltérés (~150 MPa) volt tapasztalható a kivágás előtti és utáni feszültségértékekben. A nem egyengetett rudakban -300 ... -900 MPa, míg az egyengetett rúdon -200 ... -800 MPa közötti értékeket mértek (13. ábra). Annak ellenére, hogy az egyengetett rúd feszültségértékei szűkebb tartományon belül mozogtak, mint a nem egyengetett rúd, az egyengetett rúd feszültségértékei szemmel láthatóan jobban ingadoztak, mint a nem egyengetett rúd (Lemos, 2014).

Egy korábbi kutatómunkánkban egy hengeres geometriájú autóiipari előgyártmány konvencionális és indukciós edzése utáni makroszkópikus deformációját és maradó feszültség állapotát vizsgáltuk és a feszültség aszimmetriáját számoltuk. Kimutattuk, hogy az indukciós edzést követően a felületen kis nyomófeszültségek, egyenletes eloszlással, míg konvencionálisan edzett esetben nagy hózófeszültségek, nagy asszimmetria értékkel alakultak ki. Vagyis az indukciós edzés sokkal kedvezőbb feszültség állapotot eredményez, mint a konvencionális (14. ábra) (Kárpáti, 2017).



14. ábra Konvencionális- és indukciós edzéssel edzett 37CrS4-es típusú acél rudakon mért maradó feszültség valamint számított aszimmetria értékek (Kárpáti, 2017).

## 5. Tudáshiány, célkitűzés és kutatási terv

A bemutatott, rúdszerű acél előgyártmány maradó feszültségéről jelenleg fellelhető irodalom jellemzően egy-egy gyártási folyamat (az indukciós edzés, ill. nemesítés, illetve esztergálás) okozta maradó feszültségek vizsgálatára korlátozódik. Ez alól kivétel Kristoffersen és társai munkája, melyben edzett/normalizált, esztergált majd indukciósan edzett próbadarabokon végezték a méréseket (Kristoffersen, 2001).

A felsorolt publikációkban a maradó feszültséget a kifáradással szembeni ellenálló képesség szempontjából vizsgálták, ezért egy-egy felületi pontban végeztek mérést (Jang, 1996), (Leppert, 2012), vagy mélységi feszültség profil mérését végezték (Kristoffersen, 2001), (Outeiro, 2002), esetleg végelelemes szimulációt végeztek (Outeiro, 2002), vagy pedig átlagos feszültségértéket adó, lyukfúrásos módszert alkalmaztak (Sharman, 2006). Ezek alól az egyik kivétel Sauobi és társai munkája, akik egy metszet esetében a kerület mentén több ponton végeztek mérést, azonban ezt nem végezték el szisztematikusan az egész rúdra, ráadásul következtetéseiket a mélységi feszültség profil eredményeiről vonták le (M'Saoubi, 1999). A másik kivétel Lemos és társai publikációja, melyben a maradó feszültséget ugyan több, raszteresen elhelyezkedő pontban mérték, azonban e méréseiket kisméretű, kivágott próbatesteken végezték, melyek eredménye esetenként jelentősen eltért a kivágás előtti eredményektől (Lemos, 2014). Az említett publikációk megjelenése után Xu és társai kimutatták, hogy a megmunkálás okozta feszültségek mértéke jelentős eltérést mutathat a távolság függvényében (Jinkai, 2017).

Végezetül Lemos és társai bemutatták, hogy a mért feszültségérték tartományának alsó és felső értékének megadása nem jellemzi megfelelően a feszültség állapot homogenitását (Lemos, 2014).

**Annak ellenére, hogy rúd geometriájú acélból készült előgyártmány egyes gyártási lépéseinek (edzés, megmunkálás) a maradó feszültségre kifejtett hatását sokan és sokféleképpen vizsgálták és alapvetően az egyes lépések hatása ismert, a folyamatok komplexitása és egymásra épülése miatt, amit az előzetes kutatások nem vettek figyelembe, ezen ismeretek nem elegendők, hogy egy adott termék végállapotát előre jelezni lehessen. Ezért kutatómunkám célja az alábbi kérdések megválaszolása:**

- 1. Mely az az ipari környezetben is használható mérési eljárás, amellyel a megbízható gyártás szempontjából fontos maradó feszültség állapot megmutatható?**
- 2. Mely az a vizsgálati módszer és meghatározott paraméter, amellyel az indukciósan edzett előgyártmány méret deformációt okozó feszültség állapota jellemezhető, amellyel a méret deformáció bekövetkezése jelezhető?**
- 3. Melyek azok a technológiai lépések, határállapotok, amelyek döntően befolyásolják indukciósan edzett, fogasléc előgyártmány (kimunkálás előtti félkésztermék rúd) maradó feszültség állapotát?**

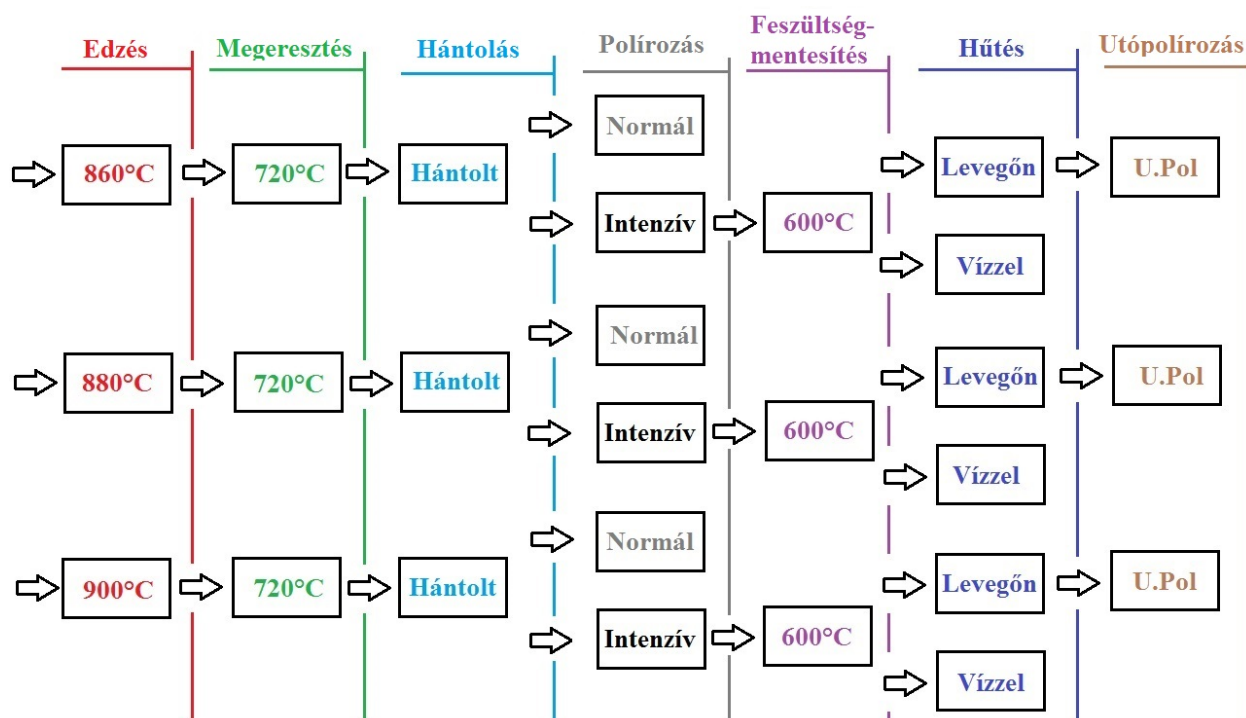
Annak érdekében, hogy megértsük, hogy az egyes technológiai lépések (mechanikai megmunkálás és hőkezelési folyamatok) mely módon és milyen mértékben befolyásolják a fogasléc előgyártmány gyártása során kialakuló maradó feszültség állapotot, a teljes gyártási folyamat monitorozására van szükség, minden egyes lépés utáni mintavételezéssel, az előgyártmányban kialakult maradó feszültség állapot vizsgálatával.

Azért, hogy az egyes technológiai paraméterek hatását jobban megértsük, azok határállapotait feltérképezzük beavatkoztam az ipari gyártási folyamatba és a hagyományos szériagyártási lépésektől eltérő módon is állítottam elő rudakat, természetesen ipari körülmények között. Ilyen változtatás volt a különböző edzési hőmérséklet, az intenzív polírozás, illetve a feszültségmentesítést követő vízűtés alkalmazása. Az intenzíven polírozott rudak esetében a polírozási nyomás – melyet a polírozó hengerek fejtenek ki – jóval nagyobb volt, mint a normál esetben. A vízzel hűtött rudak esetében a feszültségmentesítést követően a rudak nem nyugvó levegőn, hanem erőteljes vízűtés hatására (mint edzéskor) hűltek le.

A vizsgálatokhoz gyártott és felhasznált rudak állapotát, a **15. ábra** foglalja össze. Ezen rudak elnevezését és az elvégzett vizsgálatokat a **4. táblázat** mutatja. A továbbiakban ezekre a próbákra az itt elnevezett állapot azonosító alapján hivatkozom. Az azonosító számok sorrendje nem utal technológiai műveletre (pl. az edzési hőmérsékletre), ezek a gyártás sorrendjében lettek a próbákhoz hozzárendelve.

A **15. ábra** jól szemlélteti, hogy az aktuális megmunkálási fázis a korábbiak folytatása, kivétel a „vízzel hűtött” amely ugyan a feszültségmentesített folytatása, azonban az utópolírozott rudak nem ebből, hanem a feszültségmentesített állapotból származnak.





15. ábra A vizsgálatokhoz gyártott és felhasznált rudak állapota

**4. táblázat A kutatási terv alapján gyártott próbák jelölése, állapota, valamint a próbákon elvégzett vizsgálatok és elnevezéseik: Ma, - maradék ausztenit; XRD, - röntgendiffrakció; SEM, - pásztázó elektronmikroszkóp; VE, - szimuláció (végelelemes módszer)**

Jelölés	T edzési [°C]	Állapot és „elnevezés”	Marópróba	XRD felület	XRD felület marópróba után	XRD mélységi	HV 0,5 keresztmetszet	Ma, keresztmetszet	SEM keresztmetszet	VE
2Q	860	„Edzett”	x	x	x					x
1Q	880		x	x						x
3Q	900		x	x						x
B1	860	„Megeresztett”	x	x						
B3	880		x	x						
B2	900		x	x						
2VS	860	„Hántolt”	x	x		x	x	x	x	
1VS	880		x	x		x				
3VS	900		x	x		x	x	x	x	
PG1	860	„Polírozott”	x	x		x				
GG1	880		x	x						
SG1	900		x	x						
PNG1	860	„Intenzíven polírozott”	x	x						
PNG2	860		x	x		x				
GNG1	880		x	x						
SNG1	900		x	x						
3E	860	„Feszültség mentesített”	x	x						
6E	880		x	x						
1E	900		x	x						
4	860	Feszültségmentesítés után „Vizzel hűtött”	x	x	x					x
1S	900		x	x	x	x				x
3S	900		x	x						x
3NP	860	„Utópolírozott”	x	x						
6NP	880		x	x						
1NP	900		x	x						

## 6. Autóipari kormány fogasléc előgyártmány fő gyártási lépéseinek bemutatása

### Alapanyag, egyengető hengerlés

A hengerműből szállított melegen hengerelt acélrudakat kötegekben szállítják. Tömegük 3 - 5 t, hosszuk 6 – 8 m, átmérőjük a ráhagyás miatt a késztermékhez képest nagyobb, kb.: 27 mm. A melegen hengerelt acélrúd alapanyaggal szembeni támasztott méret és alak szerinti követelményeket a DIN EN 10060:2003 szabvány foglalja össze. Ebben a szabványban megtalálható az átmérő és a tűrésosztálynak megfelelően a körkörösségre és a rúd egyenességére vonatkozó tolerancia tartomány is. A gyártási technológiának megfelelően a szabványban feltüntetett szűkebb toleranciával bíró „P” változatot alkalmazzák. A P betű a „Präzision” szó rövidítése, mely a szigorúbb átmérő és körkörösség toleranciát jelenti. A rudak egyenességét tekintve az előírás maximum 1,5 mm/m, ami a további gyártás szempontjából nagyon fontos. Ha az egyenességi érték ezt az értéket meghaladja, akkor a rudakat egyengető hengerlésnek kell alávetni, ahol a rudak elhajlása csökkenthető egymást folyamatosan követő alsó és felső görgősor (hengersor) közt áthaladva.

### Indukciós nemesítés

A hőkezeléshez a kötegekben lévő acélrudakat az indukciós berendezés erre kialakított asztalára, mely a továbbító görgők felé lejt, daru segítségével emelik, majd a kötegeket összekötő acélszalagokat egy olló segítségével levágják, így a rudak egymás mellé rendeződnek. A tartóasztal lejtésének köszönhetően a rudak egy ütközőig gurulnak, ahol a nemesítő sor automatikusan, egymás után folyamatosan, – a rudak közt bizonyos távolságot tartva – a továbbító meghajtó görgőkre teszi, és állandó sebességgel szállítja (16. ábra). A rudak ezt követően az induktorokon keresztül haladva, nagyon gyors hevítés mellett a kívánt edzési hőmérsékletet elérve tovább haladnak a hűtőegységekhez, melyeken keresztül haladva – nagyon intenzív hőelvonással – lehűlnek. A hűtéshez állandó hőmérsékletre visszahűtött víz és adalék keveréket alkalmaznak. A hűtőblokkokban a hűtőközeget az úgynevezett sípokon keresztül egyenletesen az acélrúd felületére irányítják. A következő szakaszban újból induktorok során keresztül haladva, az edzett acélrudakat a megfelelő hőmérséklettel megereszlik.



16. ábra Az indukciós nemesítő sor [saját felvétel]

Ezt követően – ha a nemesítési folyamat zavartalanul történt – a berendezés egy asztalra kitolja a rudakat. Az edzési és megeresztési hőmérsékletet, a hűtőfolyadék mennyiségét és hőmérsékletét, valamint a szállítási sebességet egy számítógépes rendszer folyamatosan felügyeli. Az esetleges eltérések esetén a berendezés figyelmeztet, és a kidobó rendszer az érintett rudakat automatikusan egy másik asztalra irányítja. A minőségbiztosítás és folyamatellenőrzés céljából a gépkezelők az előírt intervallumonként (óránként, tonnánként) a hőkezelt rudakból mintát vesznek és ellenőrzik, hogy a keménység értéke megfelel-e az előírásnak. A kifutó asztalon lehűlt rudakat, belső előírásnak megfelelően újból kötegekbe rendezik, ellátják azonosító címkével melyen az adott acél típusa, adagszáma, gyártási száma, átmérője és hőkezelési állapota látható. Ezt követően a nemesített rudakat kötegekbe rendezve átszállítják egy másik megmunkáló csarnokba az úgynevezett hántoló üzembe.

### **Hántolás, polírozás, automatizált vizsgálatok**

A hántoló berendezés a polírozó géppel és egy automatizált vizsgálószorral együttesen alkot egy komplett megmunkálási gyártási folyamatot. A hántolandó, már hőkezelt rudakat a hántológép tartóasztalára daru segítségével felemelik, majd a kötegeket összetartó szalagokat fémvágó olló segítségével levágnak és a rudakat párhuzamosan egymás mellé rendezik. A hántológép beállítása és ellenőrzése után a berendezés egymás után hézag nélkül húzza be a rudakat. Az asztal lejtése miatt a következő rúd mindig a továbbító görgősor mellett van, így az adagoló automatika folyamatosan ellátja a gépet. Hántolás közben egy többszörös megmunkáló fején keresztül haladnak a rudak (inverz eszterga) ami a kívánt réteget forgácsolással eltávolítja. A megmunkáló szerszámokat (késeket) befogó fej, lehet 3, 4, 5, illetve 6 késes változat. A hántolási folyamat után kapott acélrudak átmérője nem azonos a fogasléc előgyártmány átmérőjével, felülete mikrobarázdákat tartalmazhat, és az egyenességére való előírást sem minden esetben éri el. Ezért szükséges a hántolt rudakat polírozni.

A polírozó berendezés két hengerből (alsó és felső) áll. A hengereknek eltérő geometriájuk van, az egyik konkáv, míg a másik konvex. Ezek egymással egy bizonyos szöveget zárnak be és állandó nyomást fejtenek ki a köztük áthaladó rudakra, melyek beállítástól függően vagy csak polírozódnak, vagy polírozódnak és egyengetődnek. A polírozás után a rudak felületi minősége jelentősen jobb ( $Rz: 2 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$ ), mint polírozás előtt ( $Rz: 6 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ ). Egyenességi értéke maximum  $0,5 \text{ mm/m}$ . Átmérő toleranciája a kísérletben felhasznált rudak esetében  $h9$ .

Az automatizált vizsgálószorba beépített berendezések a jelenlegi tudomány és modern technika legmagasabb szintjét képviselik. A vevői előírásnak megfelelően, kalibrálás után az áthaladó rudakat teljes hosszukban ellenőrzik. Ilyen automatizált vizsgálat a repedés vizsgálat, melynél a vizsgálófejek érintésmentesen, örvényáram segítségével egy korábban mesterségesen létrehozott, kalibrált repedéssel hasonlítja össze. Fontos, hogy ezzel a módszerrel csak olyan repedések mutathatók ki, melyek nyitottak a felületen. Emiatt a felület alatti hibákat ez a módszer nem, vagy csak bizonyos esetben és kis mélységben képes detektálni. A felület alatti hibák észlelésére (például zárványok, lunkerek, egyéb hibák) ultrahangos vizsgálatot alkalmaznak. A felcserélés vizsgálat a különböző alapanyagú, azonban közel azonos geometriájú rudak összekeverését / felcserélését hivatott elkerülni. Ez a berendezés is érintésmentes vizsgálati módszert alkalmaz, mely örvényáramot használ a különböző tulajdonságok meghatározására. A berendezés kalibrálásához szükség van 5 rúdra, mely mindig az adott gyártáshoz tartozik. Ezen rudak

segítségével a kalibrálás után a berendezés a felvett pontok értékeihez fogja az éppen vizsgált rudat hasonlítani. A gyártóval közösen a berendezés továbbfejlesztésében részt vettem. A jelenleg kapható szoftver tapasztalataink és elképzeléseink alapján lett továbbfejlesztve. Ez a berendezés alkalmas gyártás közbeni in-line acéltípus felkeveredés, keménység/szövetszerkezet eltérés kimutatására. A beállított értékektől való eltéréskor a vizsgálósor az érintett rudakat egy külön erre a célra kialakított tartóba küldi, a megfelelő rudakat pedig egy mérleggel ellátott, állítható magasságú asztalra irányítja. Itt a gépkezelők megfelelő tömegű és méretű kötegekbe rendezik és acélpántokkal a már kialakított érzékeny és hibamentes felületre, ügyelve a sérülések elkerülésére, összekötik, felcímkézik. Ezeket a kötegeket körültekintően kezelve visszaszállítják különböző daruk és szállítójárművek segítségével az indukciós hőkezelő berendezés csarnokába.

### **Indukciós feszültségmentesítés**

A hántolt acélrudak maradó feszültség állapotának csökkentése egy végső hőkezelési eljárással, az úgynevezett indukciós feszültségmentesítéssel történik. A kötegeket daru segítségével a berendezés beadagoló asztalára emelik, majd az acélpántokat elvágva párhuzamosan, hézagmentesen egymás mellé rendezik. A berendezés a rudakat egymás után, a továbbító görgőkre helyezi, melyek folyamatos anyagáramlással, meghatározott előtolási sebességgel az induktorokon átvezetve elérik a kívánt feszültségmentesítési hőmérsékletet, majd az acélrudakat kimenő asztalra helyezi az automatika. Ennél a gyártási folyamatnál alkalmazott hőmérséklet mindenképp alacsonyabb kell, hogy legyen, mint a legutoljára végzett hőkezelésnél, azaz esetünkben a megeresztés hőmérsékleténél. Így a kialakult szilárdsági értékeket ez a hőkezelés nem módosítja, azonban az anyagban lévő maradó feszültségeket jelentős mértékben csökkenti. A hőkezelt termék lassú áramlásmentes levegőn hűl le. A lehűlt rudakat újból kötegelik, felcímkézi a már ismertetett módon és daru segítségével a következő megmunkálási folyamathoz szállítják.

### **Utópolírozás**

Az utópolírozás egy hasonló polírozó berendezéssel történik, mint a hántolás utáni polírozáskor, de ennek a berendezésnek a teljesítménye és a hengerek által kifejtendő nyomás értéke jelentősen kisebb. Az utópolírozás feladata összetett. A feszültségmentesítés során a rudak felülete sérülhet. Ezek a sérülések lehetnek finom, vagy durvább karcok, felületi hibák. A rudak kismértékű elhajlása esetén javítja az egyenességi értéket, valamint a felületet egy vékony olajréteggel látja el, mely mind a korrózióval, mind a további mechanikai sérülésekkel szemben ellenállóbbá teszi. Ez a réteg a további megmunkálás során már nem kerül eltávolításra.

### **Rövidáru, előgyártmány gyártása**

Ez a végső megmunkálási fázis. Az eddig, több lépésben gyártott, vevői igényeknek megfelelő mechanikai és anyagtulajdonságokat elérve a kormányfogasléc alapanyag utolsó paraméterét, a hosszát egy nagy teljesítményű fűrész és megmunkáló egység segítségével állítják be. Ezek a megmunkáló központok pár tized mm-es pontossággal képesek a nagyszilárdságú acélrudakat méretpontosra vágni. Minden egyes rúd hosszát a fűrész ellenőrzi, szükség esetén automatikusan után állít és a nem megfelelő hosszúságú rudakat egy külön tároló ládába teszi. Igény esetén lehetőség van a méretre vágás után közvetlenül mind a két homlokfelületbe egy-egy központosító furat, valamint a rúd végének bizonyos szögben való éltelenítésére és a rudak lemágnesezésére. A

fűrész ezt követően a már elkészült fogasléc alapanyagot egy önműködő robotrendszerrel előre meghatározott pakolási renddel a megfelelő tároló ládába rakodja.

## 7. Vizsgált rudak állapotának részletes jellemzése

### Anyagminőség

A felhasznált acél egy nemesíthető acél, típusa 37CrS4 + HL a DIN EN 10083-3:2007 szabvány szerint. A kísérleteimben felhasznált acéltípus kémiai összetételét az 5. táblázat mutatja. Az összetétel vizsgálatot, - a folyamatos öntés előtt, ahol az adag homogénebb - folyékony állapotú acélfürdőből próbavételezéssel, majd spektroszkópos vizsgálattal határozták meg. Ezt az összetételi eredményt egy 3.1-es átvételi igazolólapon tüntetik fel az adag (Charge) számával. Ez tulajdonképpen az acél „okirata”. Ez az acéltípus kedvező ára és számos tulajdonságai miatt ma az autóiparban igen közkedvelt. Kiválóan nemesíthető indukciós módszerrel, s az így kapott szövetszerkezet a vizsgálatokhoz használt átmérővel, de nagyobb átmérők esetében is, a teljes keresztmetszeten finom, megeresztett martenzites.

5. táblázat A 37CrS4 –es acél összetétele a DIN EN 10083- as szabvány szerint [wt%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb
0,36	<b>0,23</b>	<b>0,77</b>	<b>0,007</b>	<b>0,027</b>	<b>1,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,002</b>
Ni	Cu	Sn	Al	V	B	Ti	N
0,14	<b>0,17</b>	<b>0,012</b>	<b>0,022</b>	<b>0,01</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,001</b>	<b>0,008</b>

A 37CrS4-típusú acélrúdterméket a 15. ábra szerint feltüntetett gyártási sorrendnek megfelelően a következő megmunkálási folyamatokkal és beállításokkal gyártottam le:

### Edzett állapotú rudak

Az edzett állapotú (1Q; 2Q; 3Q) rudakat három különböző edzési hőmérsékletről, indukciósan edzettük. Az edzési hőmérsékleten kívül mely 880°C; 860°C; 900°C volt, minden paraméter azonos volt. Itt az acél még a hengerműből érkező, revétlenített, de durva felületű. Mindhárom esetben összesen 5 darab – körülbelül 8 méter hosszú, melyek átmérője 27 mm – számozott hosszú rudat használtam fel, hogy gyártási körülmények azonosak legyenek. Az azonos állapot biztosítása miatt, az indukciós berendezésnek szükséges, hogy a különböző generátorral hajtott szakaszokban az acélrúd a szakasz összes tekerésében benne legyen. Csak így biztosítható, hogy állandó teljesítménnyel hevíthessük az áthaladó rudakat teljes hosszukban. Az így hőkezelt 5 rúdból az edzést követően az elsőt és utolsót félre tettük. A próbákat a második rúdból úgy vágtuk ki, hogy – az esetleges hevítési egyenlőtlenségek kiküszöbölése miatt – a rúd végéből 300 mm-t levágtunk, amit leselejteztünk és így vettük a maradék hosszú rúdból a vizsgálandó próbákat melyek hossza minden – további – esetben 500 mm. Mindegyik edzési hőmérsékletnél így jártunk el.

### Megeresztett rudak

A megeresztés (B1; B2; B3) mind a három edzési hőmérsékletről edzett rudak esetében azonos, 720°C -on történt. A megeresztéshez ugyanazokat a számozott hosszú rudakat használtuk fel, mint az edzéshez. A sorszámozásnak köszönhetően a hőkezelés ugyanabban a sorrendben történt, így

ebben az esetben, is mint edzéskor a 2-es rúdból 300 mm leválasztottunk majd úgy vágtuk ki a későbbi vizsgálatokhoz szükséges próbákat.

### **Hántolt rudak**

A megeresztést követően a durva felületű 27 mm átmérőjű rudakat, h9-es tűréssel 26,00 mm átmérőre, a rudak számozásának megfelelő sorrendben, lehántoltuk. A különböző edzési hőmérséklet miatt a próbákat (1VS; 2VS; 3VS) –nek nevezzük. A hántolás esetében is fontos a sorrend, ugyanis az első rúd, amely először megy a lemunkáló szerszámok (kések) közé, még nem egyenletes körülmények közt lesz megmunkálva. A hántolás esetében is a rudakat, mint az indukciós hőkezelés esetében is, egymás után közvetlenül kell megmunkálni, így kvázi egy végtelenített rudat kapva, melynek csak egy eleje és egy vége van. A vizsgálatokhoz használt próbát mind a három edzési hőmérséklet esetében a korábban alkalmazott módon vettük ki a 2-es rúdból.

### **Polírozott rudak**

Ennél a megmunkálási folyamatnál ugyan egymást követően haladnak a rudak, de nem folyamatosan (végtelenített formában). A berendezésben egyidejűleg csak egy rúd van egyszerre. Amikor a rúd teljesen áthaladt a hengerek közt és azt a tartó asztalra helyezi az automatika, a következő rúd csak akkor engedi be a polírozó hengerek közé. Ezért edzési hőmérsékletenként 1-1 rudat használtam fel, amely a 2-es rúd volt. A polírozást kétféle képen végeztük. Normál polírozás (PG1; GG1; SG1), ahol a polírozó hengerek „normális” terhelő erővel nyomták a rudak felületét, valamint az intenzív polírozás (PNG1; PNG2; GNG1; SNG1) ahol a hengerek egy jóval nagyobb terhelő erőt fejtettek ki a rudak felületére. A próbákat a már ismertetett módon vettük ki a 2-es rúdból. Mind normál, mind intenzív polírozás esetében a korábban hántolt rudakat alkalmaztuk.

### **Feszültségmentesített rudak**

A feszültségmentesítés indukciósan történt ugyanazzal a berendezéssel, amellyel az edzést és megeresztést végeztük. Feszültségmentesítéshez az intenzíven polírozott rudakat használtuk fel. A feszültségmentesített próbák az 1E; 3E; 6 E. Mindegyik esetben a feszültségmentesítés 600 °C-on történt. Ennél a gyártási folyamatnál is nagyon fontos, hogy a rudak folyamatosan, helyköz nélkül haladjanak a berendezésben. A hőkezelendő rudakat számozás szerinti sorrendben helyeztük a berendezésbe. A próbákat a már megszokott módszer szerint vettük ki.

### **Vízzel hűtött rudak**

Ez az eljárás nem a hagyományos gyártási sorozat része, de előfordulhat, hogy a technológia gyorsítása érdekében felmerülhet alkalmazása. A vízzel hűtött rudak (1S; 3S; 4) gyártásához a feszültségmentesített rudakat alkalmaztuk. Miután a feszültségmentesítést követően a próbákat kivettük, ugyanazon rudakat a feszültségmentesítésnél ismertetett módon még egyszer 600 °C-ra hevítettük, majd közvetlenül vízzel lehűtöttük. A vizsgálatokhoz a próbákat itt is edzési hőmérséklet szerint, 300 mm-t levágva, a korábbiakkal megegyező módon vettük ki.

### **Utópolírozott rudak**

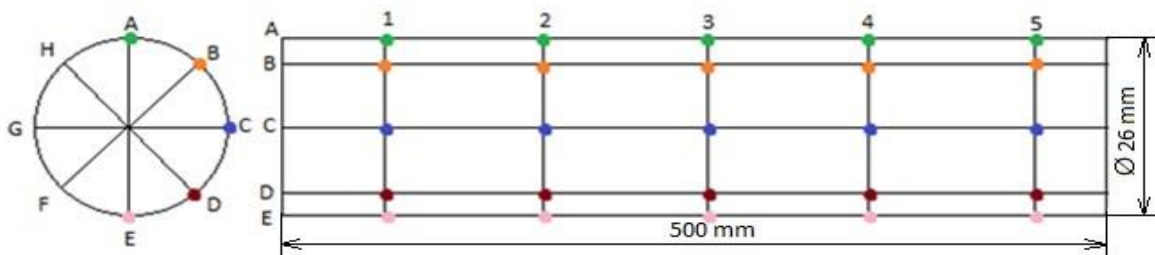
Az utópolírozáshoz a feszültségmentesített rudakat alkalmaztuk. Az utópolírozott rudakat (1NP; 3NP; 6NP) a korábban a polírozásnál ismertetett módon, gyengébb terhelő erővel políroztuk. A próbákat itt is edzési hőmérsékletnek megfelelően, a már ismertetett módon vettük ki.

## 8. Vizsgálati módszerek és paraméterek bemutatása

A különböző gyártási lépések után vett próbakon roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokat végeztem el a maradó feszültség állapot jellemzésére, illetve annak megértésére, hogy a feszültség állapot okozta deformációt milyen hatás váltotta ki eredendően. A maradó feszültség meghatározására röntgendiffrakciós és marópróbás módszert alkalmaztam. Elsőként mindig a roncsolásmentes röntgendiffrakciós módszerrel, majd ezt követően ugyanazon mintán a marópróbás módszerrel végeztem méréseket. Az okok felderítésére szövetszerkezeti vizsgálatot és keménységmérést végeztem.

### 8.1. Röntgendiffrakciós maradó feszültség vizsgálat

A 15. ábrán bemutatott gyártási lépések után kivett próbadarabok röntgendiffrakciós vizsgálata a következő módon történt: Minden gyártási folyamat után, az edzési hőmérsékletenként kivett próbákat nyolc alkotóra felosztva – melyeket az ABC betűivel neveztem el – alkotónként egymástól azonos távolságra lévő 5 illetve néhány esetben, 25 pontban végeztem el a méréseket (17. ábra).

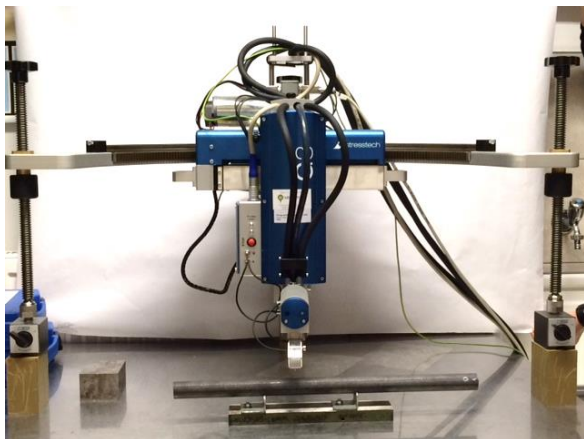


17. ábra A maradó feszültség mérési pontok a próba nyolc alkotója mentén

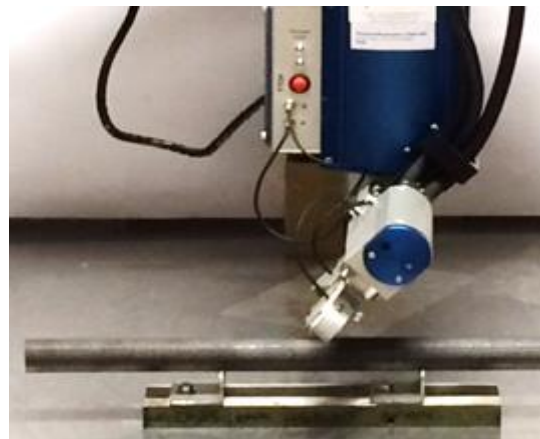
A maradó feszültség mérések során a StressTech XStress 3000 G3R központ nélküli röntgendiffraktométert használtam, mely direkt maradó feszültség mérésre lett kifejlesztve (18. ábra). A berendezés óriási előnye, hogy nem szükséges a vizsgálandó darabot felválni, vagy mintát kivágni belőle, hanem a berendezés alá fixen befogatva a berendezés maga mozog (ezek az ún. központ nélküli röntgendiffraktométerek). Ezen tulajdonsága miatt lehetővé teszi, hogy készterméken vizsgáljunk maradó feszültséget, valamint maradék ausztenitet az alkatrész roncsolása nélkül. A maradó feszültség méréséhez a következő paramétereket alkalmaztam:

- Cr – röntgensó
- Csőfeszültség / Fűtőáram: 25 kV / 6 mA
- Mérési mód: módosított- $\psi$
- Detektor ív: 50 mm
- Kollimátor átmérője: 3 mm
- Gyűjtési idő: 2 másodperc





a)



b)

18. ábra StressTech XStress 3000 G3R tangenciális feszültség mérés közben a)  $\Psi=0$  és b)  $\Psi \neq 0$  döntés esetén

A mérési pont kijelölése és a kollimátor pontos vizsgálati helyre történő pozicionálása egy be/ki kapcsolható lézersugár segítségével történik. A kollimátort a kívánt vizsgálandó ponthoz kell érinteni, ellenőrizve a pontos mérési pont helyzetét. Fontos megemlíteni, hogy nem lapos felületű próba vizsgálatára (gömb, rúd) a megfelelő átmérőjű kollimátor kiválasztása az erre vonatkozó szabvány a DIN EN 15305 –ban leírtaknak szerint  $\leq 0,4 \cdot r$  történik. A megfelelő beállítások és ellenőrzések után a mérés számítógépes programon keresztül elindítható. Első lépés az adott mérési konfigurációra a munkatáv meghatározása egy a vizsgálandó mintával azonos anyagú, de feszültség mentes etalon minta segítségével. Ezen folyamat során történik a detektorok skálázása, a pixelhez történő Bragg szög rendelése is. A mérés innentől kezdve automatikusan történik. A szoftver a vizsgálandó felületre  $0^\circ$ -os döntési beállítástól indul, mérés kezdetén megérinti a minta felületét, majd munkatávra állva különböző döntési pozíciókban ( $\Psi_n$ ) felveszi a választott síksorozat diffrakciós görbéjét. Ferrit fázis (acél minta) esetén ez a  $\{220\}$ . Meghatározza a diffrakciós görbe Bragg szögét minden egyes döntési pozícióban, abból a  $d$  rácstávolság értékeket meghatározza, majd a 13. egyenlet és a kiválasztott konstansok (rugalmassági modulus és Poisson szám) alapján kiszámítja a normálfeszültség értékét. Mivel a döntés pozitív és negatív irányban is lehetséges, így nem csak a főfeszültségek, de a csúsztató feszültségek is számíthatók. A vizsgálat során kapott számszerű információk a döntések irányában meghatározott normál feszültség és szórása, csúsztató feszültség és szórása, félértékszélesség és szórása, valamint a Bragg szög (Stresstech Xstress 3000 G3R system operating instructions and instrument documents, 2012).

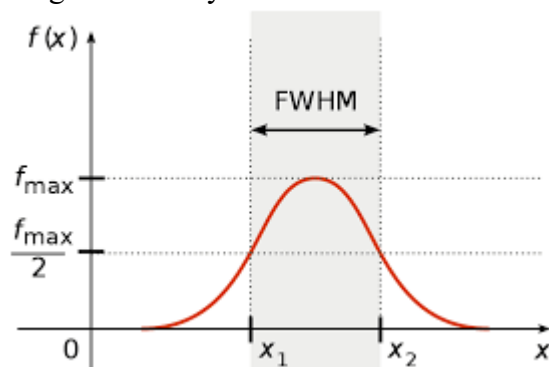
A röntgendiffrakciós méréssel az acélrúd feszültség állapotának „feltérképezése” volt a cél. Minden mérési pontban axiális irányú feszültség komponens mértem. Ennek oka, hogy a rudak deformációját, elhajlását ilyen irányú feszültség komponensek okozzák. Ezeket az értékeket minden gyártási folyamatnál edzési hőmérsékletenként külön diagramban mutatom be. A szemben lévő alkotókat azonos színnel, de más vonalstílussal jelöltem. Röntgendiffrakciós mérési adatok értékelésénél mindenképp szem előtt kell tartani azt a tényt, hogy a számított feszültség adat arra a térfogatra jellemző, amit a röntgensugárral gerjesztettünk és abban az irányban, amit a vizsgálatnál meghatároztunk. A gerjesztett térfogat felületét pedig a kollimátor (átmérőben 2-3 mm), a behatolási mélységet pedig a gerjesztés körülményei, a Bragg szög és a vizsgált anyag sűrűsége határozza meg, ami jellemzően nem nagyobb, mint néhány  $10 \mu\text{m}$ .

## 8.2. Feszültség aszimmetria

Hajlításnál egy húzott és egy nyomott oldalt különböztetünk meg. Tiszta hajlításnál a húzott oldalon pozitív feszültség (húzó), a nyomott oldalon negatív feszültség (nyomó) mérhető. Azonban ha a hajlításhoz hozzáadódik egy további, egyenletes nyomófeszültség, akkor a húzott oldalon mért feszültség értéke lecsökken, akár nullázódhat is. A nyomott oldalon pedig összeadódik a tiszta hajlításból származó nyomófeszültség és a plusz nyomófeszültség. Pontosan ezért, a rudak elhajlásának jellemzésére vezettük be a feszültség aszimmetria fogalmát, melyet az alábbi módon számolhatunk. A szemben lévő pontok feszültség értékeit előjelesen kivonjuk egymásból és a különbség abszolút értékét vesszük. Például, ha egy rúd „A” alkotójának 3-as pontjában (A3) mért feszültség értéke 100 MPa. Ugyanezen rúd „E” alkotójának (E3) pontján mért feszültség érték szintén 100 MPa, akkor a feszültség aszimmetria az „A-E” sík 3-as pontjában nulla. Ha A3 és E3 értéke egyaránt -100 MPa, szintén nulla a kapott eredmény. Ha viszont az A3 értéke -100 MPa és E3 értéke 100 MPa, akkor a feszültség aszimmetria értéke 200 MPa. Így a 8 alkotó (A,B,C,D,E,F,G,H) helyett 4 síkot (A-E, B-F, C-G, D-H) kapunk, melyekhez tartozó számított feszültség aszimmetria értékeket minden gyártási folyamatnál, edzési hőmérsékletenként, a hozzá tartozó feszültség diagram alatt, külön diagramban mutatom be.

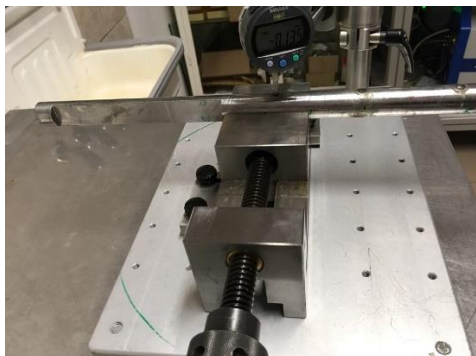
## 8.3. Félértékszélesség

A kristályrács síkokról visszaszórt sugárzás intenzitása a Bragg-szög függvényében egy maximumos görbe szerint változik. Ha a függvény intenzitás maximum felénél vett szélességet vesszük, megkapjuk a félértékszélességet ( $x_2 - x_1$ ) (19. ábra). Ezek az értékek információt adnak a martenzit oldott ötvöző tartalmáról, a mikrofeszültségekről. Az oldott ötvöző torzítja a rácsot, amelynek következtében változik a rácssíktávolság értéke, ennek eredményeképpen kis eltérésű  $\Theta$  szögek lesznek, vagyis szélesedik a diffrakciós görbe. Ezáltal értékének nagyságából következtetni tudunk, hogy a darab mekkora mértékben edződött be vagy dekarbonizálódott. Alakított termékeknél félértékszélesség növelő tényező lehet a diszlokációs szám növekedése is.

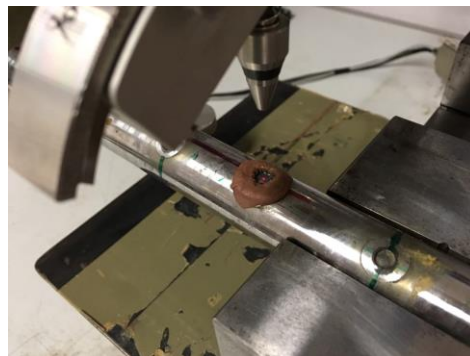


19. ábra Félértékszélesség (FWHM) értelmezése

Mélyégi feszültség eloszlás vizsgálatot a hántolt (1VS; 2VS; 3VS), a polírozott (PG1), az intenzíven polírozott (PNG2), valamint a vízzel hűtött (1S) rudakon végeztem. A vizsgálandó próbát egy mozgatható próbatartóba befogatva, a mérőasztal két rögzítő ütközőjéhez beállítva, mindig ugyanazon pozícióba helyeztem vissza (20. ábra).



**20. ábra** Eltávolított rétegvastagság mérése finom mérőórával. A próba a fixen befogatott satuban, mindig ugyanazon pozícióban van



**21. ábra** Maradó feszültség vizsgálat egy elektrolitisan kimart pontban. A barna maszkoló a maratás pontos helyét és az elektrolit megtartását szolgálta

Az asztalhoz tartozó műszertartóba befogatott digitális tapintó órát a vizsgálandó pontban –melyek a korábban felvett alkotók mentén voltak – lenulláztam, ez volt a próba felülete, azaz a 0 mm mélység. Ezt követően egy – mechanikai anyageltávolítást kerülendően – elektrolitos maratást végeztem, mellyel egy bizonyos réteget eltávolítva különböző mélységekben tudtam a maradó feszültséget mérni. A réteg eltávolítást egy Struers, Movipol 5 típusú mobil berendezéssel végeztem el (Stuers Movipol, 2019). Minden egyes maratás után megmértem a mélységet, majd ezek után a mélységhez tartozó maradó feszültséget (21. ábra). Ezeket a mélységi vizsgálatokat, a vizsgált pont, és a vele hossz tengely mentén megegyező távolságban a szemben lévő alkotón is megmértem. A mélységi adatokat tartalmazó diagramokat mátrix alakban mutatom be, ahol a sorok a szemközti alkotópárokat, az oszlopok pedig az alkotópáron elfoglalt helyeket jelentik. Minden egyes diagram a szemben lévő alkotónak megfelelően két görbét tartalmaz.

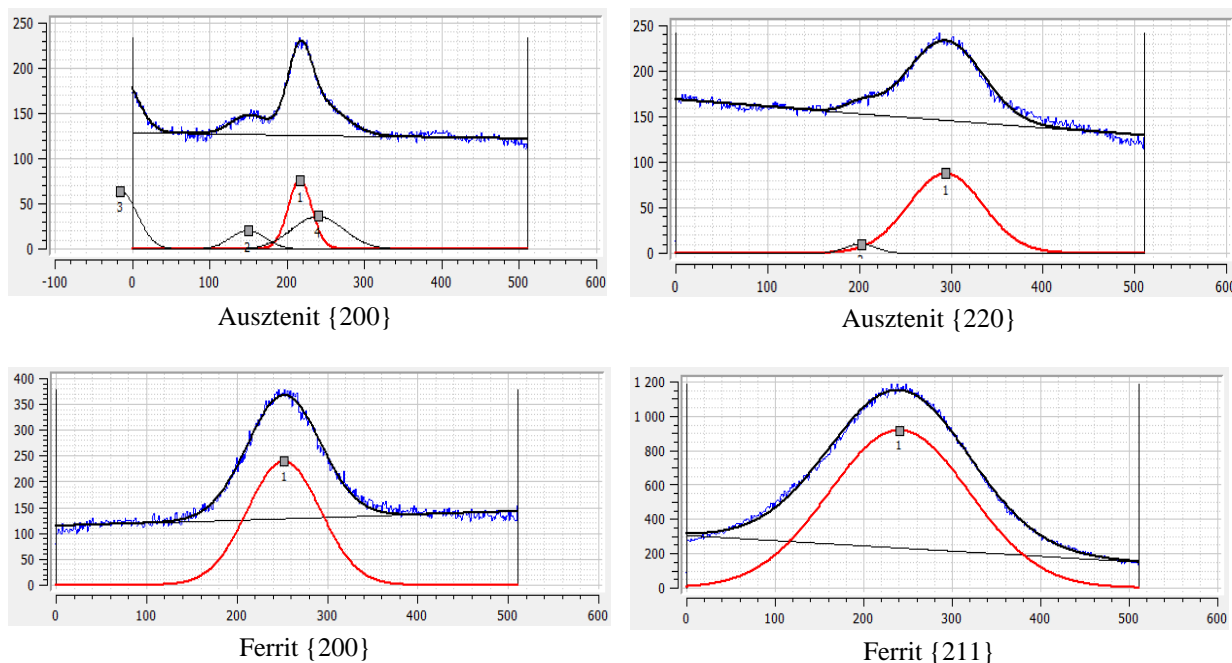
#### 8.4. Maradék ausztenit tartalom

A maradék ausztenit mennyiséget két hántolt rúdból (2VS; 3VS) kivett két – két keresztmetszeten vizsgáltam. A szeleteket a rudak mélységi feszültség eloszlásának mérési eredményei alapján választottam ki. A korábban felvett 8 alkotó mentén, sugár irányban, a felülethez – a kollimátor adta lehetőséghez képest – lehető legközelebb vizsgáltam, figyelembe véve, hogy a mélységi feszültség eloszlást legfeljebb 2 mm mélységig mértem. Ezért az alkalmazott kollimátor átmérője 2 mm volt. A kis átmérő miatt jelentősen növelni kellett a gyűjtési időt.

A maradék ausztenit mennyiségét az XTronic szoftver segítségével számoltam. Az ausztenit {200} és {220} illetve a ferrit {200} és {211} reflexióinak csúcs alatti korrigált terület arányából történt a számítás (22. ábra). A felvett diffraktogramokra függvényillesztést alkalmaztam, ezzel az átfedő jellemzően karbid reflexiókat le tudtam választani a ferrit és ausztenit csúcsoktól.

A maradék ausztenit méréséhez a következő paramétereket alkalmaztam:

- Cr – röntgenső
- Csőfeszültség / Fűtőáram: 28 kV / 8 mA
- Detektor: A,B Vonaldetektor
- Szűrő: Vanádium
- Kollimátor átmérője: 2 mm
- Gyűjtési idő: 400 másodperc



22. ábra Reflexiós görbék. A kék görbe a mért, a fekete az illesztett polinom, piros a számításhoz használt csúcs háttérleválasztás után, az x tengelyen Bragg szög pixelben az y tengelyen beütésszám szerepel

## 8.5. Makroszkopikus deformáción alapuló mérés marópróbával

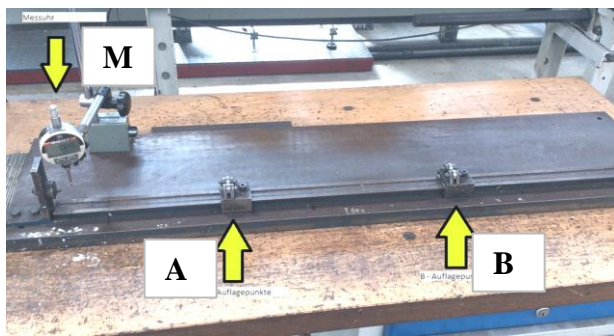
A mechanikai maradó feszültség vizsgálatok csoportjába tartozó marópróbás módszerrel, egyszerűen és gyorsan meghatározható hengeres testekben (rudakban) lévő maradó feszültség mértékére utaló deformáció. A vizsgálat elve, hogy az alkatrészből adott módon és mértékben forgácsolással (marózással) anyagot távolítanak el, és valamely módon számszerűsítik az így bekövetkező méret deformációt. A járműiparban széles körben alkalmazzák a különböző paraméterű (hosszúság, kimunkálásra vonatkozó előírások, alátámasztás helye) marópróbákat. A hengeres félkészgyártmányok esetén a kimarózást követően mérik a rudak elhajlását, s ha ez meghalad egy bizonyos értéket, akkor selejtnek minősítik a terméket.

Az ipari mérési tapasztalataim során arra a következtetésre jutottam, hogy nem elegendő pusztán a kimarást követő elhajlás értékét meghatározni, hanem a kimarás előtti és az azt követő elhajlások különbsége a döntő a termék feszültség eloszlás állapota szempontjából. Ezért a kutatáshoz kidolgoztam ezen módszernek a részleteit, a próbatest paramétereit, a  $\Delta$  elhajlásra vonatkozó toleranciát. Az, hogy a termék elfogadható – vagy sem, a kimunkálási előírást az ezen a téren mélyre visszanyúló előkísérleteim, tapasztalataim alapján határoztam meg. Az általam vizsgált 16-50 mm átmérő tartományba eső, 500 mm hosszú rudak esetén ez a határ elhajlás érték jellemzően terméktől függően 0,6-1 mm volt. A marópróbának ilyen fajta minősítését, mely a  $\Delta$  elhajlás alapján ad információt, korábban nem alkalmazták. Azonban az egyik neves német autógyártónak felkeltette az érdeklődését a módszer olyannyira, hogy a kutatásban felhasznált próba szerinti vizsgálatot az összes paraméterével együtt, rajzszerinti előírásban követeli meg bizonyos alkatrészek gyártás közbeni minőségbiztosítása során.

A marópróbás vizsgálatokhoz, a már röntgendiffrakciós módszerrel feltérképezett rudakat használtam. A röntgendiffrakciós mérési eredmények alapján meghatároztam, hogy a rúd melyik oldaláról történjen a kimunkálás, ennek megfelelően a marózást mindig ott végeztük, ahol a

legnagyobb volt a szórás. A marózás előtti és utáni elhajlás értékeket rózsadiagramokon szemléltetem. A rudak elhajlásának mérése szolgáló tartórendszert és mérőórát a **23. ábra** mutatja. A sínen csúsztatható tartógörgők lehetővé teszik, hogy a rajzi előírásoknak megfelelően állítsuk be a távolságot.

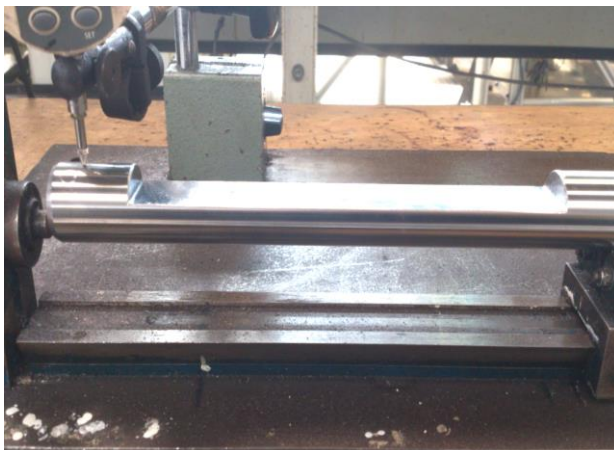
A mérés lényege, hogy a **24. ábra** szerinti rajz alapján a mérendő próbának az M pontban egy ütés mérő óra segítségével megkeressük a legkisebb elhajlási pontját, amit bejelölünk és a mérőórát ebben a pontban lenullázzuk. Ez a referencia (0) pont. A próbát a tengelye körül  $360^\circ$ -ban körbeforgatva megkeressük a rúd maximális elhajlási pontját, aminek a helyét X-szel jelöljük. A mért értéket táblázatban (**6. táblázat**) rögzítjük. Ezt az állapotot marás előtti állapotnak nevezzük, mert a próba keresztmetszete még teljes. Ezt követően a próbát a rajzon szereplő előírásnak megfelelő paraméterekkel kimarózzuk, - innen kapta a „Marópróba” elnevezést – úgy, hogy a próbán bejelölt X-maximum ponthoz mutató sugár a marógép asztalára  $90^\circ$ -os szöget bezárva felfelé legyen. A kimarandó terület mélysége az adott keresztmetszetű rúd átmérőjének a 30 százaléka, hossza 180 mm. A kimart próbán ismét megmérjük a darab maximális elhajlását úgy, hogy a mérőórát a korábban 0-val jelölt (referencia) pontnál nullázzuk le.



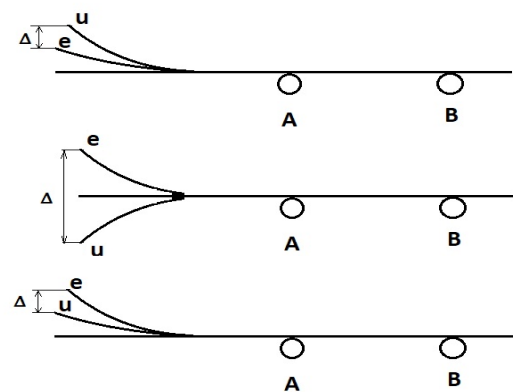
a)



b)

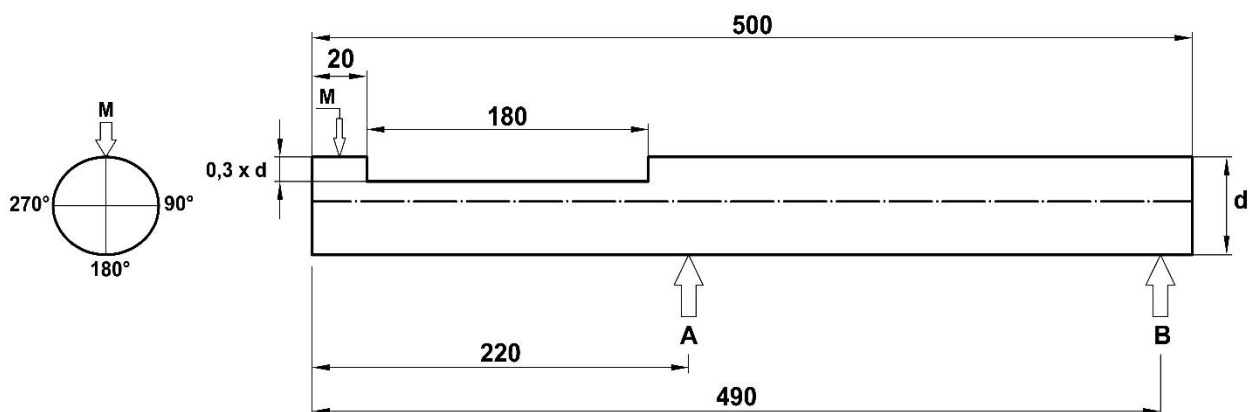


c)



d)

**23. ábra** A marópróbas módszer a) a vizsgálati rendszer, zöld nyíl: tartógörgők (A,B) és mérőóra (M) b) elhajlás mérése kimarózás előtt c) és kimarózás után, d) a  $\Delta$  elhajlás értelmezése: e – a rúd állapota kimarózás előtt, u – a rúd pozíciója kimarózás után



24. ábra A marópróba paramétere, A,B görgőalátámasztási helyek, M mérőóra helye

Az így kapott maximális elhajlás értékét táblázatban rögzítjük. A marás előtti és marás utáni mért elhajlás értéket előjelesen kivonjuk egymásból, és az abszolút értékét vesszük, majd ezt a számot a  $\Delta$  elhajlás mezőbe beírjuk. Az elhajlás értelmezését a 23. ábra d) pontja szemlélteti. Ebből kifolyólag a marás előtti elhajlás értéke mindig pozitív, a marás utáni elhajlás lehet pozitív és negatív, a  $\Delta$  elhajlás pedig szintén mindig pozitív előjelű. A próbadarabban lévő maradó feszültség állapotra a  $\Delta$  elhajlás érték utal. Az üzemi tapasztalat szerint a  $\Delta$  elhajlás határértékének alkatrésztől, állapottól és felhasználástól függő értéket határoztunk meg, jellemzően a 0,3-0,8 mm tartományban. Nagyszámú statisztikai adatokat a  $\Delta$  elhajlás értékére és a vevői visszajelzések eredményeit mutatja az 1. Melléklet.

6. táblázat Példa a marópróbás méréssel meghatározott adatokra

A próba száma	Marás előtti elhajlás [mm]	Marás utáni elhajlás [mm]	$\Delta$ elhajlás [mm]
1	0,060	0,145	0,085
2	0,075	-0,195	0,270

## 8.6. Keménységmérés

Keménységet a röntgendiffrakciós maradék ausztenit mérés után mértem, azokon a szeleteken, melyeken a maradék ausztenit vizsgálatokat is végeztem. A méréseket egy Instron Tukon 2100B típusú mikro keménységmérő (Vickers) berendezéssel vizsgáltam, HV 0,5 értékeket mértem, a kijelölt szemelévő alkotóknál a maradék ausztenit tartalom és a keménység közötti összefüggés vizsgálatához. A szeleteken való pozicionálás – a korábban felvett és az egész kísérletsorozatban alkalmazott – alkotók szerint történt. Minden mérést a próba szélétől 140  $\mu$ m távolságtól indítottam és jellemzően traverz értékeket mértem. Két mérési pont között 150  $\mu$ m-es a távolság.

## 8.7. Szövetvizsgálat

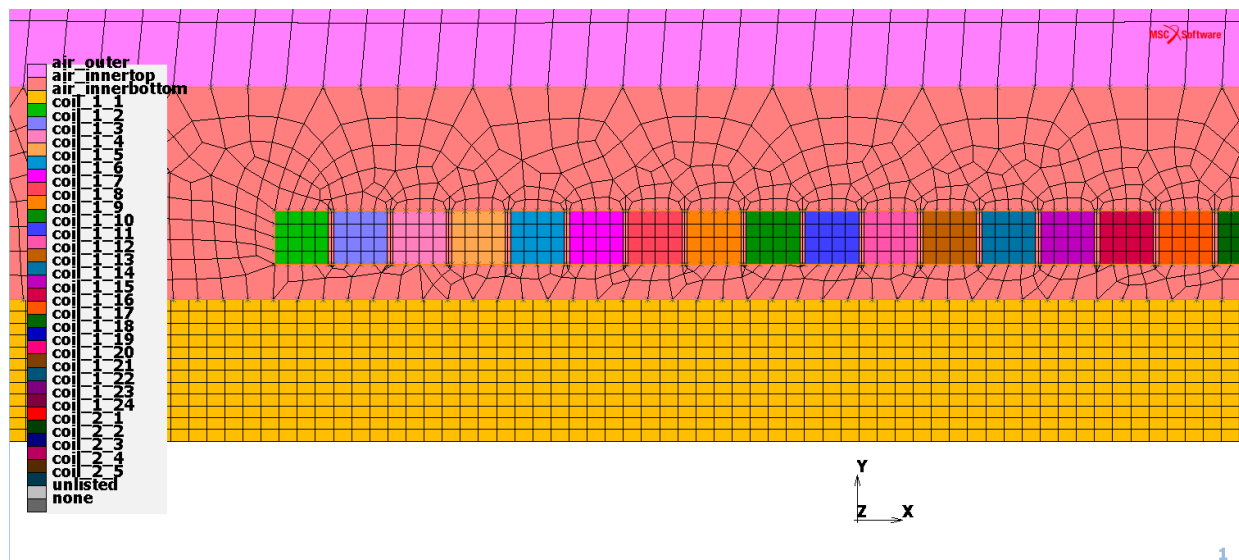
A szövetelem vizsgálathoz – a maradék ausztenit és keménység vizsgálatánál is felhasznált mintákat használtam, a szokásos metallográfiai előkészítés után (mechanikus csiszolás, polírozás és nitállal történő maratás) Zeiss EVO MA10 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A berendezés egy EDAX DX4 típusú mikroszondával van kiegészítve, amely 5 (B) - 92 (U) rendszámú elemek vizsgálatát teszi lehetővé.

## 8.8. Az edzett rudak többlépéses hőkezelési folyamatának vége-selemes szimulációja

A rúd hőkezelési folyamatának számítógépi szimulációját az MSC.Marc vége-selemes szoftver segítségével végeztem el, ami lehetővé teszi a teljes folyamat modellezését, vagyis a hevítési és hűtési ciklusok összekapcsolását. A folyamatot magnetodinamikus és termo mechanikus feladatként értelmeztem, amiben figyelembe vettem az elektromágneses terekre vonatkozó összefüggéseket, a hővezetési formulákat. A hűtési ciklusokat szimpla termomechanikus feladatként oldottam meg, ahol a hőátadás és hővezetés egyenleteinek megoldásánál az ötvözet fizikai és mechanikai tulajdonságait vettem figyelembe. A komplex modell az ipari körülményeket csak korlátozottan képes figyelembe venni. Az üzemi technológia körülményei a munkadarab állandó sebességű és folyamatos adagolását teszik lehetővé az egymást követő hevítési és hűtési ciklusok és a hőkezelő berendezések paramétereinek összehangolásával, miközben a munkadarab hőmérséklete az időtől és a helytől függően változik. A teljes technológiai sor hét darab hőkezelési ciklust (előhevítés, hevítés, vízpermet hűtés, előhevítés, hevítés, hőntartás, levegőn hűtés) és összesen 76 darab indukciós tekercset foglal magába. A vége-selemes környezet és a számítógépek kapacitása egyelőre nem teszi lehetővé, hogy az előbb említett technológiai sort (76 darab tekercs, nyolc méteres munkadarab) és a folytatólagos gyártást egy vége-selemes modellbe beépítsük. Így a modellezés az üzemi hőkezelési folyamat bizonyos szintű egyszerűsítését követelte meg.

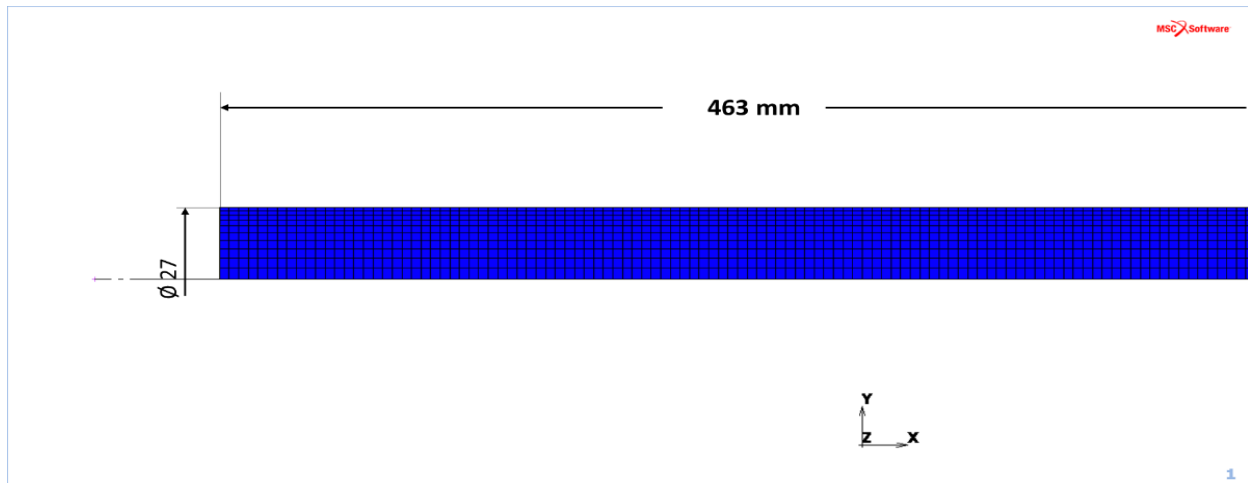
### Vége-selemes modell felépítése

A rúd geometriája és a hevítés körülményei lehetővé tették, hogy a folyamatot tengelyszimmetrikus feladatként értelmezsem. Így a munkadarab és a tekercs geometriát is síkbeli négy csomópontú vége-selemekből építettem fel, a közöttük lévő légrést, valamint a hevítési zóna környezetét szintén vége-selemmel helyettesítettem. A 25. ábra a teljes modell egy részletét mutatja, ami magában foglalja egy indukciós tekercs szálait és azok környezetét.



25. ábra Az indukciós tekercs szálak és környezetük vége-selemes diszkretizációja

A tekercsszálaban és annak környezetében, illetve a rúd felülethez közeli zónájában megfelelő szintű hálósűrítést alkalmaztam, így a modell összesen 28798 darab végelelemet tartalmaz (26. ábra).



26. ábra A tengelyszimmetrikus acélrúd végeleemes modellje

A gyakorlatban alkalmazott rúd hosszát lekorlátoztam és egy 463 mm-es hosszúságú rúddarabbal helyettesítettem, aminek minden más mérete a névleges méretekkel megegyező. Emellett a technológiai sort is egy rövidebb szegmensként modelleztem, ami összesen hét darab indukciós tekercset foglal magában. Edzéskor figyelembe vettem a fázisátalakulást is, és az anyagminőséget a gyárral megegyezőnek tekintettem. Egyszerűsítést alkalmaztam, úgy vettem, mintha a rúd mozdulatlan lenne, mivel mozgás esetén a szoftver nem jól számol. Az átalakulás figyelembevételéhez a rúdból csak egy 1 méteres szakaszt építettem a modellbe. Egyébként teljes hosszal számolva nagyon lassú a számítás és a relatív elmozdulást is problémás figyelembe venni. A hőátadási tényezőt a szoftver adatbázisából vettem, konstans értékkel (35000 W/m<sup>2</sup>K), ez a Jominy teszt VE modellezésénél is használt érték. Ezzel a kinematikai viszonytal egyrészt biztosítottam a rúd egyenletes hevítését, másrészt elkerültem a rúd esetleges visszahűlését. Mindezeket figyelembe véve az edzés előhevítési és hevítési szakasza három-három periódust, a megeresztés előhevítési, hevítési és hőntartási szakasza rendre három, hat és négy periódust tartalmazott. Az edzést a gyors hűtés, míg a megeresztést a lassú hűtési szakasz követte. A teljes hőkezelést egy feladatban nem lehet megoldani, ezért a folyamatot négy részfolyamatra bontottam fel. Az első rész jelentette az edzési hőmérsékletre való felhevítést, a második rész a gyors lehűtést, a harmadik rész a megeresztési hőmérsékletre való hevítést és hőntartást, negyedik pedig a levegőn történő lassú lehűlést.

### Az anyagtulajdonságok összefoglalása

A rúd hevítése és lehűlése közben jelentős mértékű rugalmas deformáció következik be a munkadarabban, illetve lokálisan, kellő nagyságú feszültség elérésekor akár képlékeny megfolyás is létrejöhethet. Az eltérő hűlés és a hőmérséklet mező inhomogenitása miatt jelentős mértékű húzó és nyomófeszültségek jelentkeznek a rúd tengely radiális és tangenciális irányában, így a feszültségek és alakváltozások közötti összefüggésekben az ötvözetek hőmérséklet érzékeny anyagtulajdonságai is megjelennek. A hőmérsékletfüggő fizikai és mechanikai tulajdonságok



meghatározása meglehetősen hosszas laboratóriumi méréseket igényelnek, ezért az általam vizsgált ötvözet anyagtulajdonságait az MSC Marc anyagadatbázisból importáltam a végeeselemes modellbe. A rudat rugalmas - képlékeny anyagként definiáltam, ami a teljes folyamatban homogén, izotróp keményedő anyagként viselkedik. A rugalmassági modulusz, és az alakítási szilárdság jelentősen, míg a hőtágulási tényező, a hővezetési tényező, a fajlagos hőkapacitás pedig egy bizonyos tartományig (körülbelül 600°C) hőmérséklet függő. Ezen értékeket a **2. Melléklet** tartalmazza.

A hevítésre érvényesek az elektromágneses indukció törvényszerűségei, ezért a mágneses és elektromos terekre felírt összefüggések arányossági tényezőit szintén szükséges megadni a folyamat szimulációhoz. Ezek az anyagtól és a hőmérséklettől függő arányossági tényezők, a mágneses permeabilitás valamint az elektromos permittivitás, amelyek értékeit az elektromágneses indukciós kölcsönhatásban résztvevő elemek mindegyikére meg kell határozni. Ezek az elemek, a hevített rúd, a hevítési zóna környezetét kitöltő levegő, a tekercs szálak. Az előbb említett állandókat és az elektromos vezetőképességet a **3. Melléklet** tartalmazza.

### **Peremfeltételek megadása**

A rúd az egész folyamat alatt állandó sebességgel mozog a tekercsek között, ezt a mozgást a forgástengely mentén elhelyezkedő csomóponthoz kötött elmozdulás kényszerrel adtam meg. A gyors és lassú hűtéskor lejátszódó hőátadás paramétereit ún. termikus peremfeltételeken keresztül adtam meg, ami magában foglalja a hűtőközegek állandó hőmérsékletét ( $T_{viz}=28^{\circ}C$ ,  $T_{levegő}=20^{\circ}C$ ), valamint a rúd felület és az áramló közeg közötti hőátadási tényező értékét is. A hőátadási tényező kísérleti úton történő meghatározása igen nehéz feladat, aminek értékét számos paraméter befolyásolja, mint például a hűtőközeg hőmérséklete, a határfelületi állapot, a hűtés típusa, az edzőközeg viszkozitása, az adalékolás stb. A konkrét feladat megoldásakor a Simufact Forming alakítástechnológiai végeeselemes szoftver által ajánlott, acél – víz és acél – levegő érintkezésére érvényes hőmérséklet függő hőátadási tényezőkkal dolgoztam (**4. Melléklet**). Ezek viszonylag nagy hőmérséklettartományban alkalmazható görbék.

Az indukciós hevítéskor a darab hőmérsékletét a szakaszonként változó teljesítménnyel és frekvenciával szabályozzák. A technológiai adatokból a tekercsek szálain átfolyó áram számítható, amit az indukciós tekercsekre vonatkozó peremfeltételeknél, mint állandó értéket adtam meg. A számításokban figyelembe vett tekercsáramot az **5. Melléklet** tartalmazza.

## 9. Kutatási eredmények bemutatása

### 9.1. Marópróbával meghatározott deformáció értékek

A marózás (alapanyag eltávolítás) hatására bekövetkező elhajlás mértéke a mintadarabok térfogati feszültség eloszlását, illetve a feszültség aszimmetriáját jellemzi. Az egyes technológiai lépések után mért elhajlás és  $\Delta$  elhajlás értékeket a 7. táblázat foglalja össze. Az állapotok szerinti elhajlását marás előtt és után a 27. ábra, a  $\Delta$  elhajlást pedig a 28. ábra mutatja. A változást a rúd geometriájához rögzítve rózsadiagramok formájában (29. ábra) is bemutatom. A három párhuzamos (különböző edzési hőmérsékletű) minta adatai egymáshoz képest véletlenszerűen jelennek meg, mivel a mérőháló felhelyezése a hengeres darabok mentén teljesen véletlen volt. A vizsgálat jellegéből adódóan a marózás előtti elhajlás értéke mindig pozitív. A marózást követően ez lehet pozitív vagy negatív is. Ha a marózást követő elhajlás ugyanabba az irányba esik amerre marózás előtt, az érték pozitív, ha az ellentétes irányba, akkor negatív. (Ezt szematikusan a 27. ábra rajza is mutatja.) A rózsadiagramokon a nulla vonalat erősebben emeltem ki. Feltüntettem a három minta marózás előtti, illetve marózás utáni elhajlás mértékét és azt is, hogy az elhajlás mely alkotók irányába jelentkezett. A marózás előtti állapotot tele, még a marózás utáni állapotot lyukas szimbólummal jelenítettem meg. Amennyiben a mérési pont két alkotó közé esett, akkor a közelebbi alkotóhoz rendeltem a mérési pontot. A három párhuzamos adat különböző színnel és geometriai jelölővel van feltüntetve. Hosszú egyenes vonal jelzi a marózás helyét, rövid vonal pedig a marózással keletkezett sík normálisát.

Ha megvizsgáljuk a marás előtti elhajlások értékét is, fontos megjegyezni, hogy a rúd egyenességére utaló kicsi érték (pl. vízzel hűtött, intenzíven polírozott állapot) nem garancia a kimunkálást követő kis elhajlása. Az elhajlások értéke jellemzően a  $-1 \dots 1$  mm-es tartományba esik, kivéve a vízzel hűtött rudak esetében, ahol ez a 3 mm értéket is elérheti. Az elhajlások értéke kevés kivételtől eltekintve a marás után mindig nagyobb, ez az a hatás, ami a gyakorlati életben is gyakran előfordul és problémát okoz az alkatrészek kimunkálása során. A  $\Delta$  elhajlás értékeket a rudak állapota szerint összehasonlítva az látható, hogy az edzés hőmérsékletének ilyen mértékű változtatása nem okoz érdemi és főleg nem szisztematikus különbséget. Az egyes állapotokat összehasonlítva az látható, hogy az edzést követően kapott  $\Delta$  elhajlás értékek a megeresztést követően lecsökkennek, ami logikusan kisebb feszültségre utal. Hántolást követően két rúdon nagy, az edzési értékeknek a duplája volt mérhető. Ezek a mérési eredmények azt igazolják, hogy a hántolás okozta nagy maradó feszültség nem csak a felület közelében, hanem a teljes térfogatra kifejti hatását. A hántolást követő polírozás hatására egyenletes és kicsi, a megeresztéstől is kisebb értékek alakultak ki. Az intenzív polírozás viszont megint megnöveli a  $\Delta$  elhajlások értékét a hántolt állapothoz közeli értékre. A feszültségmentesítés eléri hatását, az eddigi legkisebb  $\Delta$  elhajlás értékek ezután a lépés után mérhetőek. Azonban, ha a feszültségmentesítés hőmérsékletéről intenzíven, vízpermettel hűtünk, akkor az edzést követő deformációk hatszorosa alakul ki. Ez azt jelenti, hogy a pusztán termikus feszültségek a rudak sokkal nagyobb deformációját okozzák, mint a termikus és fázisátalakulási feszültségek kombinációja edzéskor. Ez mindenképp meglepő eredmény. Az utópolírozott rudak állapota a polírozott rudakéhoz

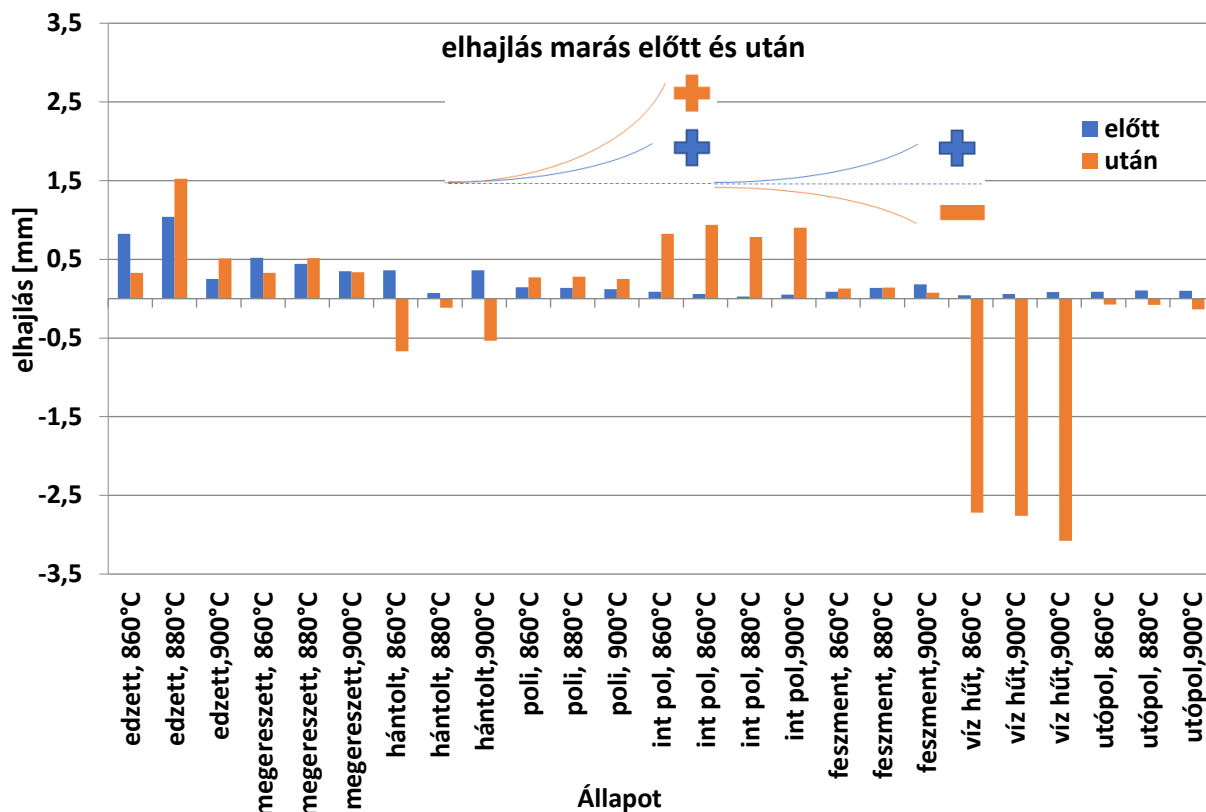
hasonló, egyenletesen kis  $\Delta$  elhajlás volt mérhető, de ez az érték nagyobb, mint a levegőhűtésű feszültségmentesítés után, vagyis az utópolírozás is növeli a rudakban lévő feszültséget.

A rózsadiagramok egyértelműen mutatják, hogy a marózást követő elhajlás szinte mindig a marózott sík normálisának irányába történik, vízűtést követően mindhárom esetben negatív irányba. Ez feltehetően arra utal, hogy a vízzel hűtött rudak feszültségeloszlása eltérő a többi esethez képest.

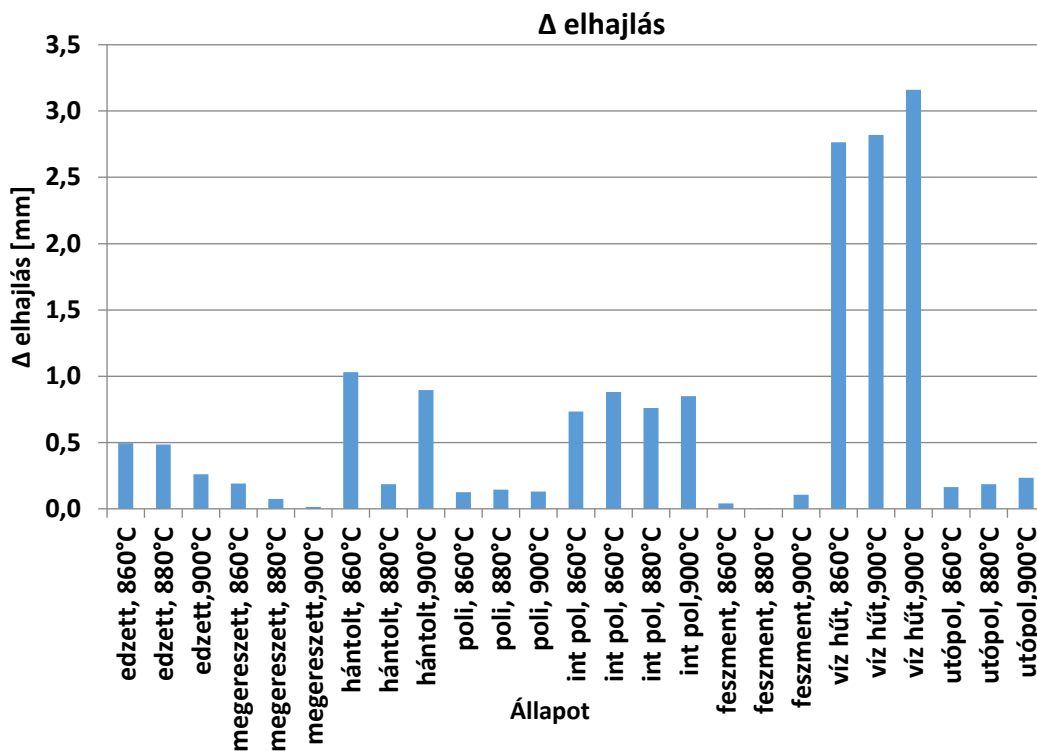
**Összességében megállapítható, hogy az általam módosított marópróbás módszerrel kapott eredmények a rudak térfogatára vonatkozó, MPa mértékegységgel nem számszerűsíthető, de a vizsgált rudak egyes gyártási lépése utáni feszültség eloszlását jól elkülöníthető módon jellemzik. Nem csak a maradó feszültség mértékére, de annak eloszlására is adnak információt. A marópróbás eredmények alapján a szériagyártásban kritikus a hántolás művelete. Egyértelmű eredmény, hogy a tisztán termikus eredetű feszültségek nagyobb méretdeformációt okoznak, mint az edzési (termikus és átalakulási) feszültségek. A marózást követő elhajlás szinte mindig a marózott sík normálisának irányába történik, és a kimunkálás előtti rúd egyenessége nem garancia a kimunkálást követő kis elhajlásra.**

7. táblázat, A különböző állapotú rudak marópróbával meghatározott deformáció értékei

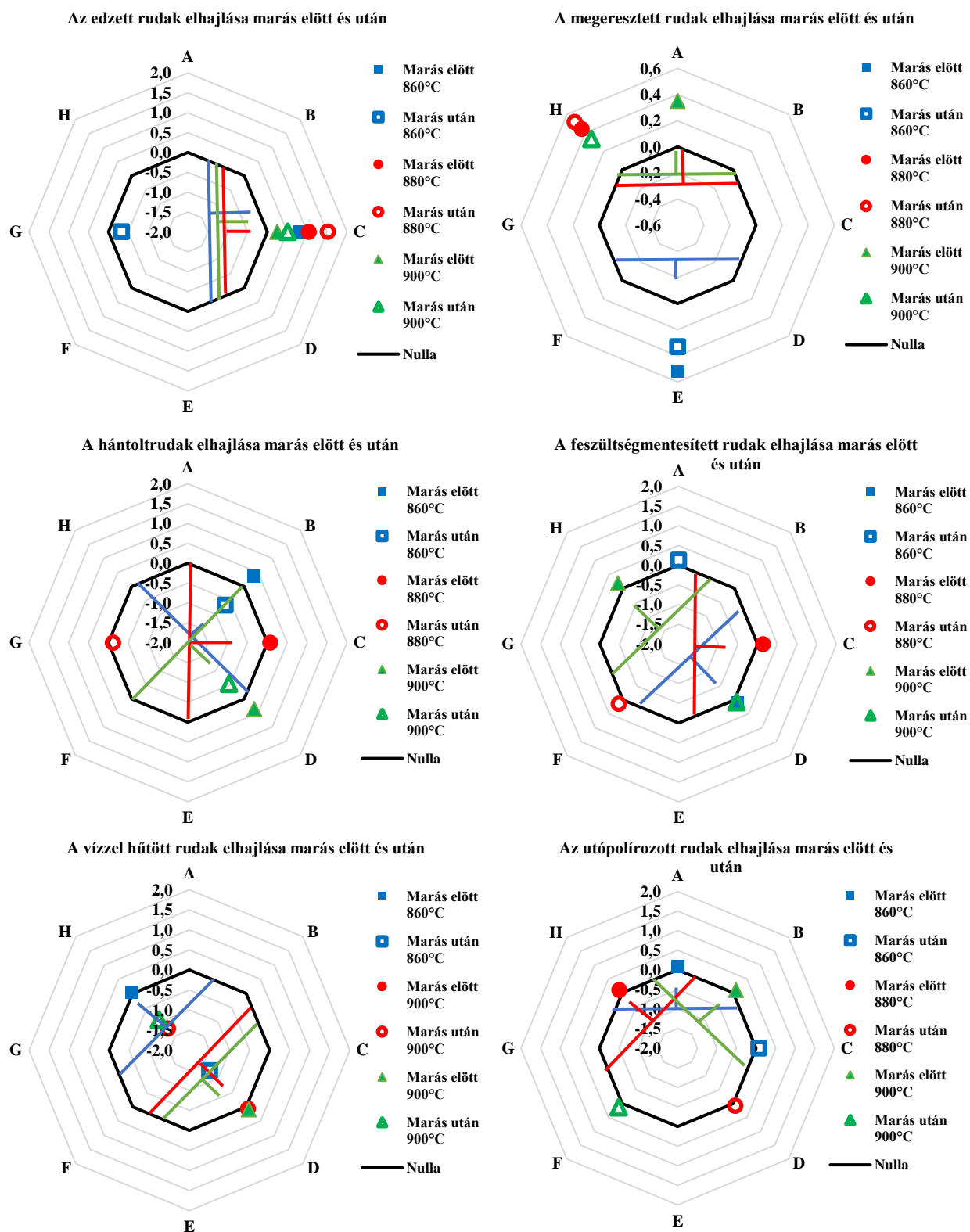
A próba száma	Edzési hőmérséklet	Állapot	Marás előtti elhajlás [mm]	0-pont [Alkotó]	Marás előtti max pont [alkotó]	Marás utáni elhajlás [mm]	Marás utáni max pont [alkotó]	$\Delta$ Elhajlás [mm]
Q2	860	Edzett	0,825	G	C	0,330	G	0,495
Q1	880		1,040	G	C	1,525	C	0,485
Q3	900		0,250	G	C	0,510	C	0,260
B1	860	Megeresztett	0,520	A	E	0,330	E	0,190
B3	880		0,440	E	A	0,515	A	0,075
B2	900		0,350	E	A	0,335	H	0,015
2VS	860	Hántolt	0,360	E	B	-0,670	B	1,030
1VS	880		0,070	F	C	-0,115	G	0,185
3VS	900		0,360	H	D	-0,535	D	0,895
PG1	860	Polírozott	0,145	-	-	0,270	-	0,125
GG1	880		0,105	-	-	0,235	-	0,130
SG1	900		0,120	-	-	0,250	-	0,130
PNG1	860	Int. polírozott	0,090	-	-	0,825	A	0,735
PNG2	860		0,060	-	-	0,940	A	0,880
GNG1	880		0,025	-	-	0,785	A	0,760
SNG1	900		0,050	-	-	0,900	A	0,850
3E	860	Fesz. mentesített	0,090	H	D	0,130	A	0,040
6E	880		0,135	G	C	0,140	F	0,005
1E	900		0,180	E	H	0,075	D	0,105
4	860	Vízzel hűtött	0,045	D	H	-2,720	H	2,765
1S	900		0,060	H	D	-2,760	D	2,820
3S	900		0,085	H	D	-3,075	D	3,160
3NP	860	Utópolírozott	0,090	C	A	-0,075	C	0,165
6NP	880		0,105	D	H	-0,080	D	0,185
1NP	900		0,100	F	B	-0,135	F	0,235



27. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért deformáció értékei, sematikus rajz mutatja az elhajlás jellegét marás után amennyiben az + vagy – előjelű



28. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért  $\Delta$  elhajlás értékei



29. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért elhajlás [mm] értékei a rudak geometriájához rögzítve

## 9.2. Felületi maradó feszültség, feszültség aszimmetria és félértékszélesség értékei

A különböző állapotú rudak edzési hőmérséklet szerinti, felületi alkotó menti feszültség eloszlását a **30. ábra** - **37. ábra** sorozat mutatja. Az ábrákon feltüntettem a felületi feszültség aszimmetria értékeit is. A maradó feszültség, feszültség aszimmetria vizsgálatokat gyártástechnológiai sorrendben végeztem el és az eredményeket is ilyen sorrendben mutatom be. A mérési adatok bizonytalansága jellemzően +/-20 MPa alatt van, ezért ezt nem tüntetem fel a diagramon, amennyiben ettől eltérő, akkor megjegyzem.

Minden egyes mérési pontban meghatároztam a félértékszélesség adatokat is, ezeket a **38. – 41. ábrák** mutatják szintén gyártástechnológiai sorrendben.

Az egyes technológiai lépések hatásának könnyebb összehasonlítása érdekében a maradó feszültség és a feszültség aszimmetria adatokból hisztogramokat is készítettem.

A nyolc technológiai lépés során a feszültség eloszlás némely esetben szélsőségesen változékony. A változékonyság nem csak a számszerű értékekre, hanem a jellegre is érvényes, húzó- és nyomófeszültségek váltakozhatnak. Az egy mintán belüli, adott jellegű feszültség eloszlás egyenletes a megeresztett és a feszültségmentesített rudak esetében, míg nagy szórást mutató a hántolt, illetve az edzett rudak esetében. Az erősen változó jelleg egy alkotó mentén is, illetve az alkotók között is előfordulhat.

Az edzési hőmérséklet a 860°C – 900°C tartományban történő változtatása nem okoz érdemi különbséget a kialakult felületi maradó feszültség jellegére. Ennek ellenére a különböző edzési hőmérsékletek mérését a vizsgálatsorozaton végig vezettem, hiszen korábbi tapasztalataim szerint az edzés utáni állapot gyakran a következő technológiai folyamatban fejt ki hatását, különösen akkor, amikor térfogati beavatkozás történik. Amennyiben a térfogati feszültség eloszlásban sincs különbség, akkor tulajdonképpen tekinthetünk a különböző edzési hőmérsékletéről edzett rudakra úgy, mint párhuzamos mérésekre. Az edzés után jellemzően feszültségmentes, vagy kis, maximum -120 MPa értékű nyomófeszültség volt mérhető (**30. ábra**). A megeresztés a mintán belüli feszültség szintet a -50 MPa ... 0 MPa tartományra csökkentette, lecsökkentve az alkotók közötti különbség értékeit is (**31. ábra**). A hántolás hatására történik a munkadarabon a legdrasztikusabb feszültség változás: egyértelműen nagy értékű és nagy szórású húzófeszültségek alakulnak ki. A feszültség változása egy alkotón belül akár 500 MPa is lehet, valamint az alkotók közti különbségek értéke is nagy, a változás a 300 ... 1000 MPa feszültség értéken belüli (**32. ábra**). A hántolást követő polírozás a feszültség ilyen mértékű lengését lecsökkenti, jellemzően -50 ... 100 MPa tartományon belüli értékekre. A hántolásnál tapasztalható nagy húzófeszültségből polírozás után már nyomófeszültség is kialakulhat (**33. ábra**). A párhuzamos mérési eredmények ugyanezt az eredményt mutatták (**9. Melléklet**). Az intenzívebb polírozás esetében a mintán belüli szórás nagyobb (**34. ábra**), amelyet a párhuzamosan elvégzett kísérletek is igazoltak (**10. Melléklet**). A feszültségmentesítés eléri célját, a mérhető feszültségek kisebb értékűek, eloszlásuk egyenletesebbé válik. Jellemzően a kis húzófeszültségek, 0 ... 50 MPa tartományba tolnak át (**35. ábra**). Ha a feszültségmentesítés után vízhűtést alkalmazunk, akkor a felületi rétegekben közepesen nagy nyomófeszültség értékek idézhetők elő, az értékek jellemzően -400 ... -300 MPa között vannak. Az adatok egyes alkotók közötti különbsége is megnő (**36. ábra**). Az ábrán azonos állapotú rúdon az alkotó mentén 5 pontban, illetve 25 pontban történt mérési eredmények is

összehasonlíthatók. Megállapítható, hogy a rúd mentén az 5 pontban történt mérés által kapott információ megfelelően jelzi annak állapotát.

Az utópolírozás a feszültségmentesített állapothoz képest nyomófeszültséget eredményez, jellemzően -150 ... 0 MPa értéken belül, az alkotók közti különbségek nagyok. Esetenként megfigyelhető az alkotók lefutása közötti hasonlóság, például 860°C-os edzés esetében 340 mm-nél, 880°C-os edzés esetében 255 mm-nél, valamint 900°C-os edzés esetében 170 mm-nél (37. ábra).

A hajlító igénybevétel feszültség eloszlásából kiindulva a rudak elhajlását nem a feszültség, hanem a feszültség aszimmetriája okozza, ezért ezt is meghatároztam. Edzés után az aszimmetria értékek alkotó páronként eltérőek és a hossz tengely mentén is változatos értéket mutatnak. Ahogy ez várható, a megeresztés után az értékek 50 MPa alá csökkennek és egyenletesebbé válnak (31. ábra). A hántolás nem csak nagy feszültségértékeket, de nagy aszimmetriával rendelkező állapotot idéz elő, az alkotók közötti különbségek nagyon nagyok (32. ábra). A polírozás hatására a feszültség aszimmetria értékek 100 MPa alá esnek, míg az intenzív polírozás hatására nagyobb lesz az aszimmetria, jellemzően 100 MPa feletti. Ez jól mutatja, hogy a feszültség aszimmetriára illetve a feszültség eloszlásra az erős polírozás mennyire káros (33. ábra - 34. ábra). A feszültségmentesítés az aszimmetriában is kis értékeket eredményez, egy -két kiugró ponttól eltekintve (35. ábra). A vízűtés heterogén feszültség állapotot eredményező hatása az aszimmetria adatokon is látszik, alkotónként és alkotón belül is nagy a különbség (36. ábra). Az utópolírozás a közbelső polírozáshoz hasonlóan a feszültségmentesített állapotot aszimmetria szempontjából is károsan változtatja: megnöveli az alkotón belüli és alkotók között kialakult feszültséget (37. ábra).

A munkadarabokban kialakult makro, és mikro feszültségek a félértékszélesség adatokban is megjelennek, értékük a nyolc különböző technológiai lépés után jellemzően a 2...4,5° között változik. Edzés után mértem a legnagyobb értékeket, ezenkívül a darabon belüli változása mind az alkotók mentén, mind az alkotók között jelentősen eltérő. Annak ellenére, hogy a normálfeszültség esetében az edzési hőmérséklet közt nem tudtam különbséget kimutatni, a félértékszélesség ettől érzékenyebben reagál. Növelve az edzési hőmérsékletet, a darabok között, az egy darabon belül, sőt az egy alkotón belül mért adatok között is nagyobb eltérések vannak. Értékük 3,8 ... 4,5° között változik (38. ábra). Az edzést követő megeresztés hatására a félértékszélesség is drasztikusan csökken 2,5° alá. A hántolás hatására a félértékszélesség is újra növekszik, kicsivel az edzett alatti 4° értéket veszi fel. A darabon belüli szórása mindenképp kisebb az edzett darabokéhoz képest (38. ábra). A polírozás majd 1° -kal, körülbelül 3° -ra csökkenti a félértékszélességet. A polírozás hatására a lokális alakváltozás egyenletlenségére utal a görbék hullámossága. A kétféle polírozás között nem mutatkozik érdemi különbség (39. ábra). További félfokos csökkenést eredményez a feszültségmentesítés. A mérési adatok itt kiegyenlítettebbek, szórásuk az alkotón belül és alkotók közt is nagyon kicsi, viszont az átlagos értékek nagyobbak, mint a megeresztett rudak esetében (40. ábra). Az utópolírozás a közbelső polírozáshoz hasonlóan a mérési eredmények darabon belüli szórását megnöveli, azonban meglepő eredmény, hogy az átlagos értékek a feszültségmentesített rudakhoz képest kisebbek (41. ábra). A feszültségmentesítést követő vízűtés a mikro feszültségben nem jelentkezik, a félértékszélességek kicsik, eloszlásuk egyenletes, a feszültségmentesített rudakkal egyező értékű (41. ábra).

A különböző állapotú rudak felület közeli rétegeiben mért rugalmas maradó feszültség és a feszültség aszimmetria értékekből készített hisztogramokat a 42. ábra mutatja. A hisztogramok átfogó képet adnak az egyes technológiai lépések során kialakult feszültségértékek, illetve feszültség aszimmetria értékekről. Az egyes megmunkálási fázisok során kialakult feszültségek jellemzően -200 ... 100 MPa közötti értékek. Ez alól kivétel a hántolás, amely során a 900 MPa-t meghaladó értékek is gyakoriak. A feszültség aszimmetria értékek a hántolás kivételével jellemzően 100 MPa körüliek, míg a hántolás során kialakult aszimmetria ettől jóval nagyobb, 600 MPa körüli értékek is gyakran előfordulnak. Ezek alapján kijelenthető, hogy a technológiai lépések közül a maradó feszültség mértéke és aszimmetria szempontjából egyaránt a hántolás a kritikus lépés.

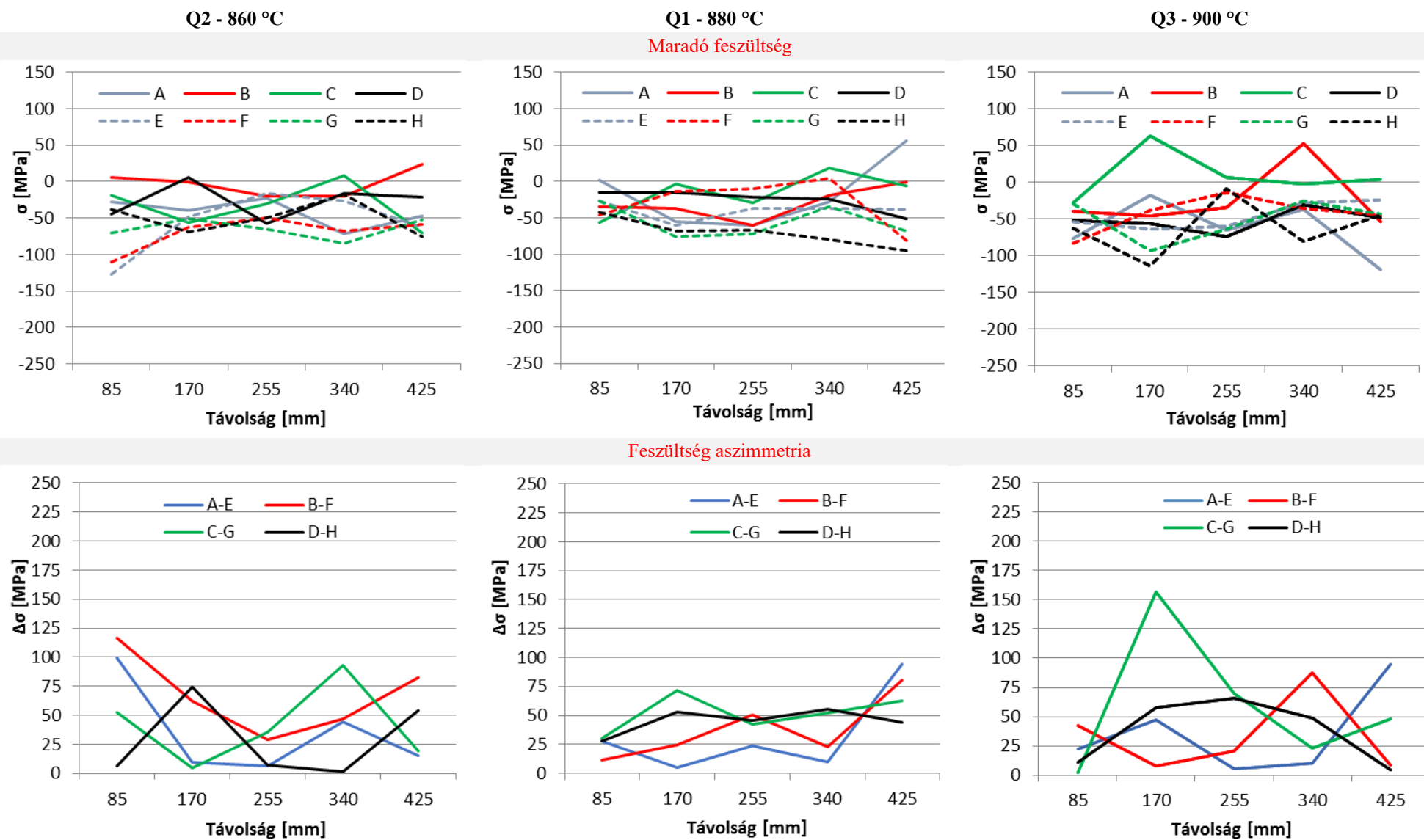
A tényleges gyártás során alkalmazott polírozás, valamint az intenzív polírozás hatása szintén jól összehasonlítható a hisztogramokon. A 43. ábra a kétféle polírozás után kialakult feszültség értékek és feszültség aszimmetria értékek hisztogramjait mutatja. A diagram jól szemlélteti, hogy az intenzív polírozás után valamelyest nagyobb húzófeszültség (szélesebb feszültség tartomány) marad a rudakban, mint normál polírozás után. Ez érdekes eredmény, hiszen az intenzív polírozás nagyobb nyomóerővel történt, mint a normál polírozás. Ezzel együtt az intenzív polírozás után maradt feszültség aszimmetriája lényegesen nagyobb értékű (~maximum 180 MPa), és változatosabb adatokat vesz fel, mint normál polírozás esetében (~ maximum 120 MPa). Ezek alapján kijelenthető, hogy a polírozásnál alkalmazott nyomóerő növelése nem feltétlenül okoz nagyobb nyomófeszültséget, viszont a feszültség aszimmetriát növeli, ami biztosan káros.

A feszültségmentesítést követő vízhűtés hatásáról (44. ábra) azt lehet megállapítani, hogy az intenzívebb hűtés változatosabb feszültség aszimmetriát eredményezett.

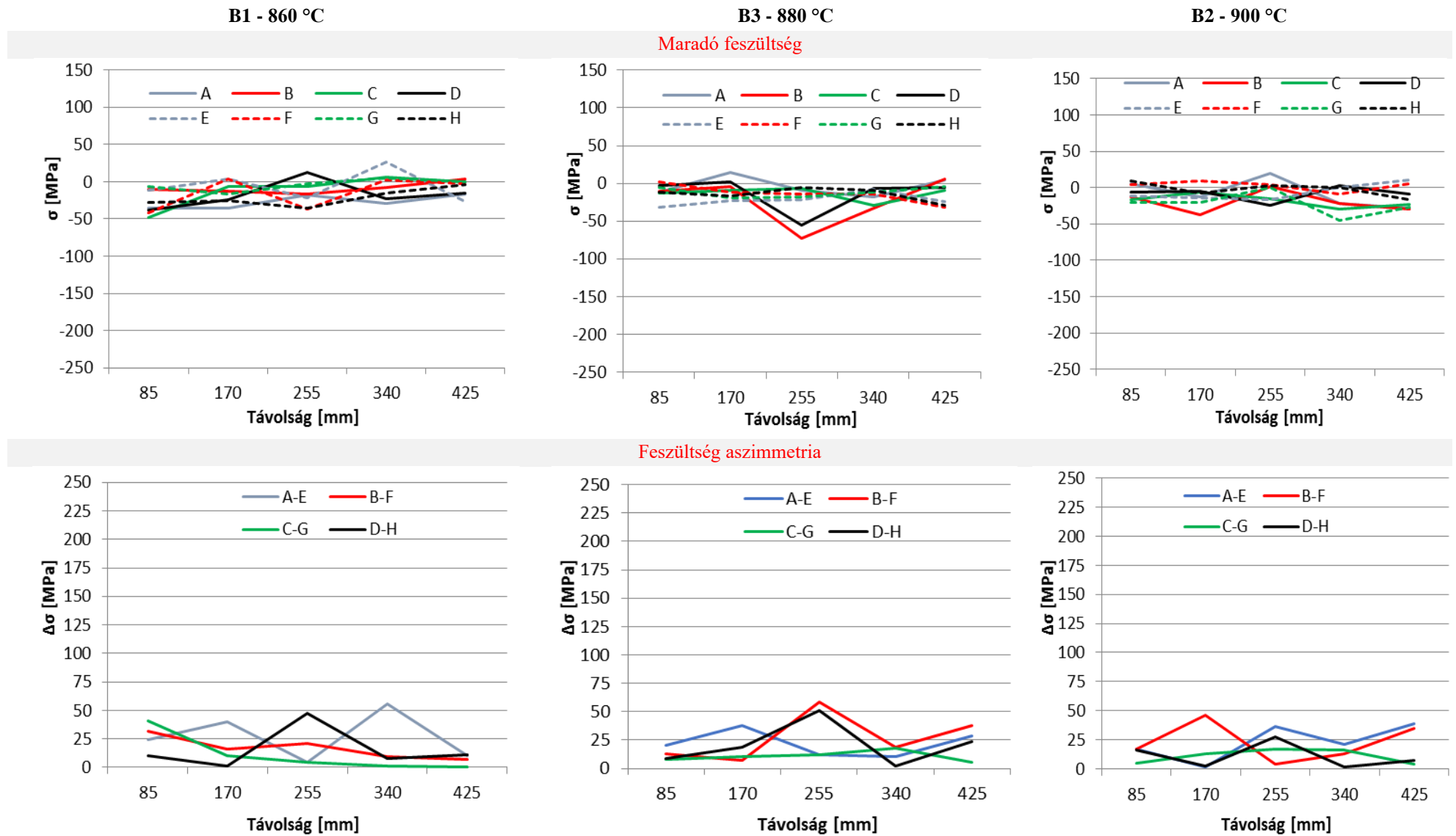
**Összességében a felületi maradó feszültség vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy az általam választott mérési hálóval (8 alkotó menti, alkotónként 5 pontban, egymástól az átmérő kb. 3-szorosa távolságra elhelyezett mérési pontokkal) a rudak állapota feltérképezhető. Az állapot feltérképezésénél nem csak a feszültségértékeket, hanem a feszültség aszimmetria adatokat és a félértékszélesség értékeit is célszerű meghatározni, és az eredményeket együttesen vizsgálni. A röntgendiffrakcióval meghatározott eredmények a marópróbával kapott információkkal jól korrelálnak.**

**A rudak állapotára vonatkozóan a mért feszültség adatokat és a deformációs adatokat összevetve azt a megállapítást teszem, hogy amennyiben a mért értékeken belül a feszültség és az aszimmetria értékek kicsik, nem várható a rudak elhajlása (pl. polírozott, feszültség mentesített állapot). Deformáció várható mindazon esetben, ha a feszültség jellemzően kicsi, de az aszimmetria jelentős (intenzíven polírozott állapot), vagy, ha kis aszimmetria mellett nagy feszültség, akár húzó vagy nyomó (vízzel hűtött állapot) van a felületen, és aszimmetrikus anyageltávolítás történik. Különösen hátrányos a helyzet, ha nagy feszültség nagy aszimmetriával párosul (hántolt állapot). Megállapítható, hogy a hántolás a kritikus technológiai művelet, az utópolírozás pedig kimondottan káros. A technológia gyorsítása szempontjából esetlegesen (nem széria gyártásban) alkalmazott vízhűtés is rendkívül károsan befolyásolja a rudak állapotát.**

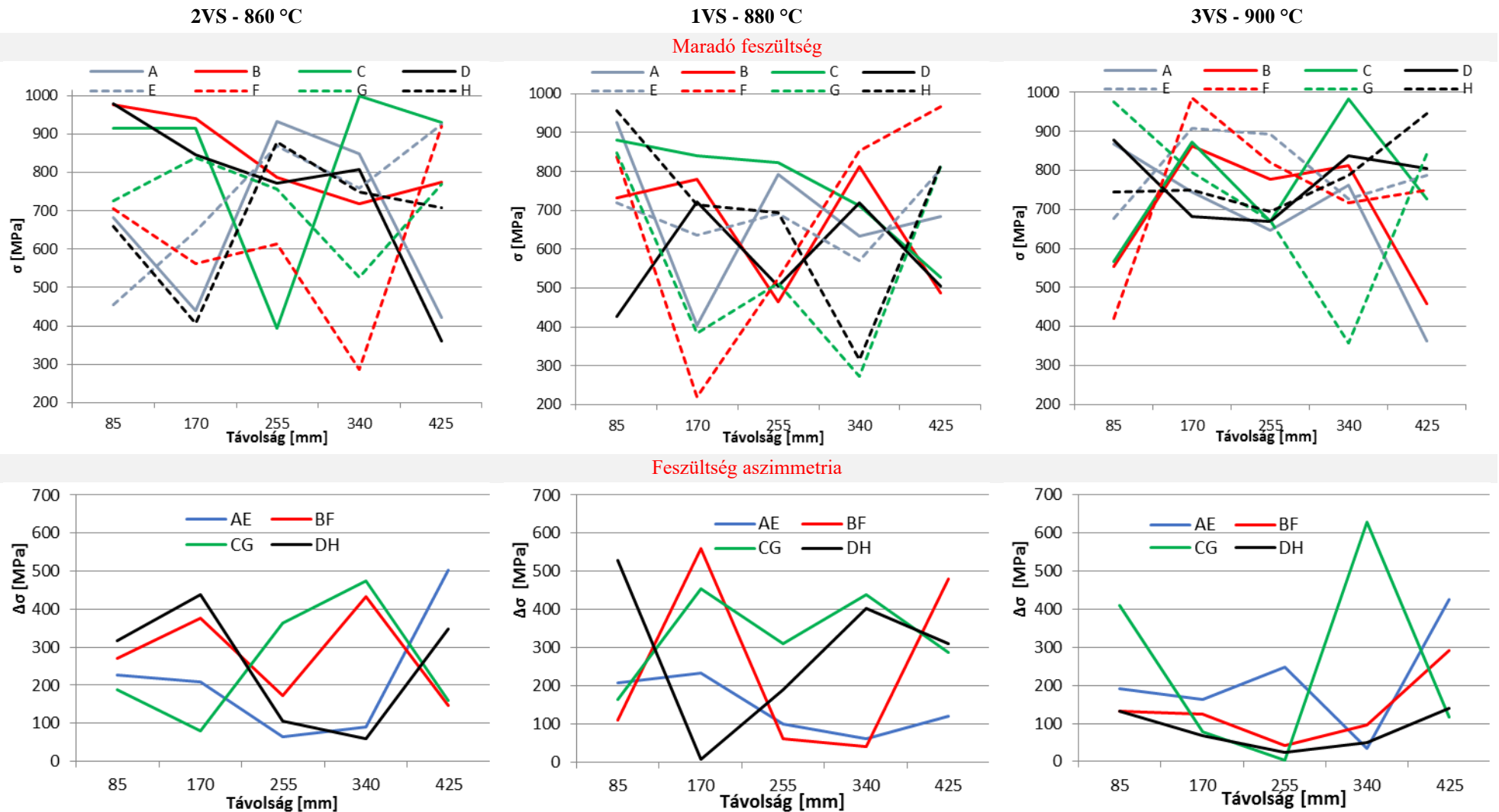




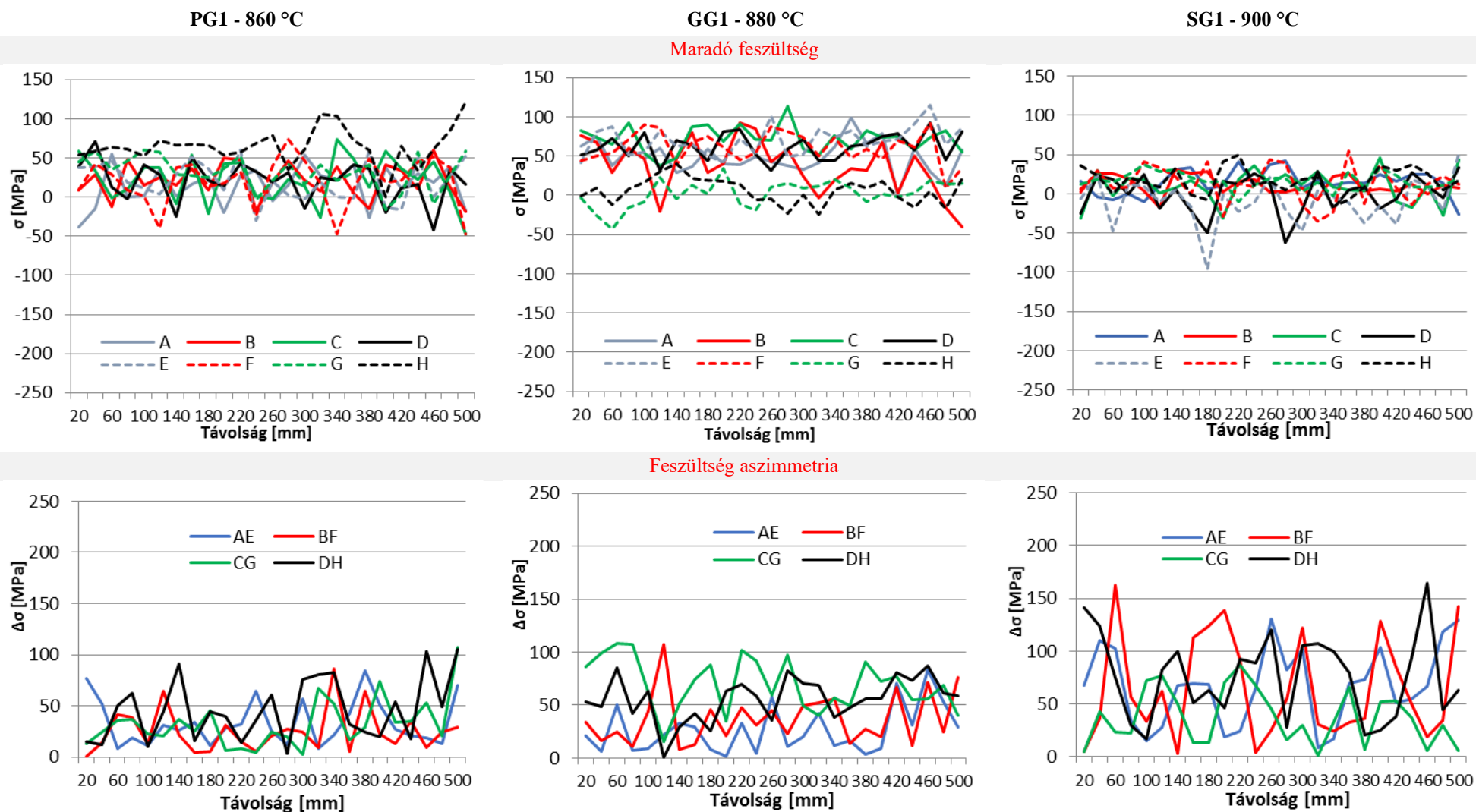
30. ábra Az edzett rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai



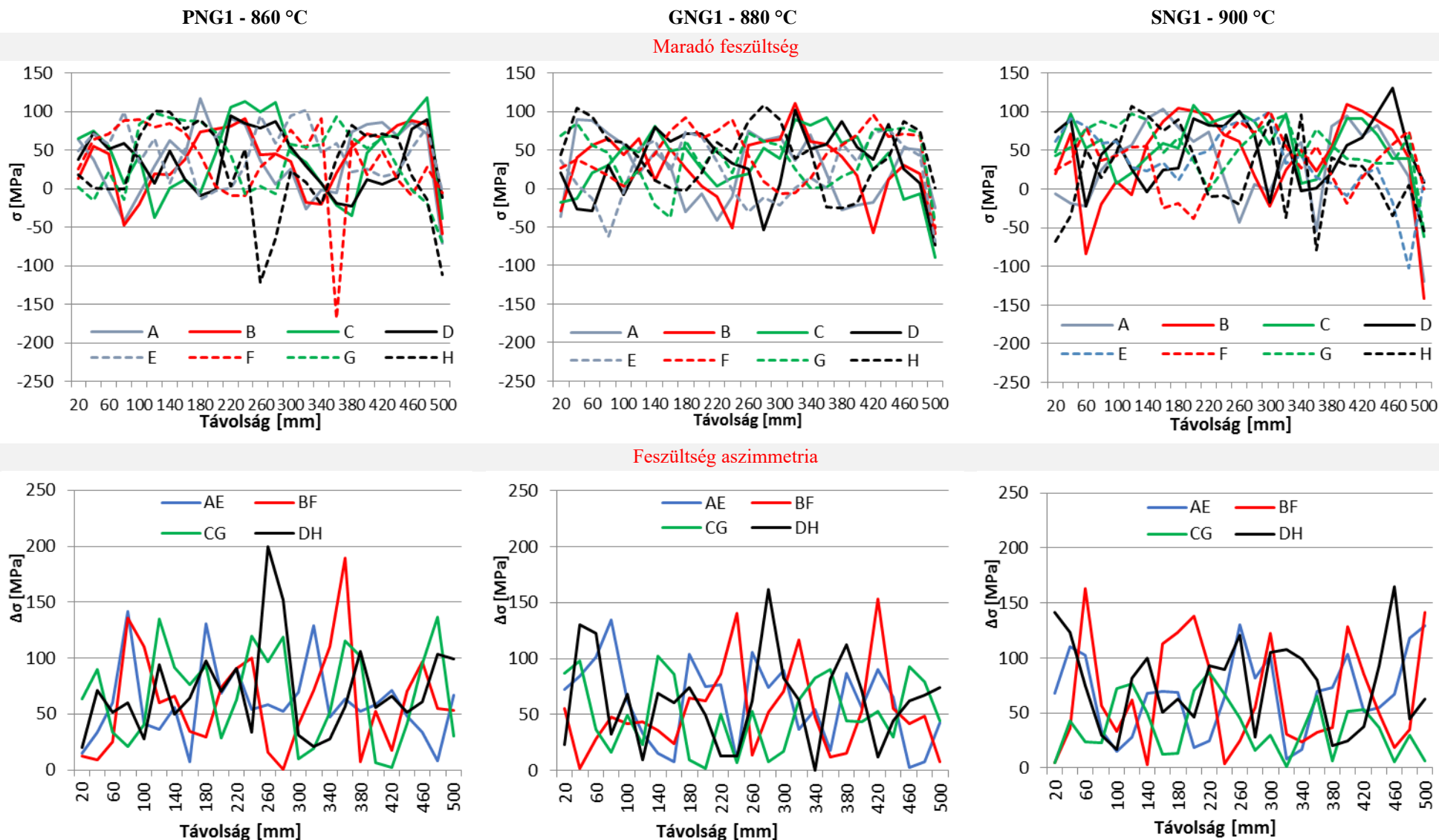
31. ábra A megeresztett rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai



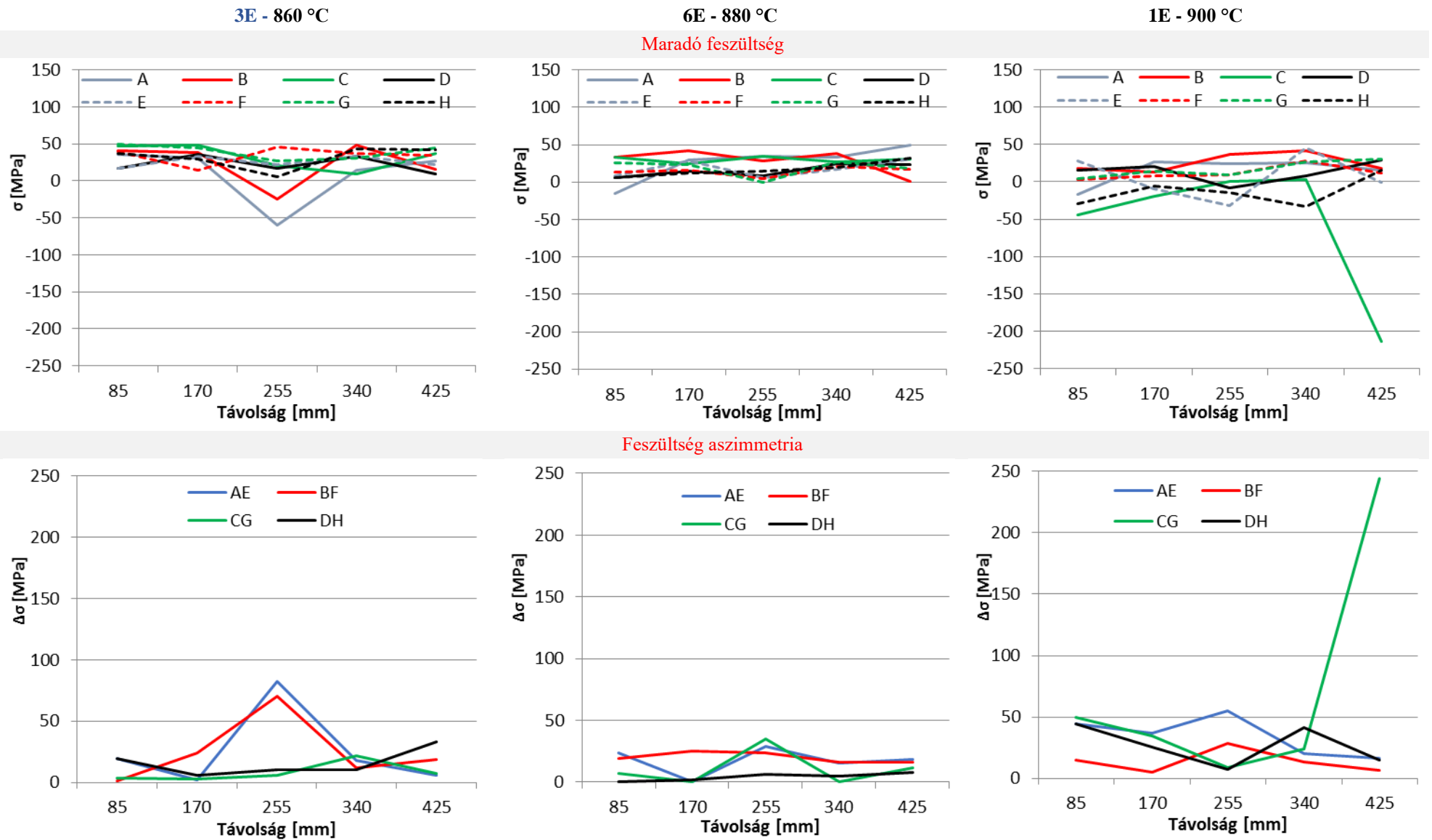
32. ábra A hántolt rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai



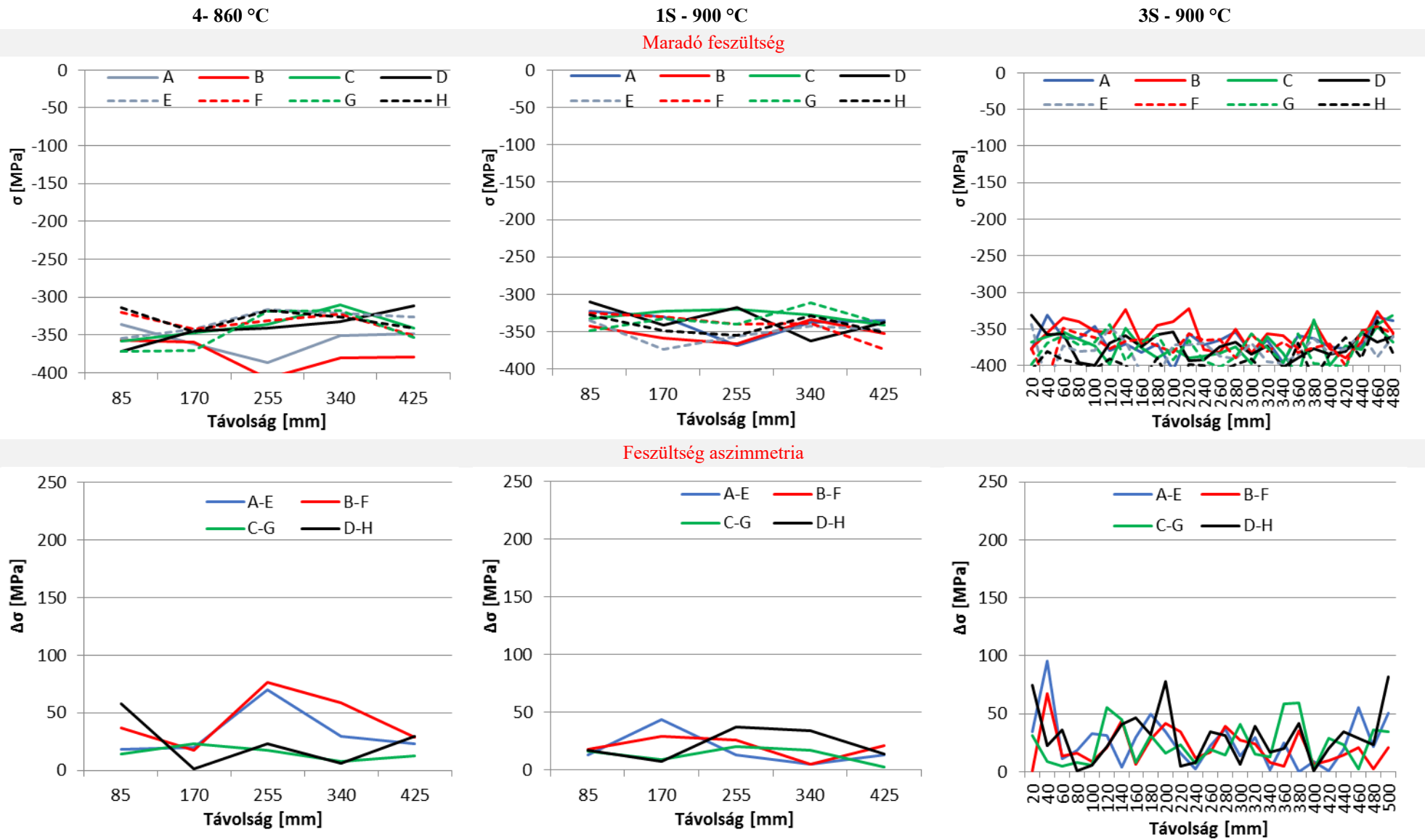
33. ábra A polírozott rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai



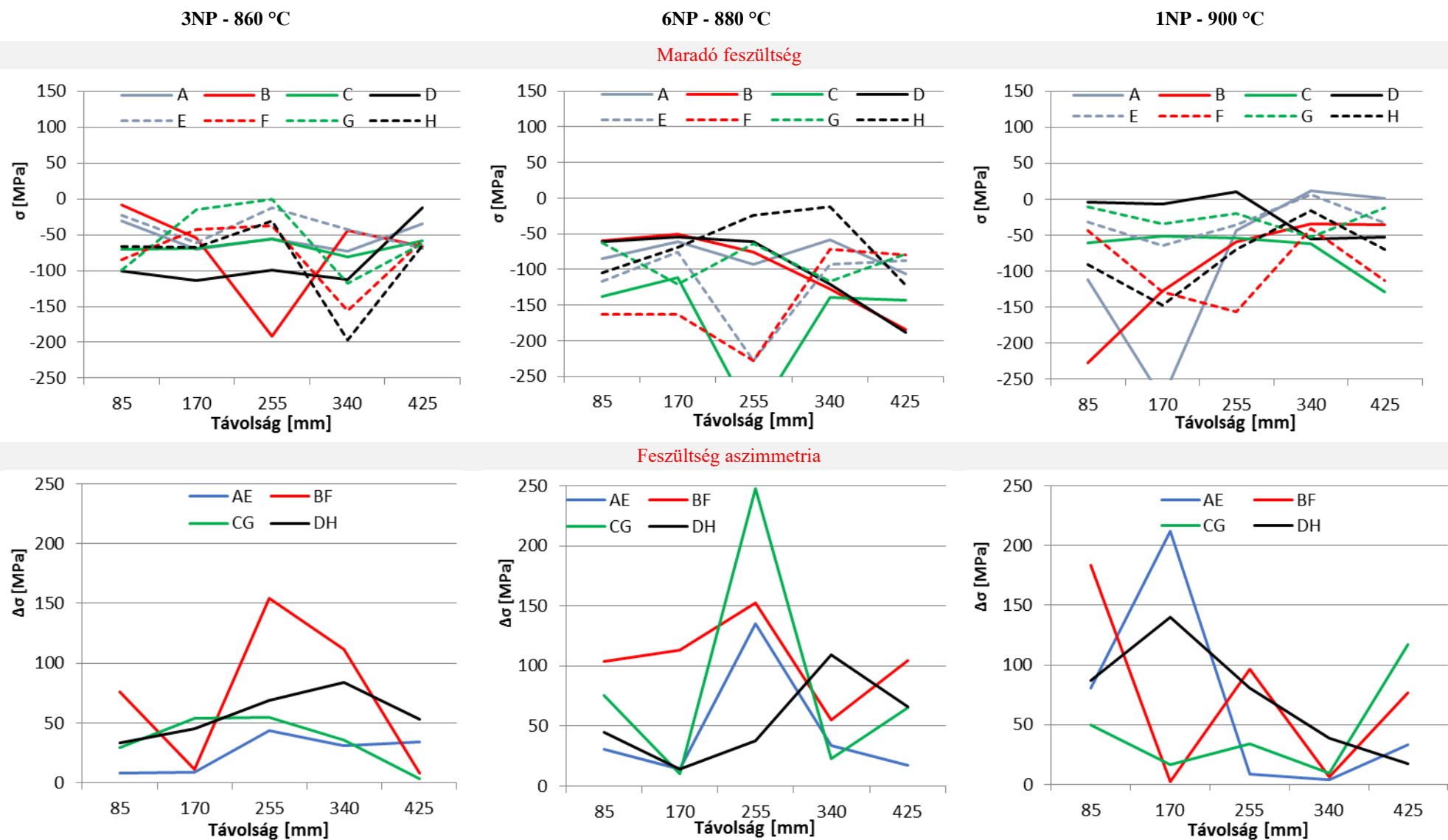
34. ábra Az intenzíven polirozott rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai



35. ábra A feszültségmentesített rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

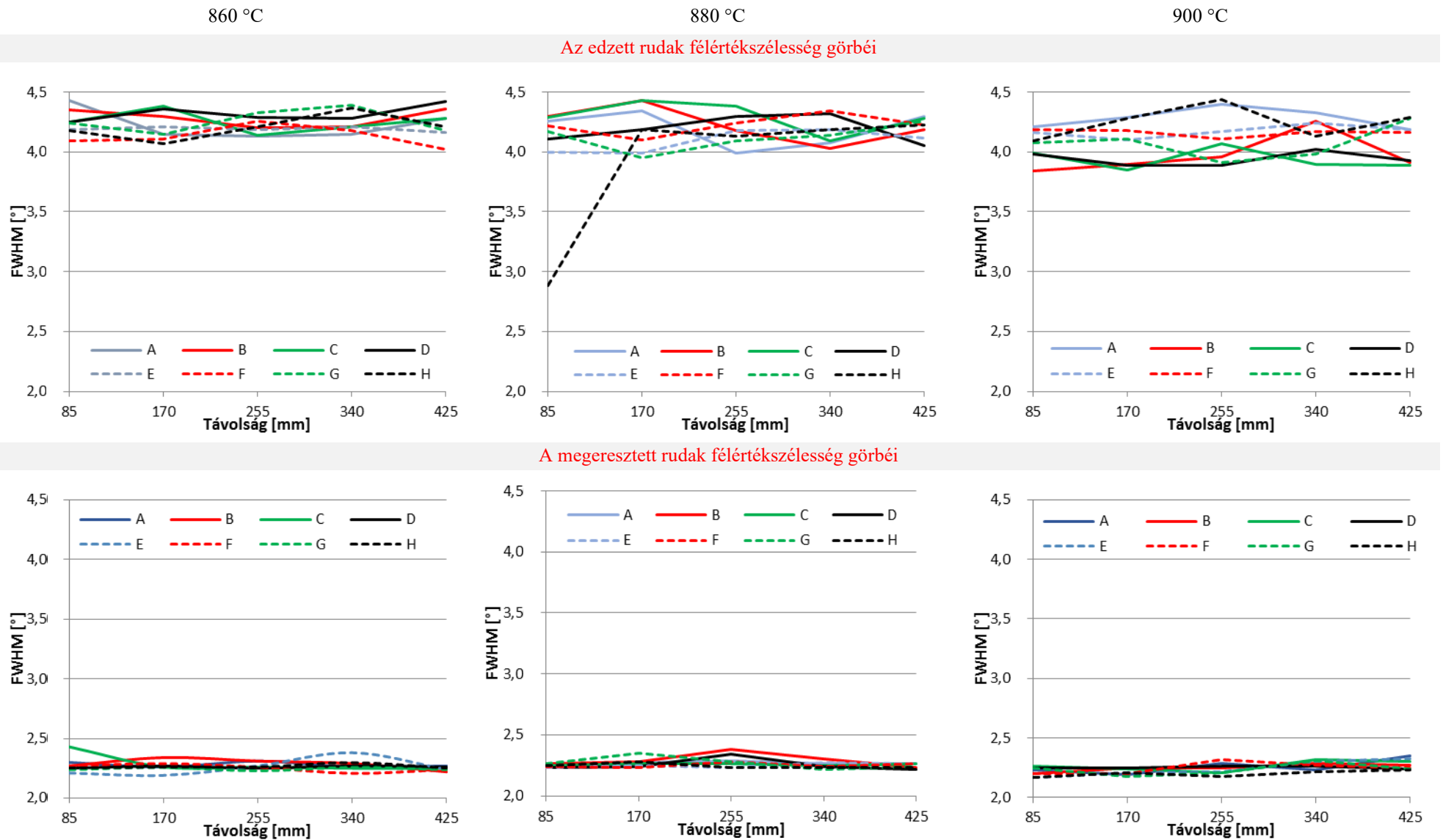


36. ábra A vízzel hűtött rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

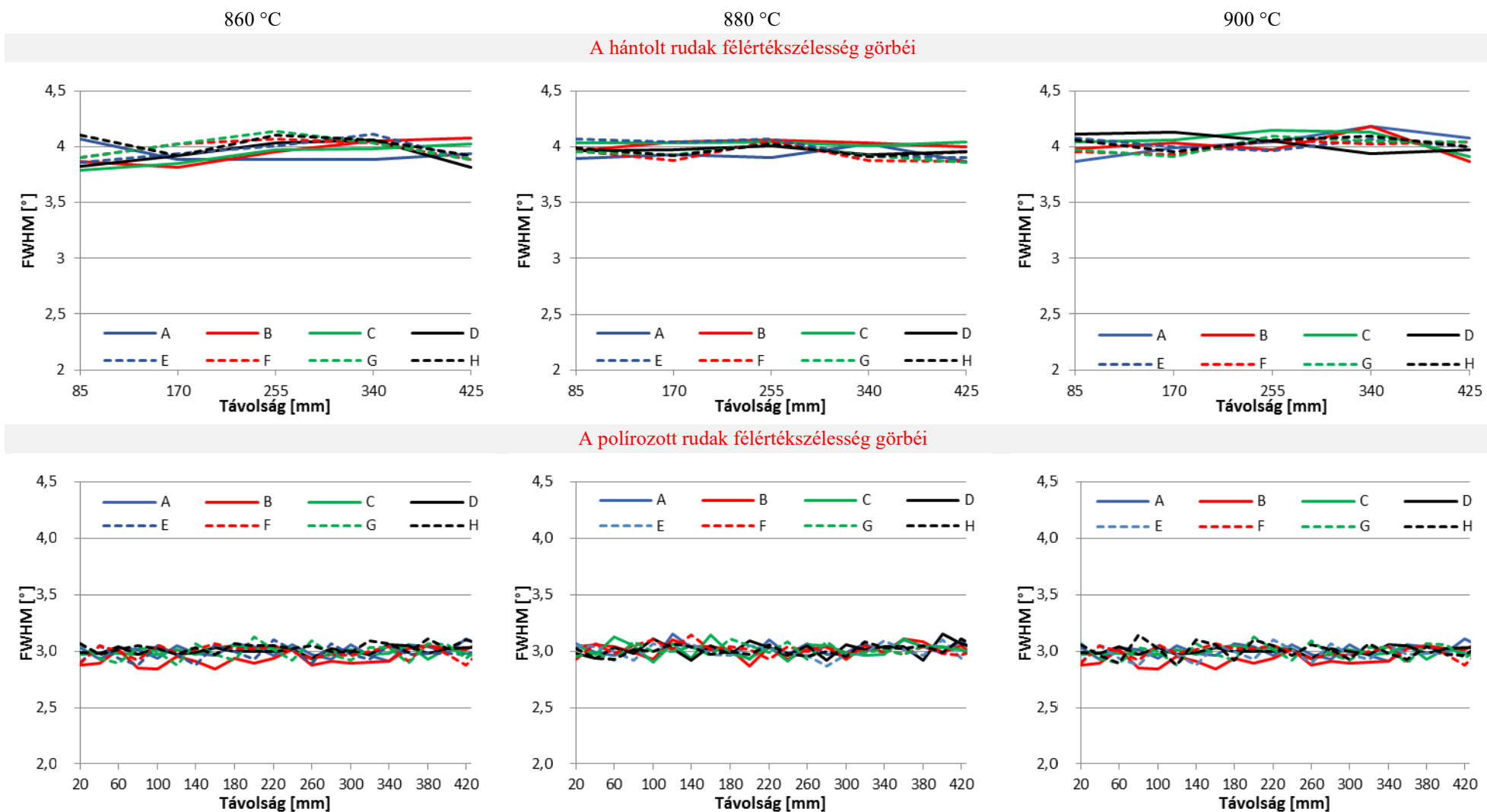


37. ábra Az utópolírozott rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

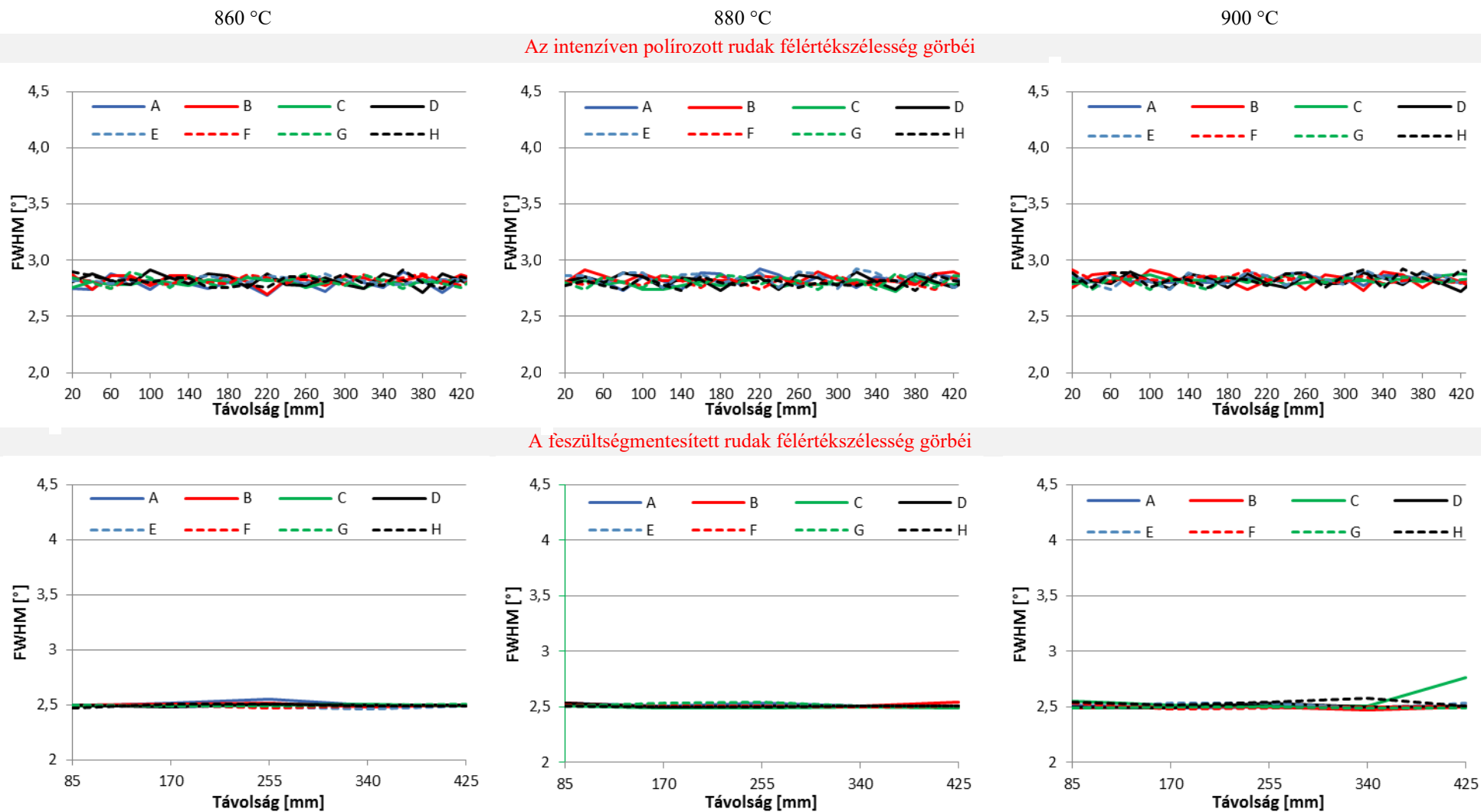




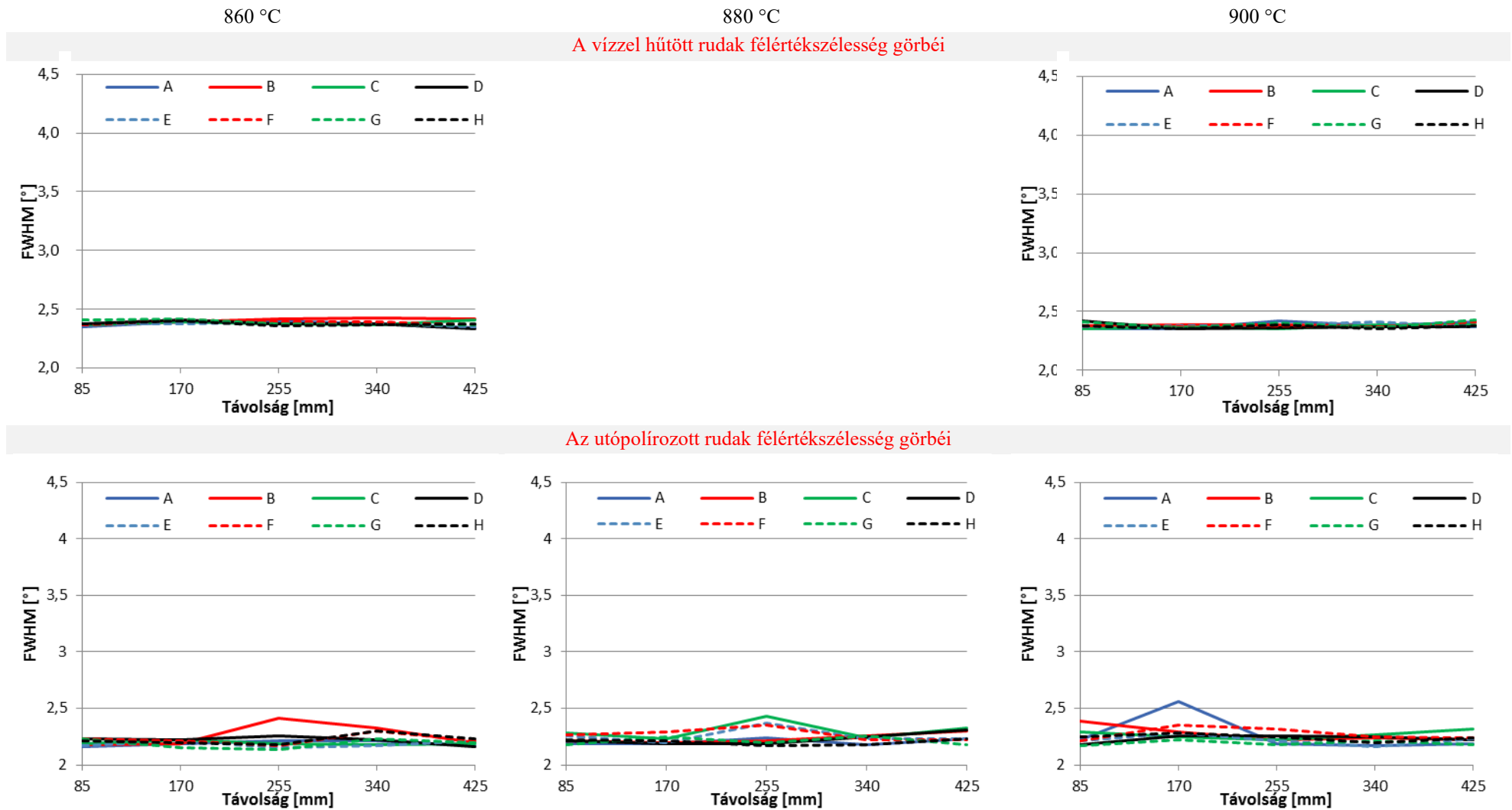
38. ábra Az edzett és a megeresztett rudak félértékszélesség diagramjai



39. ábra A hántolt és a polírozott rudak félértékszélesség diagramjai



40. ábra Az intenzíven polírozott és a feszültségmentesített rudak félértékszélesség diagramjai



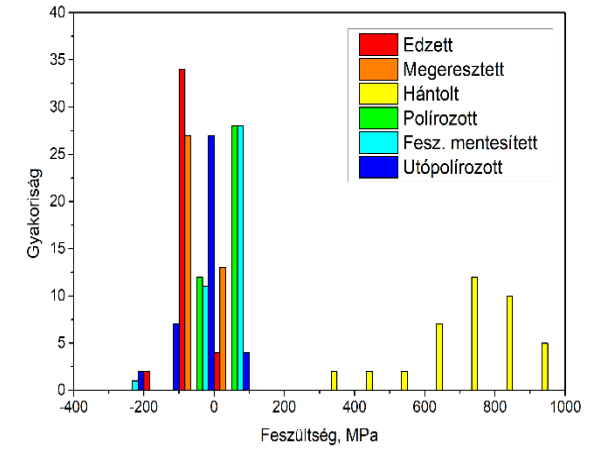
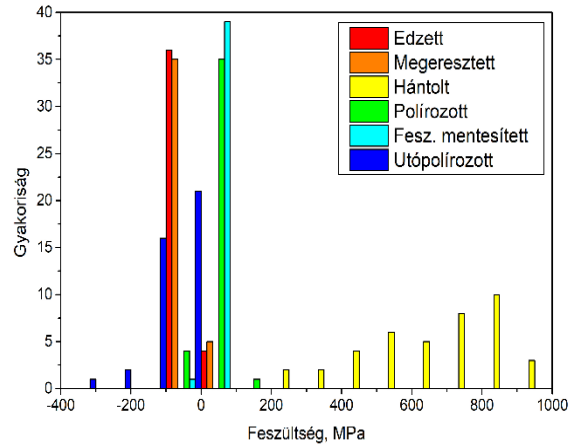
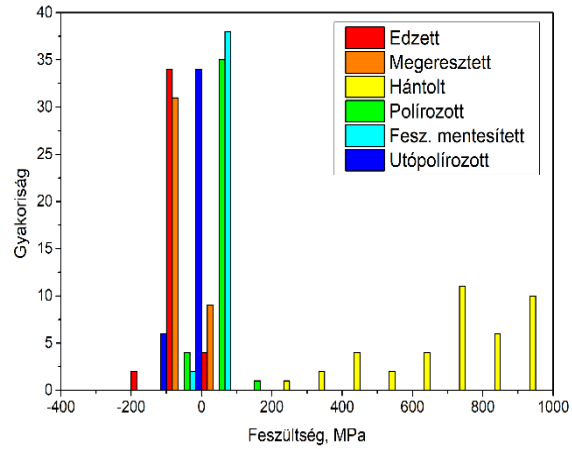
41. ábra A vízzel hűtött és az utópolírozott rudak félértékszélesség diagramjai

860 °C

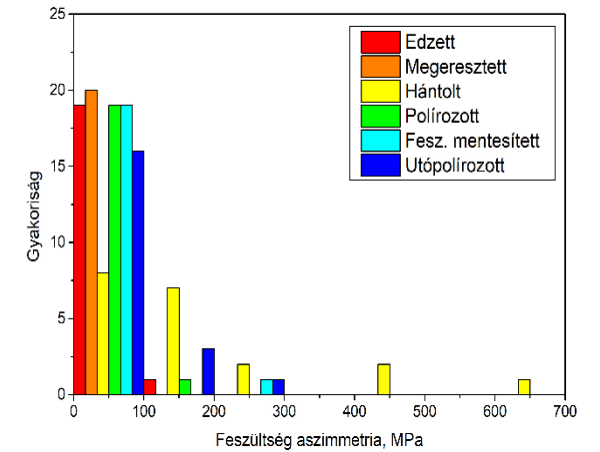
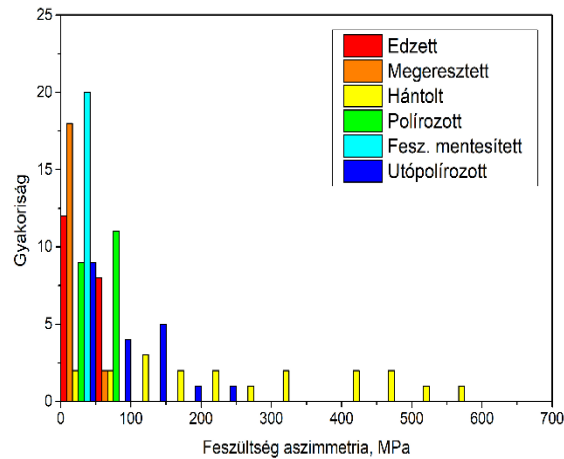
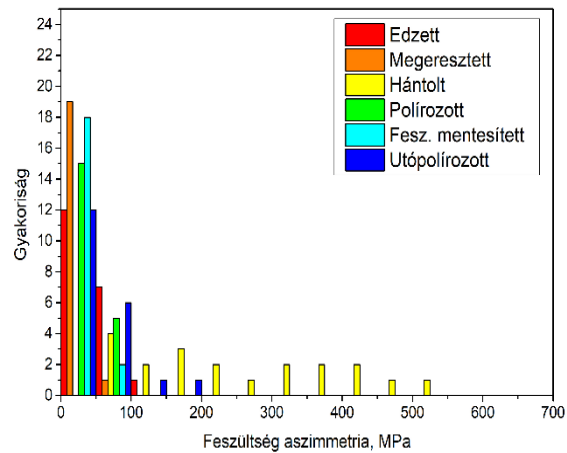
880 °C

900 °C

## A maradó feszültség statisztikai eloszlása



## A feszültség aszimmetria statisztikai eloszlása



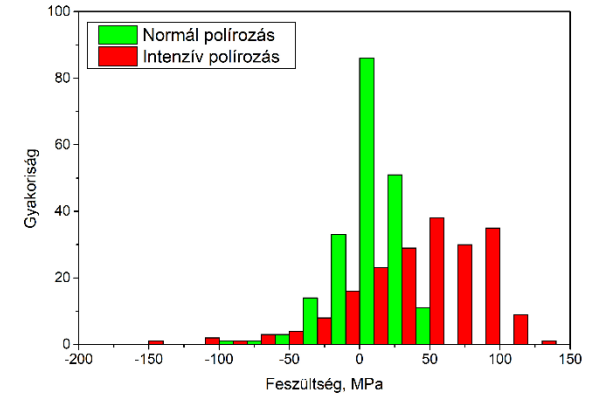
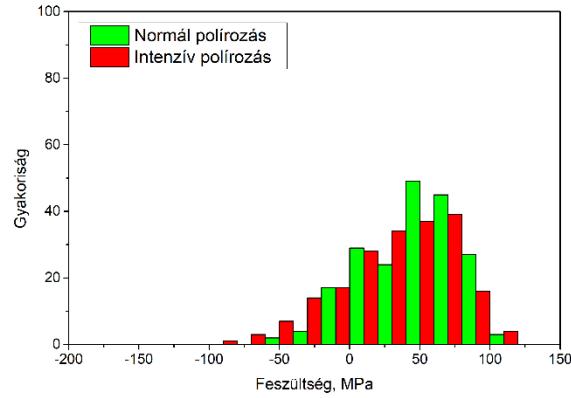
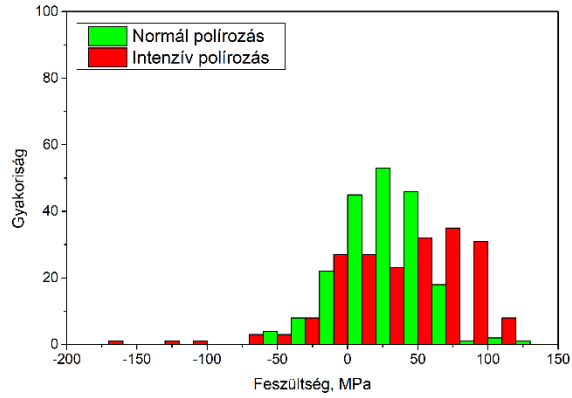
42. ábra A különböző gyártási folyamatok után mért maradó feszültség és feszültségaszimmetria statisztikai eloszlása

860 °C

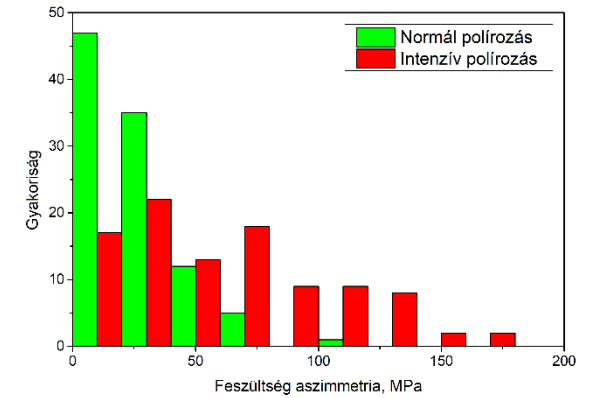
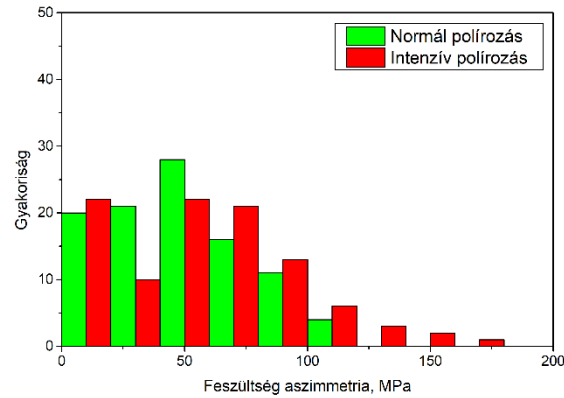
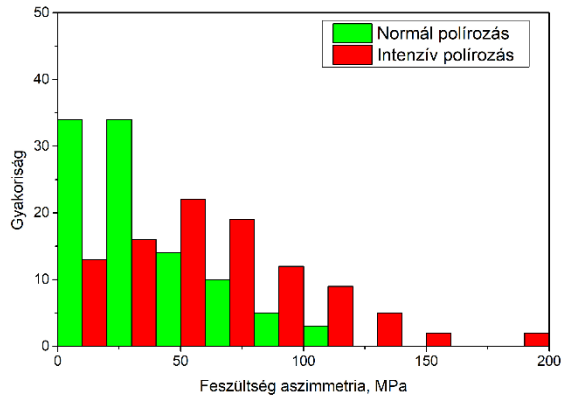
880 °C

900 °C

## A maradó feszültség statisztikai eloszlása



## A feszültség aszimmetria statisztikai eloszlása



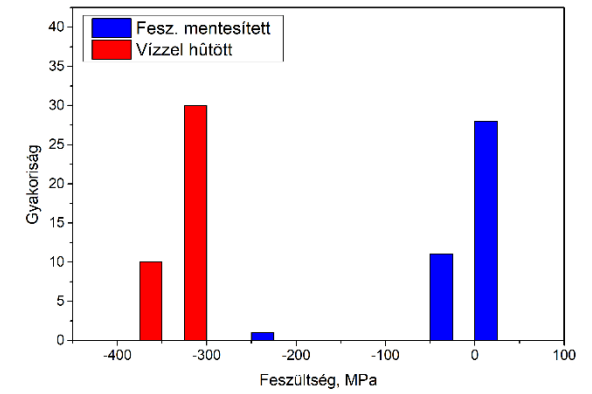
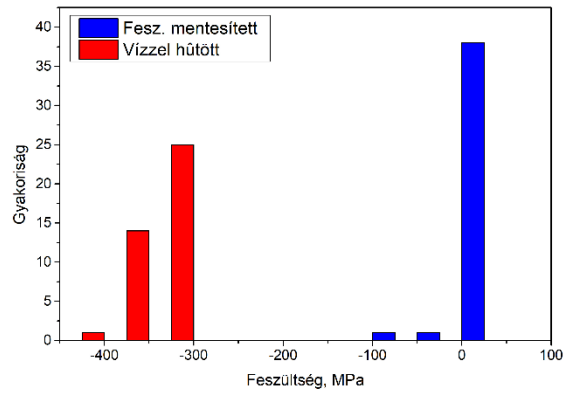
43. ábra A normál és intenzíven polírozott rudak esetében mért maradó feszültség és feszültség aszimmetria statisztikai eloszlása

860 °C

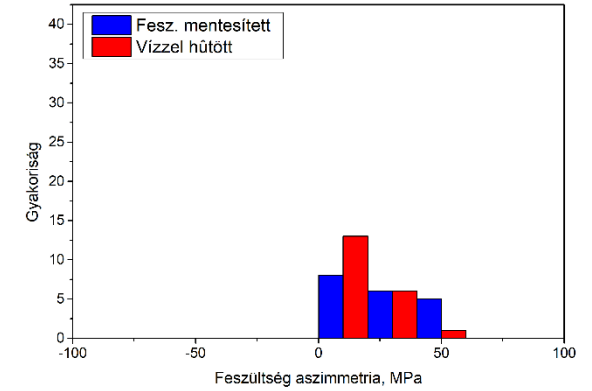
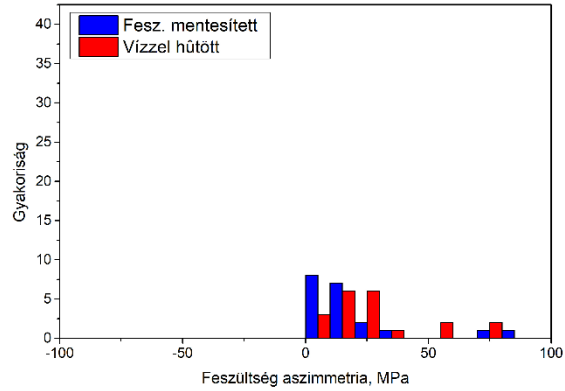
880 °C

900 °C

## A maradó feszültség statisztikai eloszlása



## A feszültség aszimmetria statisztikai eloszlása



44. ábra Feszültség mentesített és vízhűtött rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria statisztikai eloszlása

### 9.3. A maradó feszültség mérés során tapasztalt kiugró pontok ellenőrzése

A gyártási folyamat során a feszültségmentesített és utópolírozott rudak esetében is találtam kiugróan magas feszültség értékű mérési pontokat. A pontok közelében végzett részletes vizsgálatokkal céлом a kiugró feszültség értékek kiterjedésének feltárása volt. A vizsgálatot a következő rudakon végeztem el:

- (3E) feszültségmentesített rúd, A és B alkotók mentén a 2-es pont környezete,
- (1E) feszültségmentesített rúd, C alkotó 5-ös pont környezete,
- (3NP) utópolírozott rúd B és H alkotó mentén a 3-mas, 4-es pont környezete,
- (6NP) utópolírozott rúd C alkotójának 3-mas pont környezete,
- (1NP) utópolírozott rúd A, B alkotók 2-es és 3-mas mérési pont környezete.

Az eredményeket a 6. Melléklet, 7. Melléklet tartalmazza.

**Minden esetben bebizonyosodott, hogy nem mérési hibáról, hanem valóban lokálisan kiugró feszültség értékről van szó.**

### 9.4. Mélységi maradó feszültség eloszlás vizsgálatok

A marózás során az anyagmennyiség eltávolítása miatt a feszültség állapot megbomlik, ami a rúd elhajlását okozhatja. A feszültség gradiens a felületi adatok alapján a hossz tengely mentén a kiugró pontok kivételével nem jelentős. A radiális feszültség gradiens meghatározására mélységi feszültség vizsgálatokat végeztem. A mélységi feszültség vizsgálathoz választottam kicsi és nagy elhajlást mutató rudakat is.

A vizsgálati pontok kiválasztásánál szempont volt, hogy az elhajlás síkjában és ettől eltérő helyeken is legyen mérési pont, valamint a hossz tengely mentén a kimarózáshoz közel, és ettől távolodva is. Az egyes mérési pontokat a rudak kiterített felületi palástján ábrázoltam (45. ábra - 50. ábra). Az elhajlás síkját minden esetben pirossal jelöltem. A hántolt rudak mélységi feszültség mérési adatai alapján látható, hogy a felületen nagy húzófeszültségek ébredtek, melyek maximum 100  $\mu\text{m}$  mélységig vannak jelen (51. ábra – 53. ábra).

A hántolt (1VS-880°C) rúdnál, mely esetében a  $\Delta$  elhajlás értéke kicsi (0,185 mm), az elhajlás síkjában (C-G), a kimarózás helyéhez közeli mérési pontban (3-255mm) a felületi húzófeszültség alatt gyakorlatilag feszültségmentes állapot van (51. ábra). A kimarózás helyétől távolodva a 340 – 425 mm-nél lévő pontokban a felületi húzófeszültséget kicsi nyomófeszültség váltja, amelyik körülbelül 1 mm-es mélységben csökken vissza 0 –ra. A nyomófeszültség maximuma 100 MPa értékű. Ebben az esetben a szemközi alkotókon (C-G) mért görbe lefutás nagyon hasonló. Az A-E alkotókon a nyomófeszültség maximum értéke nagyobb (200MPa), és nagyobb mélységben kb. 1.5 mm lesz nulla közeli állapot, valamint a szemközi alkotók közti különbség is nagyobb.

A nagyobb kihajlást mutató másik két hántolt rúd esetében a mérési pontokat a kihajlás síkjához közelebb sűrítve vettem fel. A nagyobb  $\Delta$  elhajlást (0,8 mm) mutató (3VS-900°C) hántolt rúd esetén a marózás közvetlen környezetében (170 mm-nél) a felületi nagy húzófeszültséget nulla közeli állapot váltja közvetlenül a felszín alatt. A marástól távolabbi pontok esetében nagy



nyomófeszültség volt mérhető, a maximális nyomófeszültség értéke ezeknél a rudaknál nagyobb (-200 ... -300 MPa) és annak 0 értékre való változására szintén kb. 1 mm mélységnél következik be (53. ábra). A szemközti alkotók feszültség eloszlása között nagy, esetenként 200 MPa eltérés is van. A még nagyobb  $\Delta$  elhajlást (1,03 mm) mutató (2VS-860°C) hántolt rúd esetén (52. ábra) a marózás közvetlen környezetében (127,5 mm-nél) a felületi nagy húzófeszültséget szintén nulla közeli állapot váltja közvetlenül a felszín alatt. A marástól távolabbi pontok esetében nagy nyomófeszültséget, húzófeszültséget és nulla közeli állapotot is találtam. A szemközti pontok eloszlása is nagyon változatos. Ezen mérési adatokból egyértelműen látszik a marózás környezetében a feszültség relaxációja, viszont meglepő, hogy csak a felszín alatti értékekben.

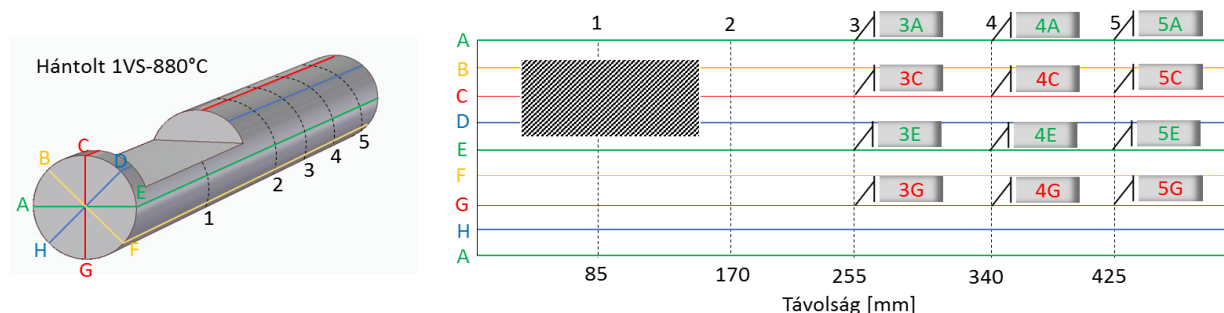
A további rudakon a marózás hatását kiküszöbölendő a 4-es pontokban végeztem méréseket az elhajlás síkjában lévő alkotókon és arra merőlegesen.

A legkisebb  $\Delta$  elhajlást (0,125 mm) mutató polírozott (PG1-860°C) rúdnál az elhajlás síkjában nincs aszimmetria, a két alkotón mért feszültség lefutása nagyon hasonló (54. ábra). A nyomófeszültség maximuma a -100 MPa-t nem haladja meg. Annak leépülése 300  $\mu$ m belül megtörténik, de csak nagyon gyenge húzófeszültség volt mérhető, tehát sem nagy aszimmetria, sem nagy gradiens nincs jelen.

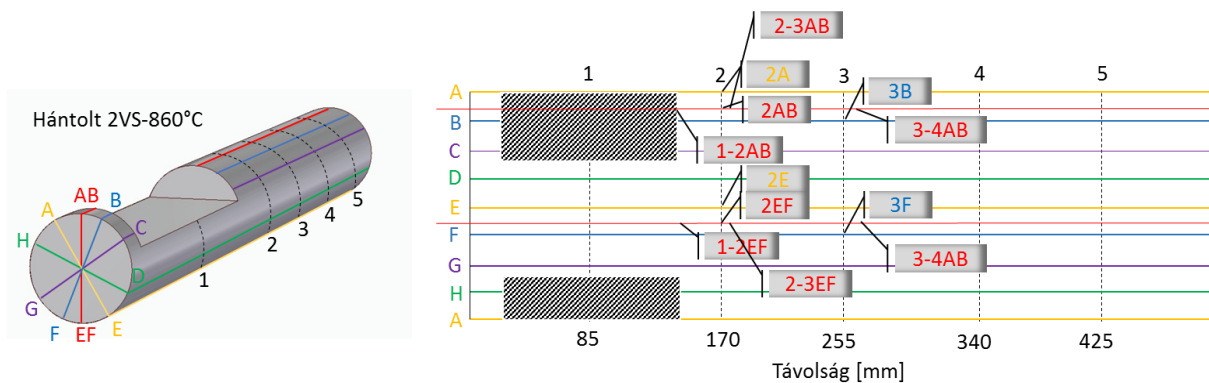
A nagyobb  $\Delta$  elhajlást (0,880 mm) mutató intenzíven polírozott (PNG2-860°C) mintánál, az elhajlás síkjában a szemközti alkotók különbsége nagy (akár 150 MPa is lehet) és előjel váltás is van (55. ábra). Az „A” alkotón csak húzófeszültség van. A nyomófeszültség leépülése 300  $\mu$ m távolságon belül megtörténik, majd meredeken húzófeszültséggé vált át. Ebben a mintában a nagy elhajlást a nagy feszültség gradiens és az aszimmetria egyszerre okozza. Figyelemre méltó, hogy a felületi mért érték közel feszültségmentes állapotot mutat.

A legnagyobb  $\Delta$  elhajlást mutató (2,82 mm) vízzel hűtött (1S-900°C) rúd esetén mind az elhajlásnak, mind az ezzel merőleges síkban ébredő nagy nyomófeszültségnek, 400 MPa-t meghaladó maximuma van, melynek 0-ra való leépülése kb. 2 mm mélységben várható (becslés) (56. ábra). Ebben a mintában nagy a feszültség gradiens értéke is. A szemközti alkotón lévő görbék lefutása nagyon hasonló, vagyis aszimmetria nem volt mérhető.

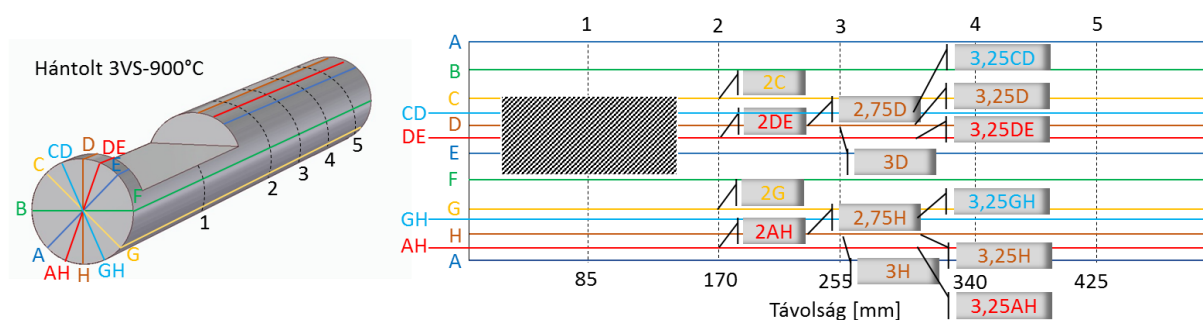
**Összességében megállapítható, hogy a kimarózást követő nagy deformáció ( $\Delta$  elhajlás) akkor alakul ki, ha a rúdban nagy a mélységi feszültség aszimmetria (szemközti alkotók mélységi feszültség lefutása eltérő) vagy nagy a mélységi feszültség gradiens.**



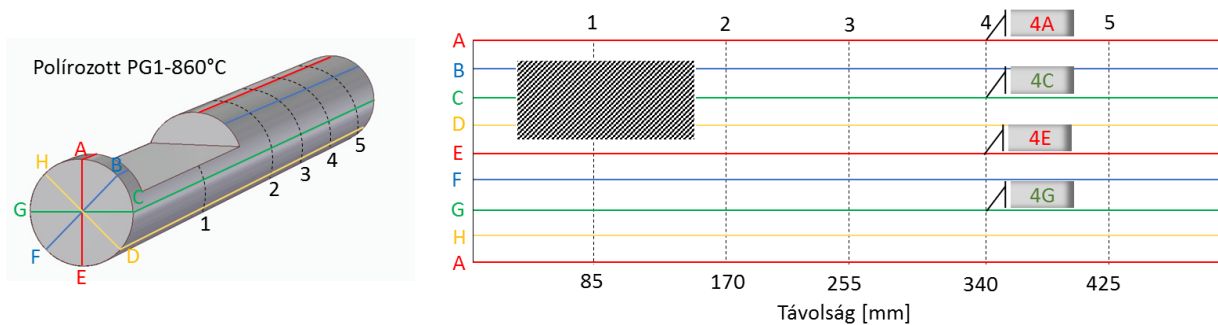
45. ábra A hántolt (1VS – 880°C) rúdon felvett alkotók és a kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (C-G) piros vonal jelzi



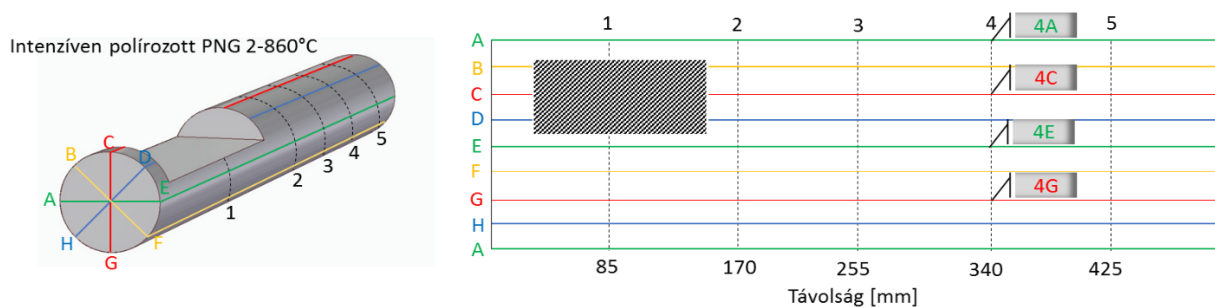
46. ábra A hántolt (2VS – 860°C) rúdon felvett alkotók és a kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (AB-EF) a piros vonal jelzi



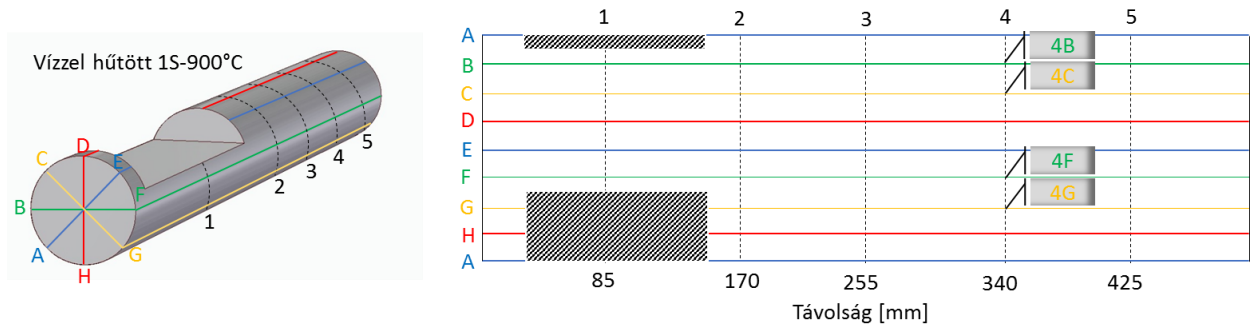
47. ábra A hántolt (3VS – 900°C) rúdon felvett alkotók és a kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (HA-DE) a piros vonal jelzi



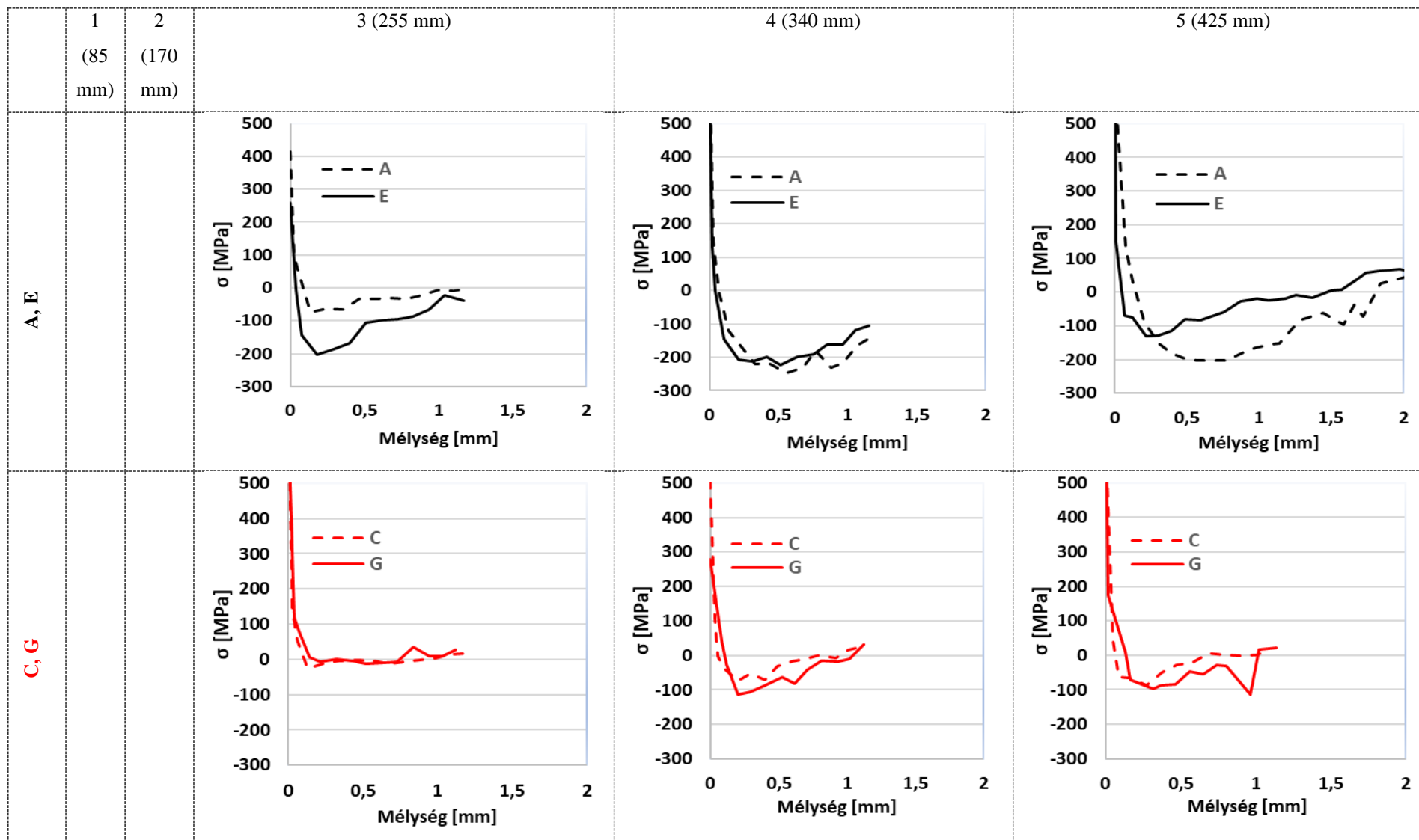
48. ábra A polírozott (PG1 – 860°C) rúdon felvett alkotók és kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (A-E) a piros vonal jelzi



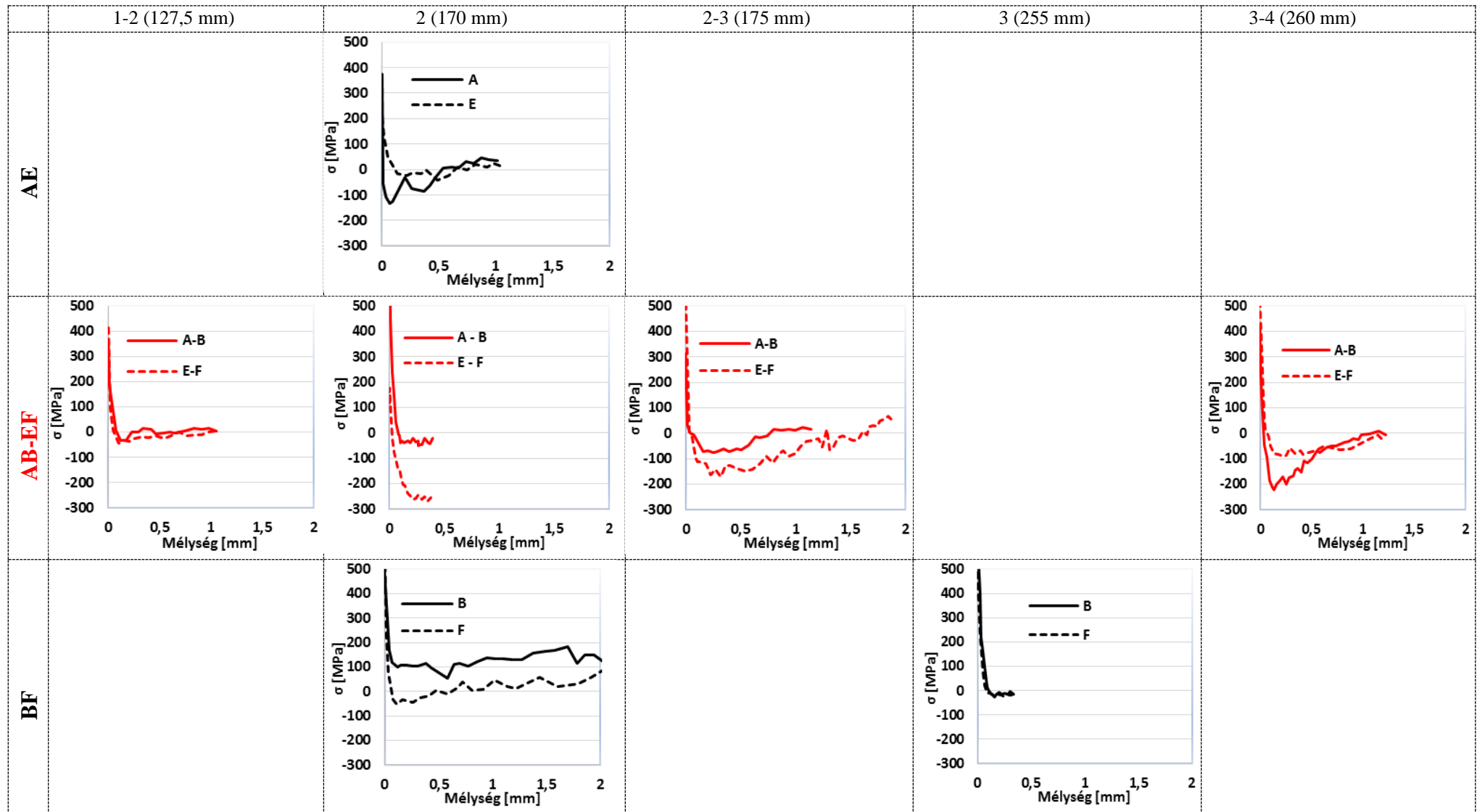
49. ábra Az intenzíven polírozott (PNG2 – 860°C) rúdon felvett alkotók és kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (C-G) a piros vonal jelzi



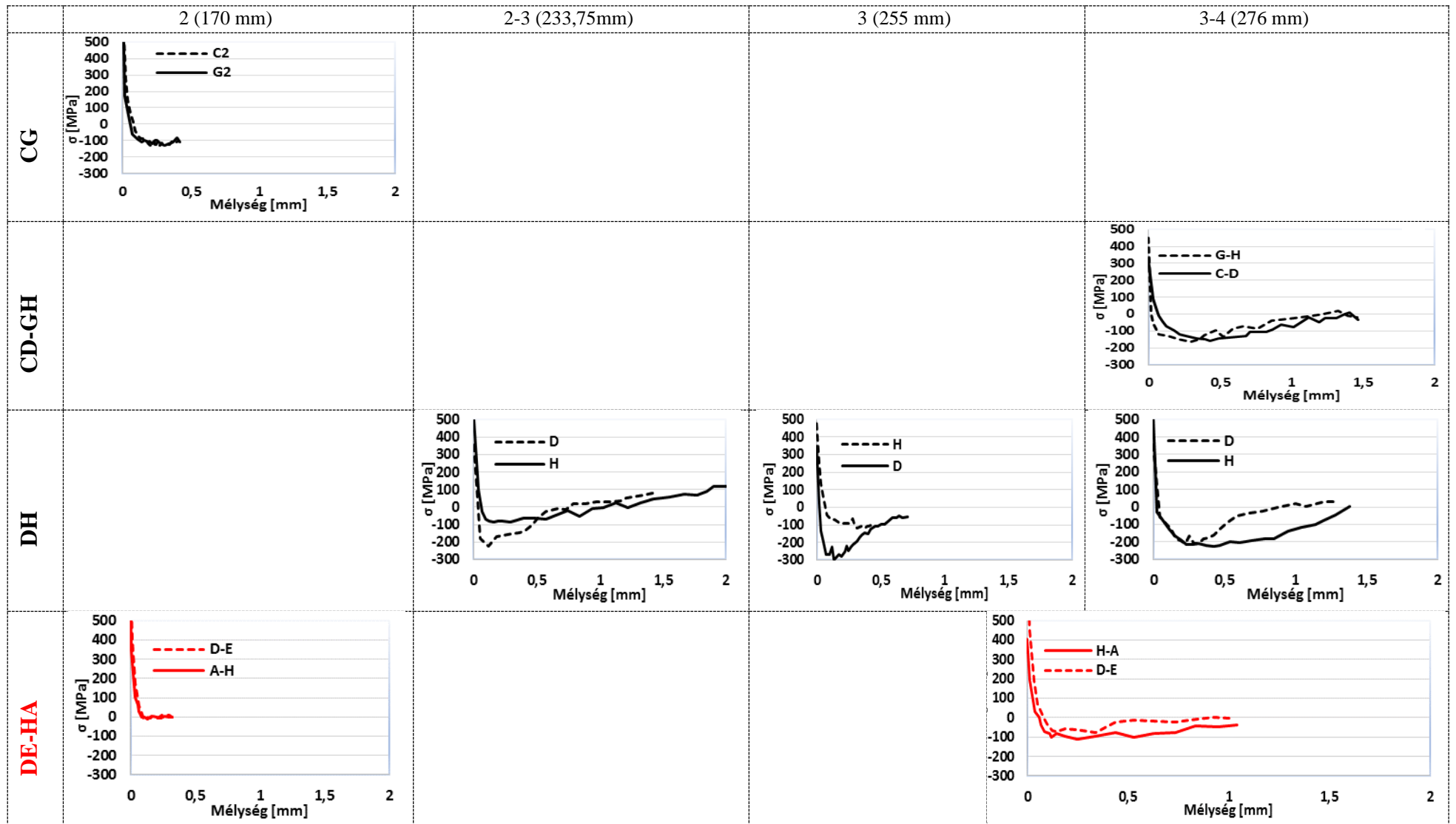
**50. ábra A vízzel hűtött (1S – 900°C) rúdon felvett alkotók és a kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (H-D) a piros vonal jelzi**



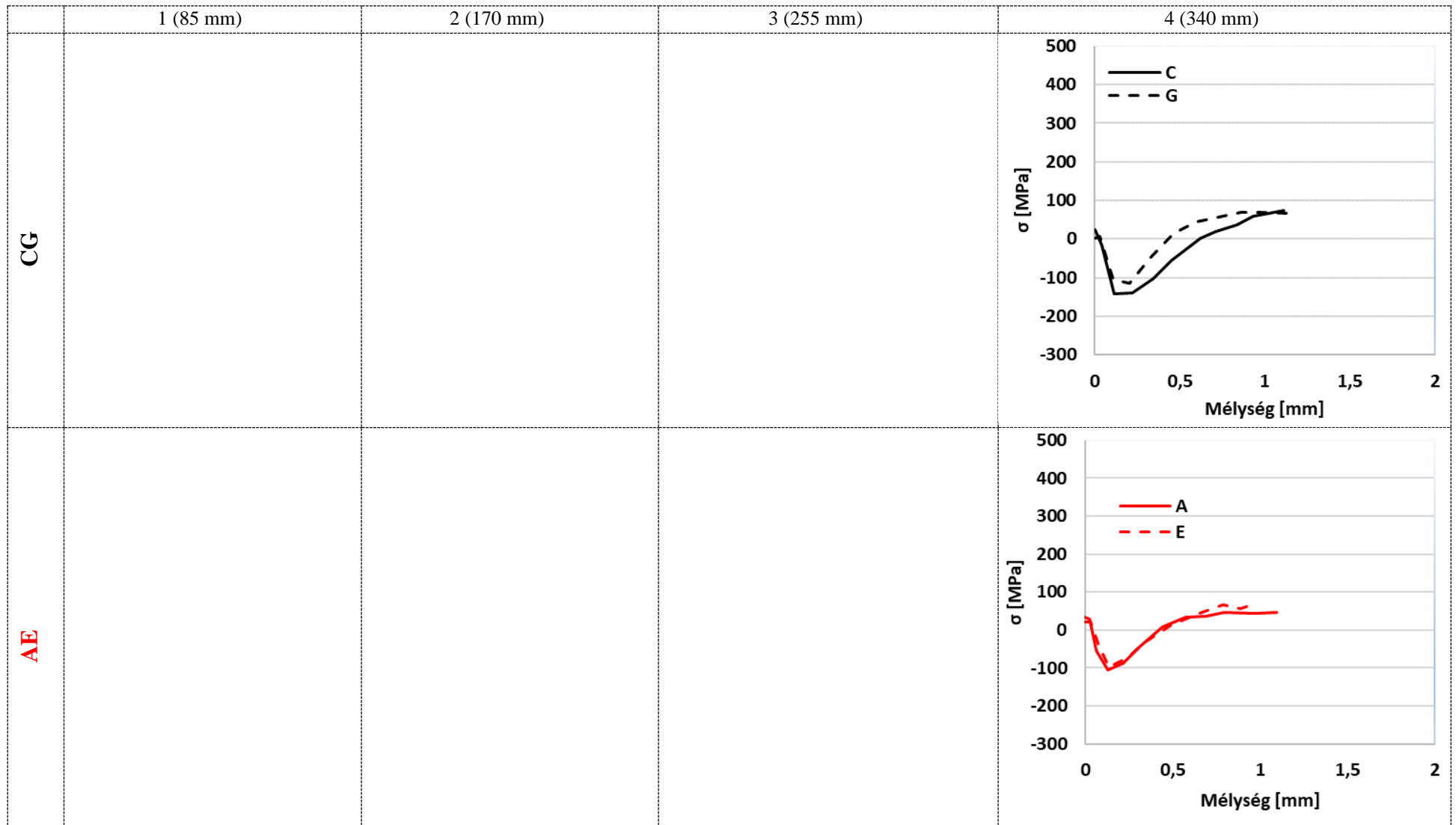
51. ábra A hántolt (IVS) rúd elhajlás síkjában (piros), valamint a rá merőleges síkban (fekete) különböző hosszirány menti, szemben lévő pontokban mért mélységi feszültség eloszlása



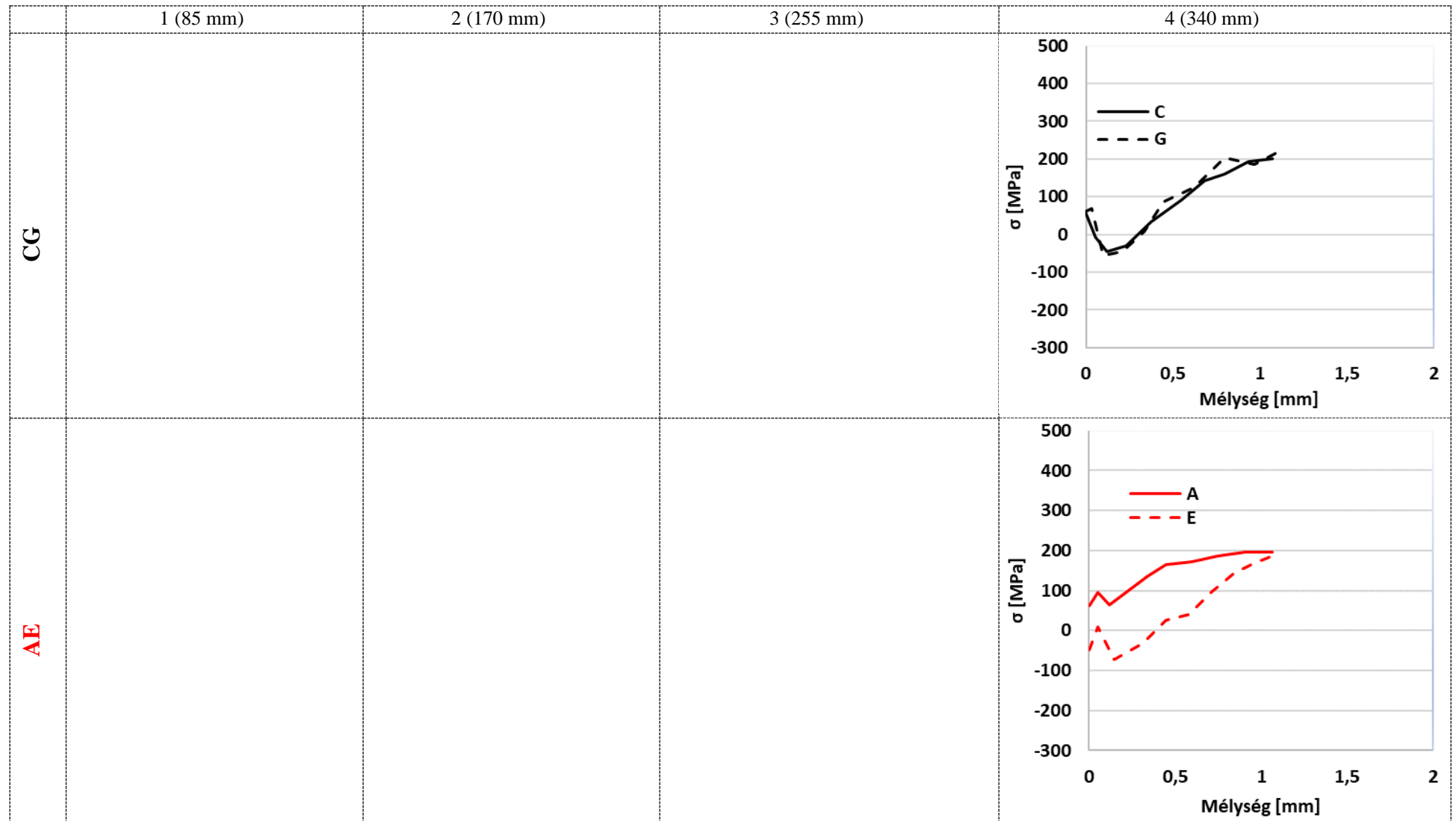
52. ábra A hántolt (2VS) rúd elhajlás síkjában (piros), valamint a mellette lévő síkokban (fekete) különböző hosszirány menti, szemben lévő pontokban mért mélységi feszültség eloszlása



53. ábra A hántolt (3VS) rúd elhajlás síkjában (piros), valamint a mellette lévő síkokban (fekete) különböző hosszirány menti, szemben lévő pontokban mért mélységi feszültség eloszlása

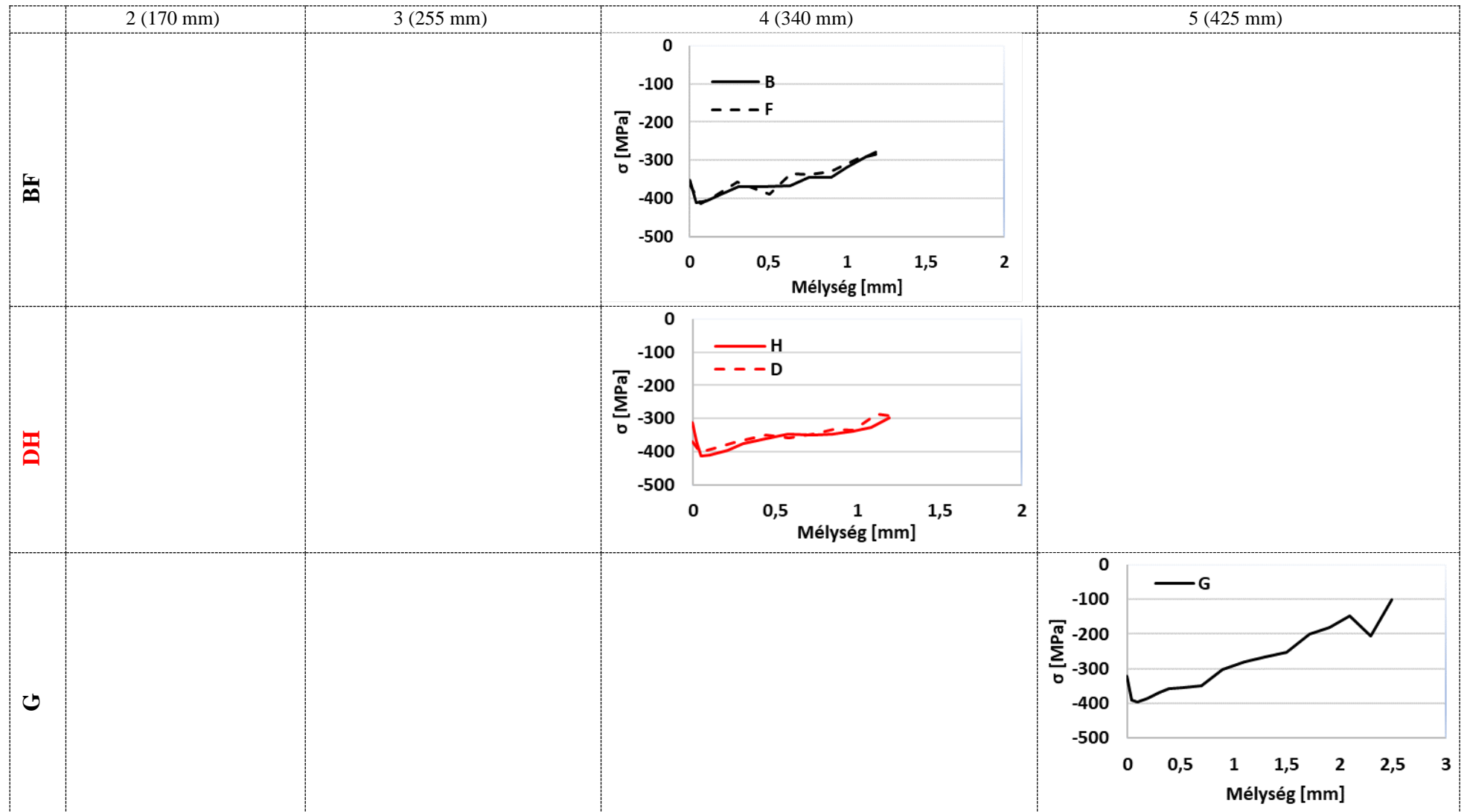


54. ábra A polírozott (PG1) rúd az elhajlás (A-E) síkjában, valamint a rá merőleges (C-G) síkban a hosszirány menti 4. mérési pontban (340 mm) mért mélységi feszültség eloszlás diagramok



55. ábra Az intenzíven polírozott (PNG2) rúd az elhajlás (A-E) síkjában, valamint a rá merőleges (C-G) síkban a hosszirány menti 4. mérési pontban (340 mm) mért mélységi feszültség eloszlás diagramok





56. ábra A vízzel hűtött (1S) rúd az elhajlás (D-H) síkjában, valamint a rá merőleges (B-F) síkban és a G alkotón a hosszirány menti 4. (340 mm) és 5. (425 mm) mérési pontban mért mélységi feszültség eloszlás diagramok

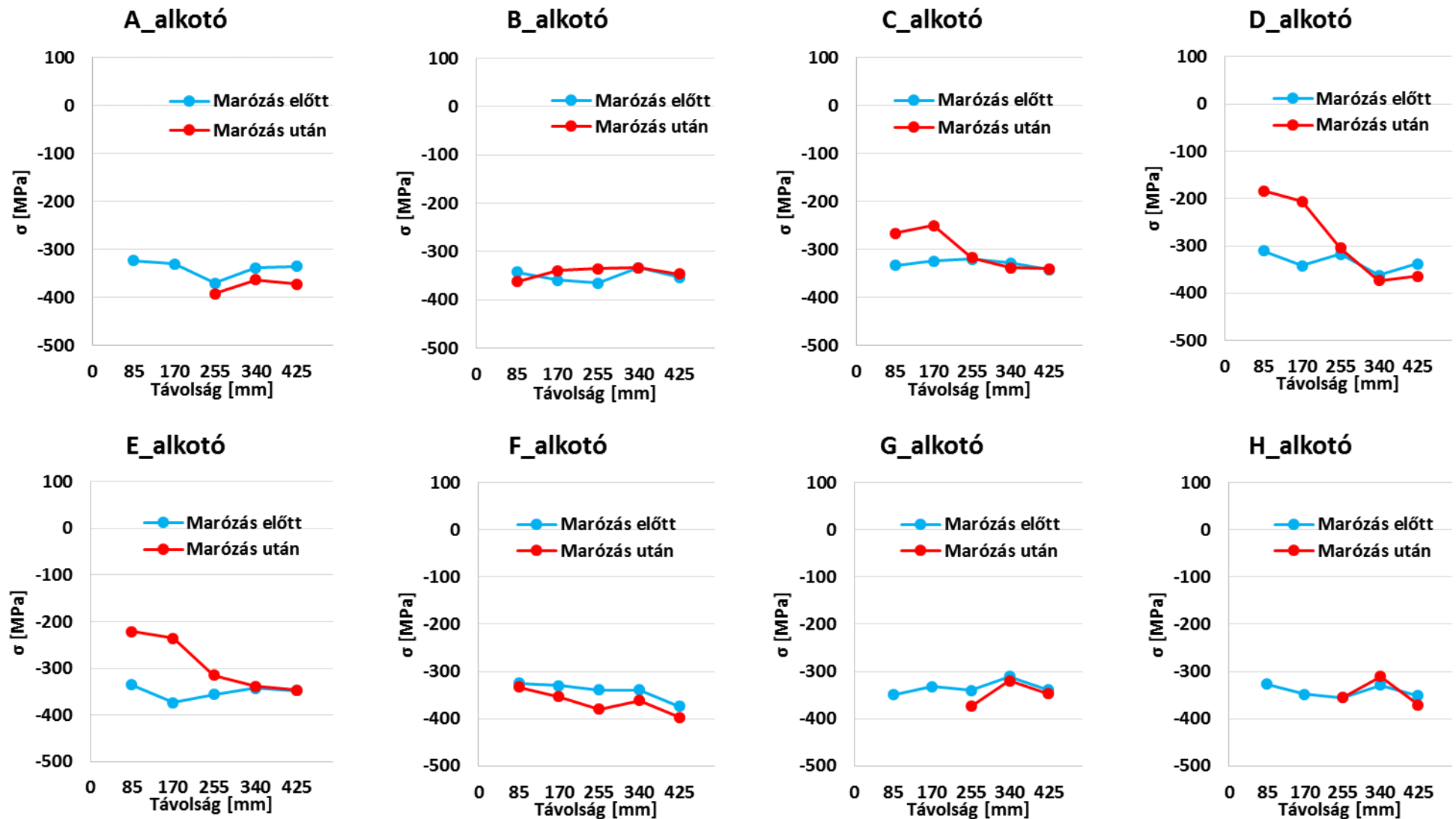
## 9.5. Kimarózás hatásának tisztázása

Az előző fejezetben látható volt, hogy a kimarózás közvetlen környezetében a felület alatti feszültségek nulla közeli állapotban voltak. Felmerül a kérdés, hogy ez a feszültség relaxáció a marózás hatásaként kezelhető-e? Ezenkívül az is egy érdekes kérdés, hogy a marás hatására bekövetkező deformáció a rúd eredeti feszültség állapotában okoz-e eltérést a vizsgálati szakaszon. Ezért egy edzett (Q2-860°C) és két vízzel hűtött (1S-900°C, 4-860°C) rúd esetében elvégeztem a felületi maradó feszültség vizsgálatot kimarás előtt és után is, mind a 8 alkotó mind az 5 pontjában (57. ábra – 59. ábra). Az 1S rúdnál a kimarás melletti alkotókon nincs változás annak ellenére, hogy jelentős feszültség van jelen. A kimarással szemben lévő alkotó közelében a felületen mért feszültségek megváltoznak, a nyomófeszültségek lecsökkennek. Ez a hatás a kimarás helyével azonos kerületi vonal mentére eső pontok mindegyikénél (85 – 170 mm-es pontok, CDE alkotók) jelentkezik. Mivel ezeknél a rudaknál az elhajlás a kimarás helyével ellentétes oldal fele történt ez az eredmény első pillanatban meglepő lehet. Azonban ha belegondolunk az elhajlás következtében húzófeszültség épül fel a marással ellentétes oldalon, ami jelen esetben az eredendően nyomófeszültség csökkenését jelenti. Ez a korábbi laboratóriumi megfigyeléseinket igazolja, miszerint az elhajlás nem feltétlen feszültség leépülésével jár együtt. A kimarásnak a hossz tengely mentén a marás helyétől távolodva már nincs kimutatható hatása.

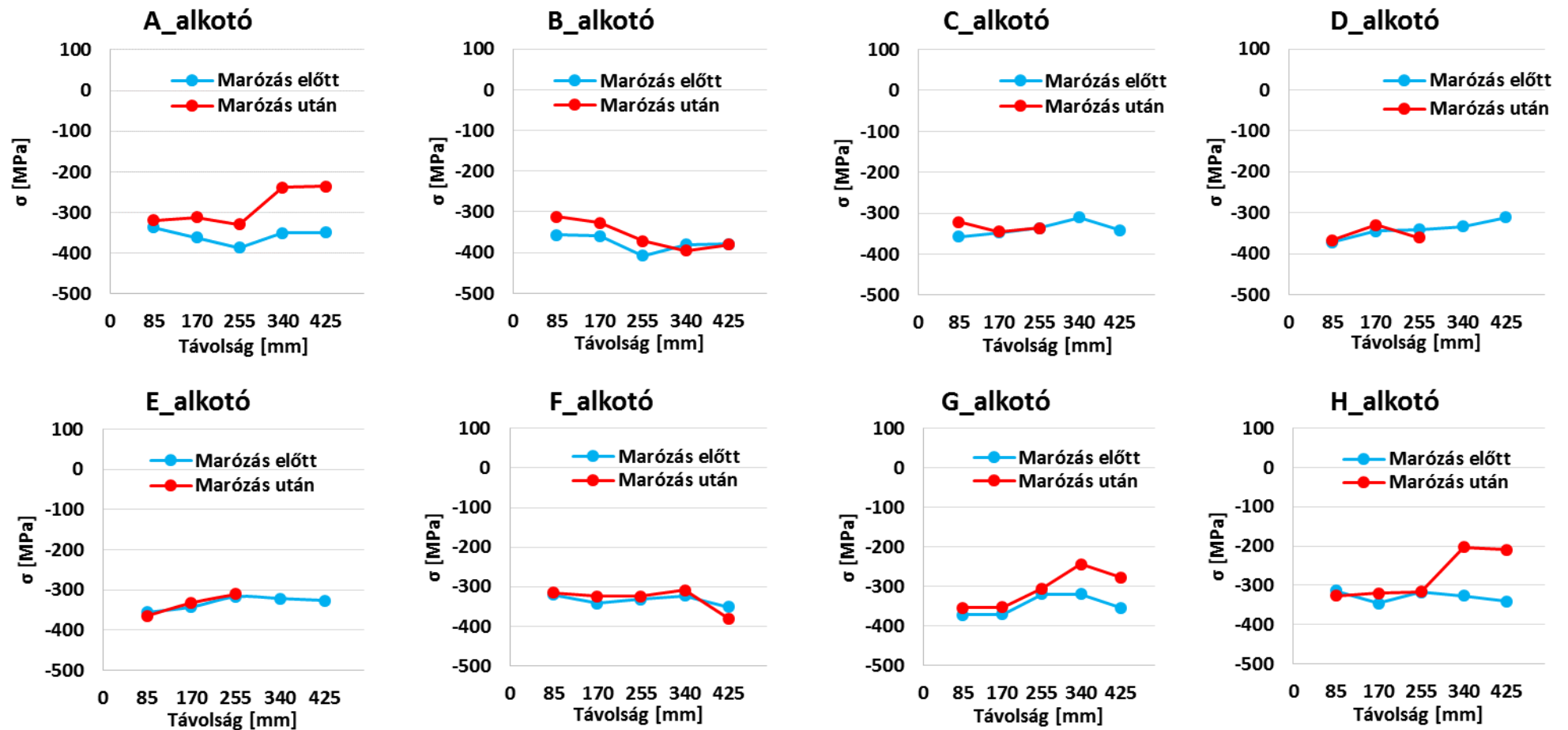
Az ezzel párhuzamos (4) minta esetében ugyanezt a jelenséget tapasztaljuk. Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer jobb szélén történt (58. ábra). A kimarással ellentétes alkotókon csökken a nyomófeszültség értéke az anyageltávolítás következtében.

A (2Q) minta esetében a kiinduló feszültség értékek kisebbek voltak. A kimarás síkjához közeli pl. „A, F” alkotók nem mutatnak változást, az ellentétes térfélen lévő alkotók változása is elhanyagolható, és ez összhangban van a marózás hatására bekövetkező kisebb elhajlás értékekkel (59. ábra).

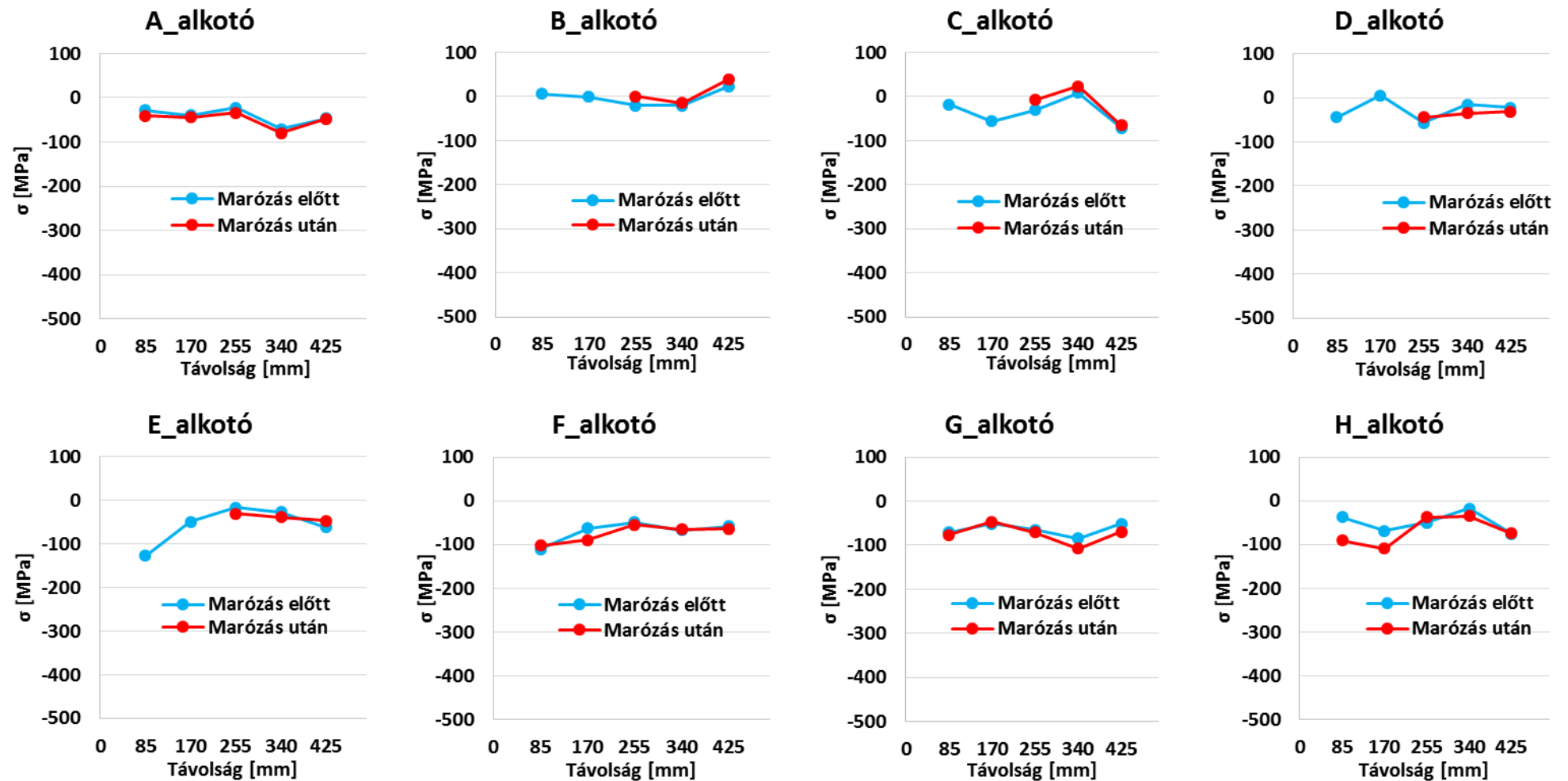
**A vizsgálat fontos eredménye, hogy a marózással végzett anyageltávolítás a nagy feszültséget vagy nagy feszültség gradienst és aszimmetriát tartalmazó rudak esetében okoz nagy deformációt, és a deformáció bekövetkezése nem feltétlen feszültség relaxációjával jár együtt.**



57. ábra A vízzel hűtött (1S) rúd maradó feszültség értékei a nyolc alkotó mentén marás előtt és marás után (Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer bal szélén történt)



58. ábra A vízzel hűtött (4) rúd maradó feszültség értékei a nyolc alkotó mentén marás előtt és marás után (Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer jobb szélén történt)

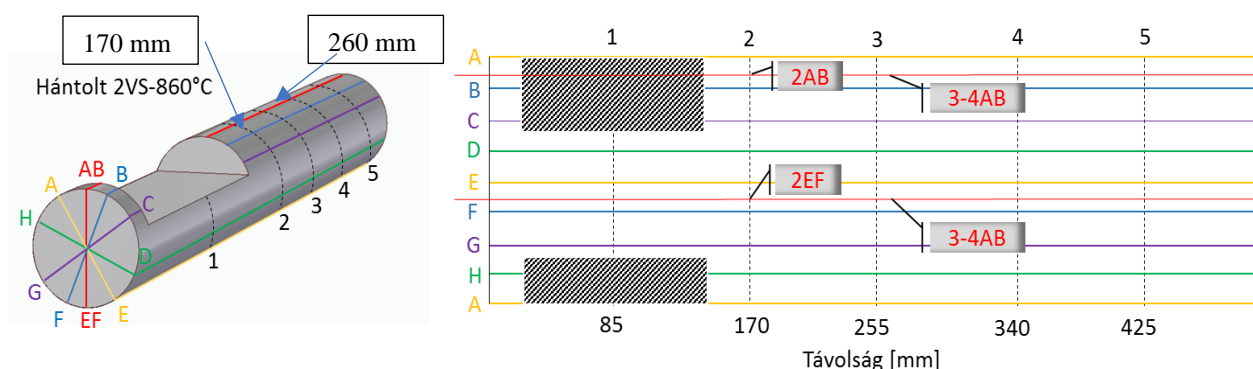


59. ábra Az edzett (2Q) rúd maradó feszültség értékei a nyolc alkotó mentén marás előtt és marás után (Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer bal szélén történt)

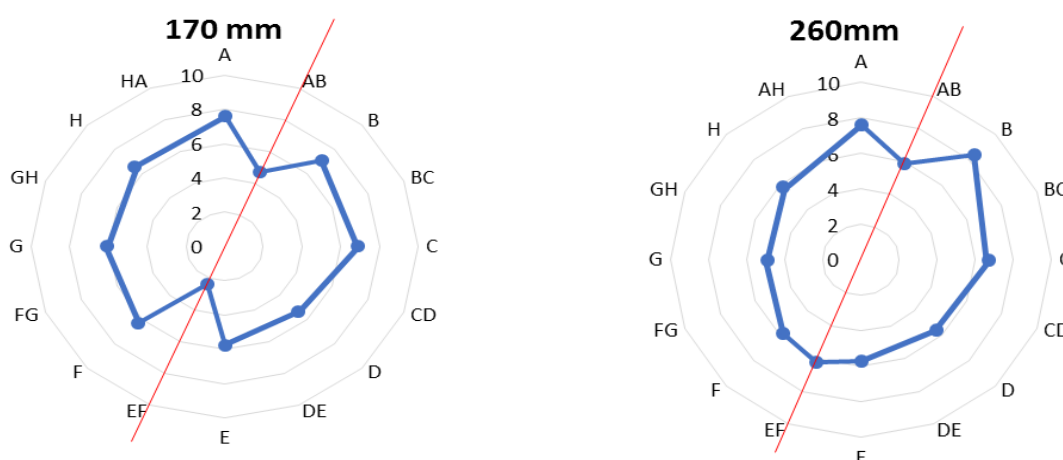
## 9.6. Maradék ausztenit vizsgálat eredménye

A következő vizsgálatok arra irányultak, hogy mi a feszültség gradiens illetve feszültség aszimmetria kialakulásának az oka. Erre vonatkozóan alapvetően kétféle ok lehet, a nem egyenletes vagy túlságosan nagy termikus gradiens, illetve ennek következményeként a nem egyenletes fázisátalakulás. Az utóbbi ellenőrzésére az edzést követő maradék ausztenit tartalom illetve a keménységvizsgálat adhat információt. A két nagy elhajlást mutató hántolt mintánál keresztmetszeti csiszolatot készítettem 2-2 helyen. A maradék ausztenit eredményeket rózsadiagramon mutatom be. A rudakon az alkotók mellett az elhajlás síkját is feltüntettem, melyet pirossal jelöltem (60. ábra). A maradék ausztenit mennyisége a felület menti sávban jellemzően 5 és 8 % között változik a (2VS) rúd esetében (61. ábra). Kiugró kisebb értékű pontok az elhajlás síkjában voltak mérhetőek (AB-EF) mindkét metszeten. A (3VS) rúd esetében a 255 mm-es metszetenél szintén a kevés ausztenit tartalmazó részre esik az elhajlás síkja (62. ábra; 63. ábra). A 276 mm-nél nem történt ausztenit mérés az elhajlás síkjában.

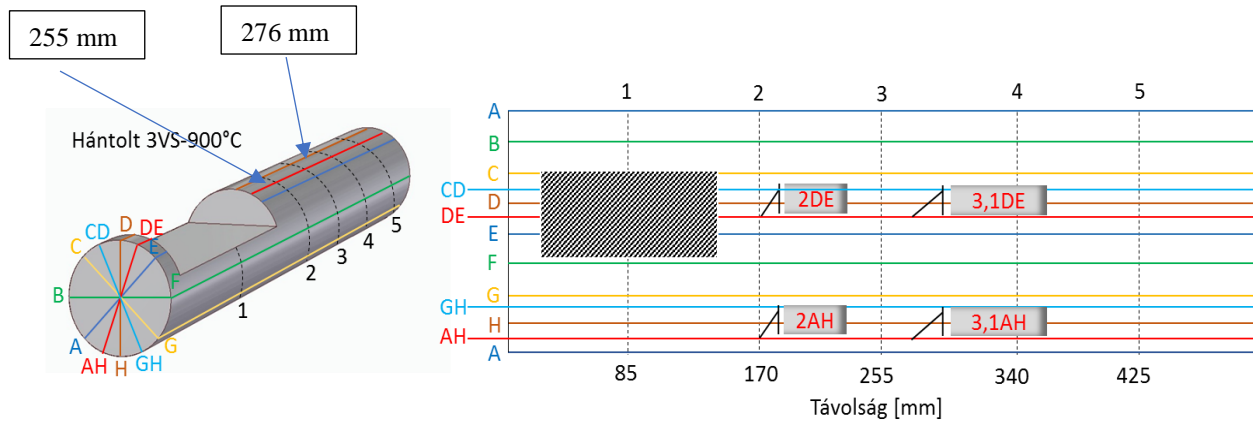
**A vizsgálat eredményei alapján azt a megállapítást tehetem, hogy a maradék ausztenit tartalom az elhajlás síkjában néhány %-kal kevesebb. Meg kell azonban jegyezni, hogy ez az eltérés a mérési hibahatár közelében van.**



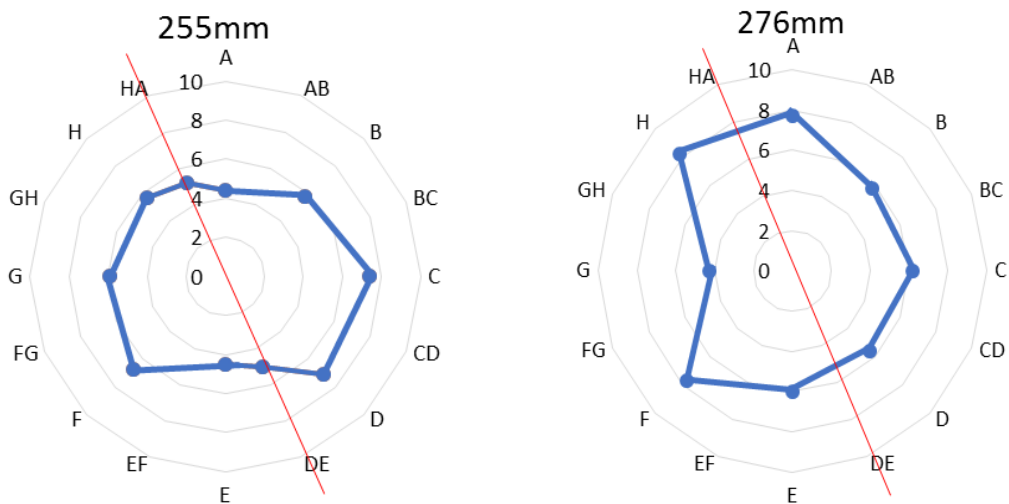
60. ábra A hántolt (2VS) rúdon felvett alkotók és mérési pontok. Az elhajlás síkját (AB-EF) a piros vonal jelzi



61. ábra A hántolt (2VS) rúd különböző metszetein, a nyolc alkotón mért maradék ausztenit mennyisége. Az elhajlás síkját piros vonal jelzi



62. ábra A hántolt (3VS) rúdon felvett alkotók és mérési pontok. Az elhajlás síkját (HA-DE) a piros vonal jelzi



63. ábra A hántolt (3VS) rúd különböző metszetein, a nyolc alkotón mért maradék ausztenit mennyisége. Az elhajlás síkját piros vonal jelzi

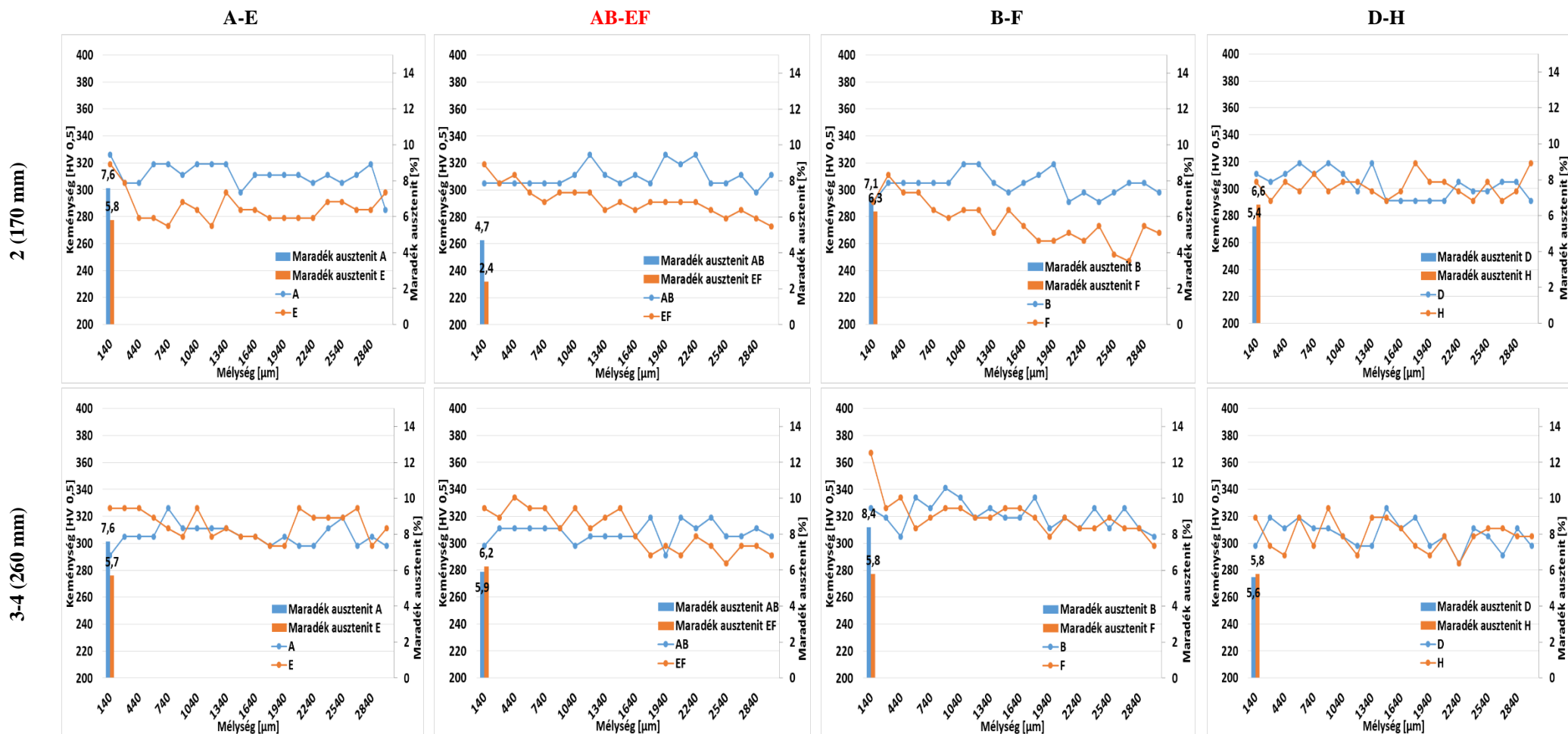
## 9.7. Keménységtraverz vizsgálat eredménye

A maradék ausztenit mérésekhez felhasznált metszeteken sugárirányú mikro keménység méréseket is végeztem. A keménység lefutási görbéken, a metszeteken mért maradék ausztenit mennyiségét alkotónként feltüntettem, kivétel a 3VS rúd 276 mm-es szeletének, AH – DE alkotója esetében, ugyanis itt nem végeztem maradék ausztenit mérést. A (2VS) rúd 170 mm-es metszetnél sugárirányú lefutásokban lehet különbségeket látni (64. ábra). A sugár szerinti átlagos keménységek a 270 – 310 HV 0,5 közé esnek, a kisebb átlagos keménységek az (EF sík) „E” alkotókhoz kifutó sugár mentén voltak mérhetőek. Meglepő, hogy itt a maradék ausztenit tartalom jellemzően kisebb, mint a velük szemközti, nagyobb átlagkeménységű alkotókon. A 260 mm-es metszeten a sugár menti keménység értékek közelebb vannak egymáshoz. Átlagosan 306 – 320

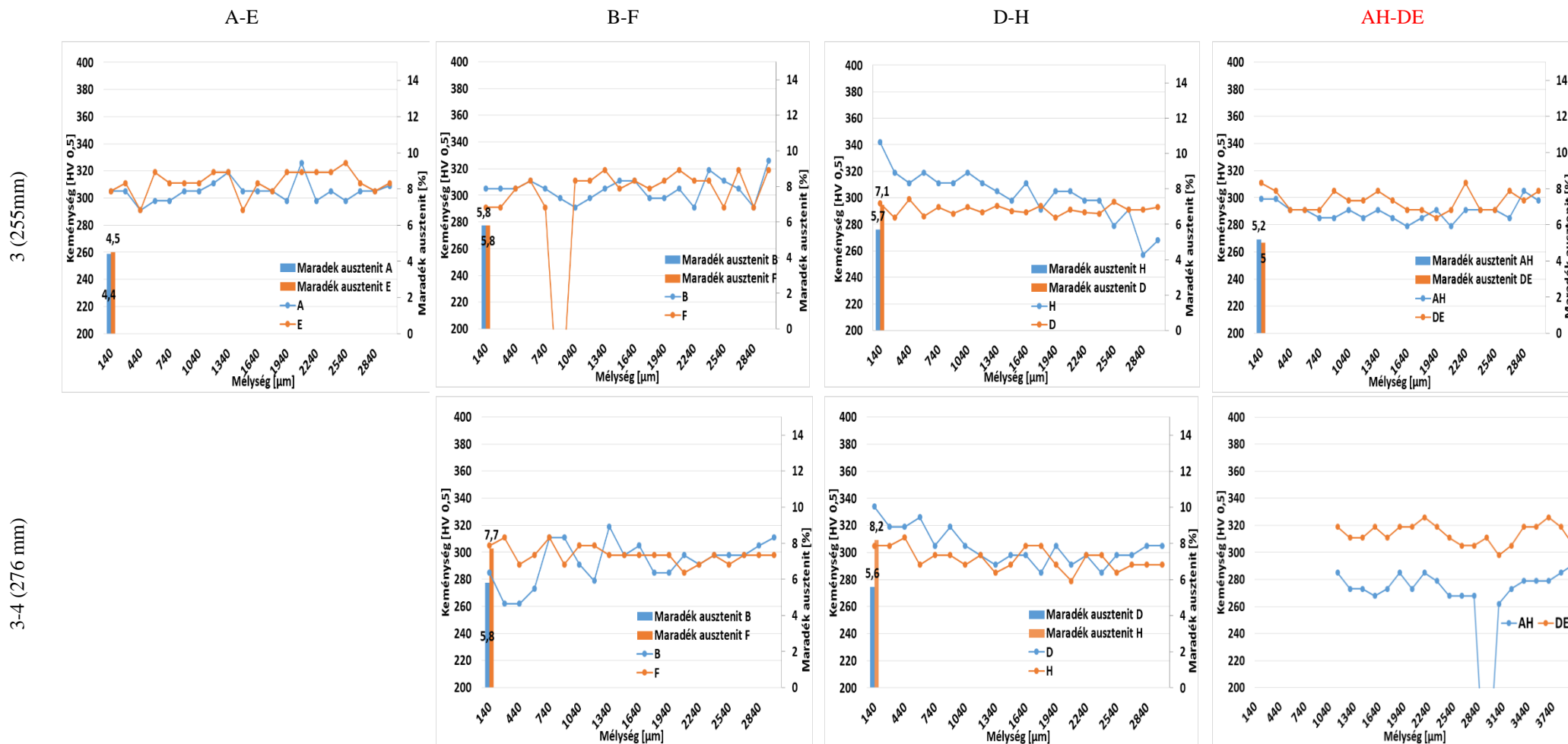
HV0,5 közé esnek, valamint a maradék ausztenit tartalom is egyenletesebb. A (3VS) 255 mm-es metszet esetében egyenletes és hasonló a keménység lefutása. A 276 mm-es metszetenél az „AH” alkotóra kifutó sugár mentén kiugróan alacsony a keménység értéke. A „B” alkotónál lévő szélén szintén kisebb keménység adatokat mértem (65. ábra). A keménység adatok és a maradék ausztenit mennyisége nem korreál konzekvensen.

**Ez alapján kijelenthetjük, hogy a maradék ausztenit változása nem magyarázza a keménység változásokat és a feszültség aszimmetriát. A keménység ilyen különbözősége miatt további szöveti vizsgálatokat végeztem.**





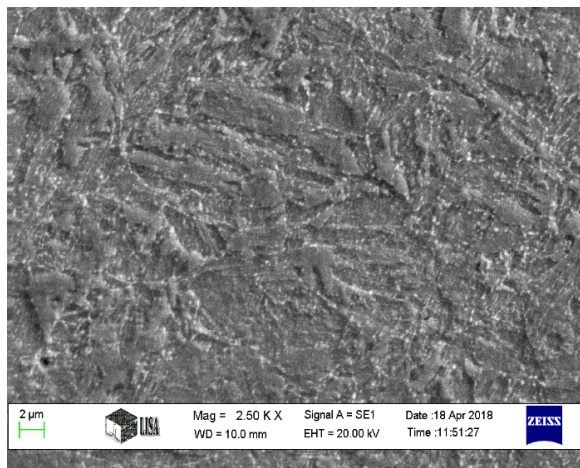
64. ábra A hántolt (2VS) rúdból kivágott metszeteken (170mm, 260 mm) a különböző alkotók síkjában mért mikro keménység és maradék ausztenit értékek. Az elhajlás síkja AB-EF



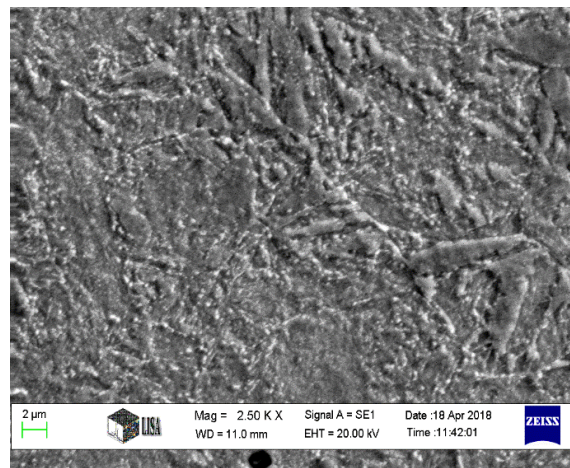
65. ábra A hántolt (3VS) rúdból kivágott metszeteken (255 mm, 276 mm) a különböző alkotók síkjában mért mikro keménység és maradék ausztenit értékek. Az elhajlás síkja AH-DE

## 9.8. Szövetvizsgálat eredmények

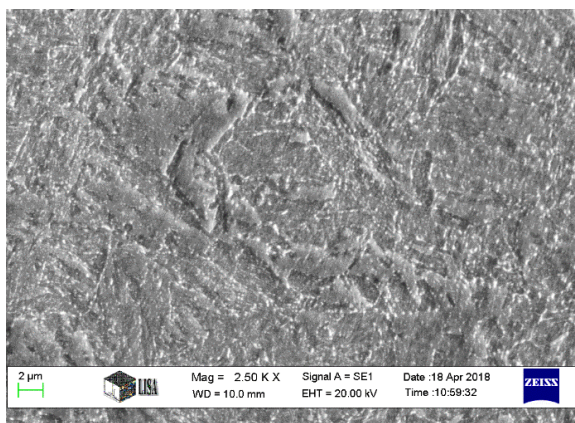
Az elektronmikroszkópos szövetvizsgálat nagyon finom martenzites szövetet, és a magas megeresztési hőmérsékletnek tulajdonítható egyenletes eloszlású finom karbidokat mutatott ki. A szövetek közötti összehasonlítás alapján a 3VS rúd 276 mm-nél lévő metszetén a martenzit tú durvább, és kevesebb mennyiségű karbid látható. **Ez a szöveti eltérés indokolhatja a kisebb keménység értékét (66. ábra, 67. ábra).**



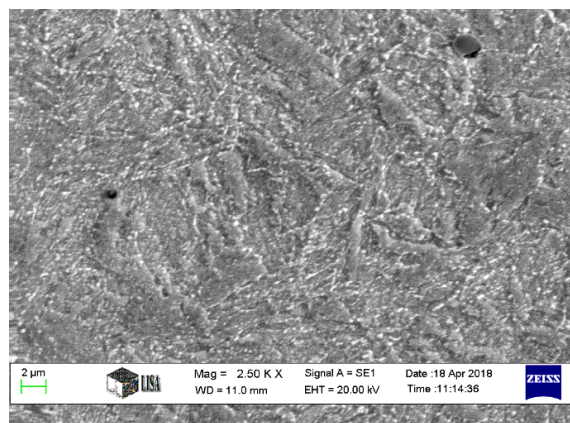
A alkotó



E alkotó

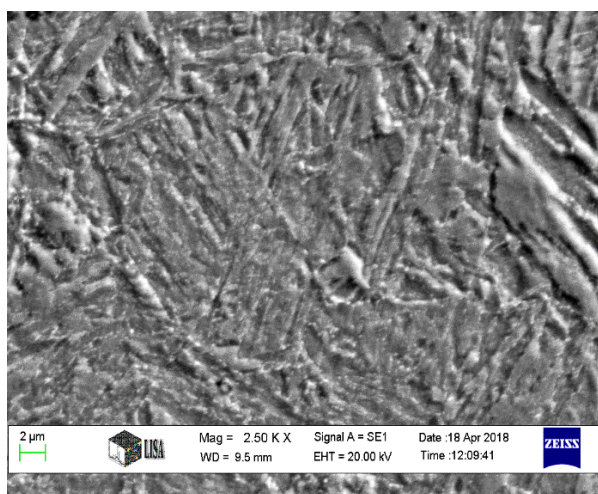


B alkotó

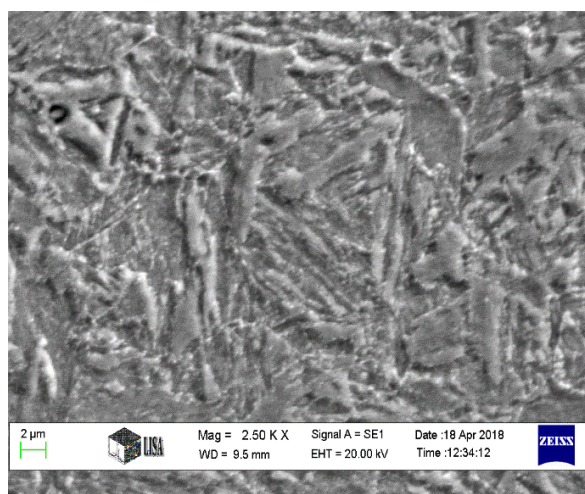


F alkotó

66. ábra A hántolt (2VS) rúd 2-es metszetének (170 mm) elektronmikroszkópos felvételei



AH alkotó



DH alkotó

67. ábra A hántolt (3VS) rúd 276 mm-nél lévő metszetének elektronmikroszkópos felvételei

## 9.9. Végeselemes szimulációval kapott eredmények

Mindhárom edzési esetet (860 °C; 880 °C és 900 °C), megvizsgáltam végeselemes analízissel (68. ábra). Ennek megfelelően a peremfeltételekben három különböző gerjesztési áramot állítottam be. A különböző esetekhez tartozó maradó feszültség eloszlásokat diagramban ismertetem, a rúd felületétől való távolság függvényében ábrázoltam a maradó feszültség értékeinek változását. Ugyanezen lefutás szerint szemléltetem a mért adatokat is. A szimulációval kapott görbék jellege és a mért értékek lefutásának jellege megegyezik. Eltérés a skálázásban van mind a feszültség mind a távolság esetében. A szimuláció esetén a felületen nyomófeszültség, ezzel szemben a mért értékek esetén feszültségmentes állapot van. Mind a szimuláció mind a mért értékek esetében a felülettől távolodva húzó jellegű maximum alakul ki, mely visszacsökken nyomófeszültség irányba. A méret skálában való eltérést több dolog okozhatja. Például a szimulációs program nagyszámú beállítási paraméterei, a hőkezelés során fellépő fázisátalakulások, valamint olyan adatok és körülmények melyek nagyon specifikusak, vagy abszolút nem átültethetők a gyakorlatból a szimulációs környezetbe. Azonban mindenképpen hasznosnak mondhatjuk a szimulációs eredményeket és egy jó közelítéssel jellegük helyességére való tekintettel elfogadhatjuk azokat.

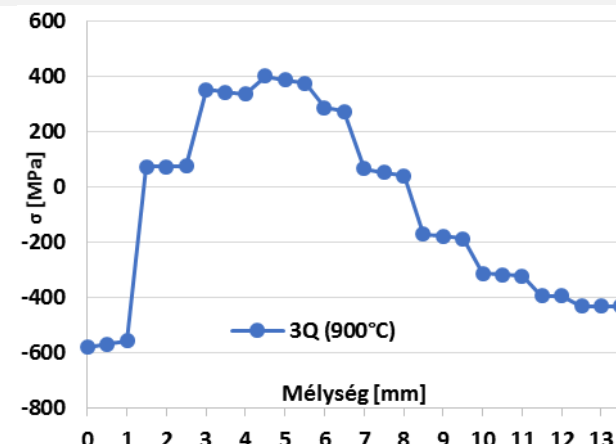
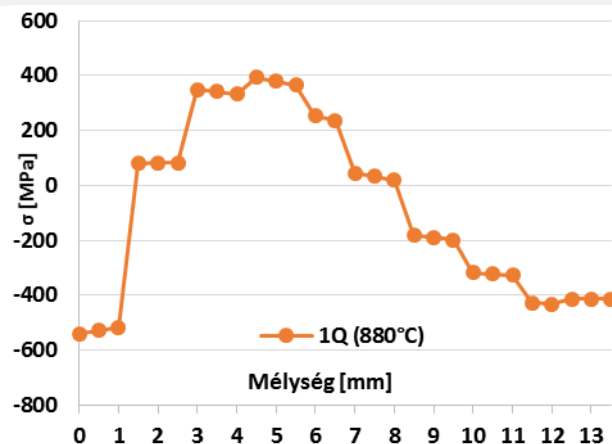
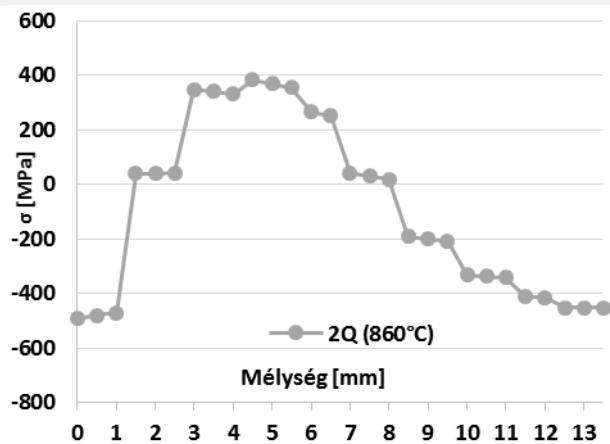
A 69. ábra a vízzel hűtött (1S; 3S; 4) rúd sugár és tengely fél keresztmetszet menti feszültség eloszlását mutatja, amely mellé az összehasonlítás érdekében az 1S rúdon mért mélységi feszültség eloszlás diagramokat újból feltüntettem. A G alkotó 5. pontjában egy nagyobb mélységű vizsgálat is történt. Jól látható, hogy még 2.5 mm mélységben sem éri el a 0 közeli állapotot a rúd. A 8. Melléklet a feszültség eloszlást grafikusán ábrázolja. A röntgendiffrakciós mérés a tengely irányú komponensével azonos eredmény, ami azt mutatja, hogy a felületen nagy nyomó, ami az alatta levő rétegben lecsökken és közel kicsi húzófeszültség állapot alakul ki. A 0 MPa körüli feszültség állapot 2 mm mélységben alakul ki, ami a röntgendiffrakciós mérési eredményekkel nincs teljesen összhangban. A nyomófeszültség maximumára a szimulációs és mérési eredmények jó közelítést adnak. Szimulációs oldalról ebben az esetben jóval egyszerűbb problémával állunk szemben, mint az edzés esetében hiszen itt egy az edzéstől jóval alacsonyabb hőmérsékletű hevítés történik, majd azt követően hűntartás és legvégül egy vízzel történő gyors hűtés, mely nem eredményez fázisátalakulást. Így ennek köszönhető a szimulált és mért eredmények jobb egyezése.

860 °C

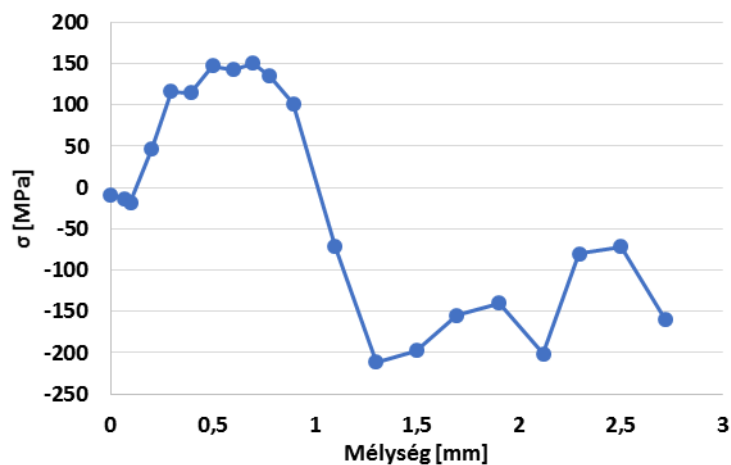
880 °C

900 °C

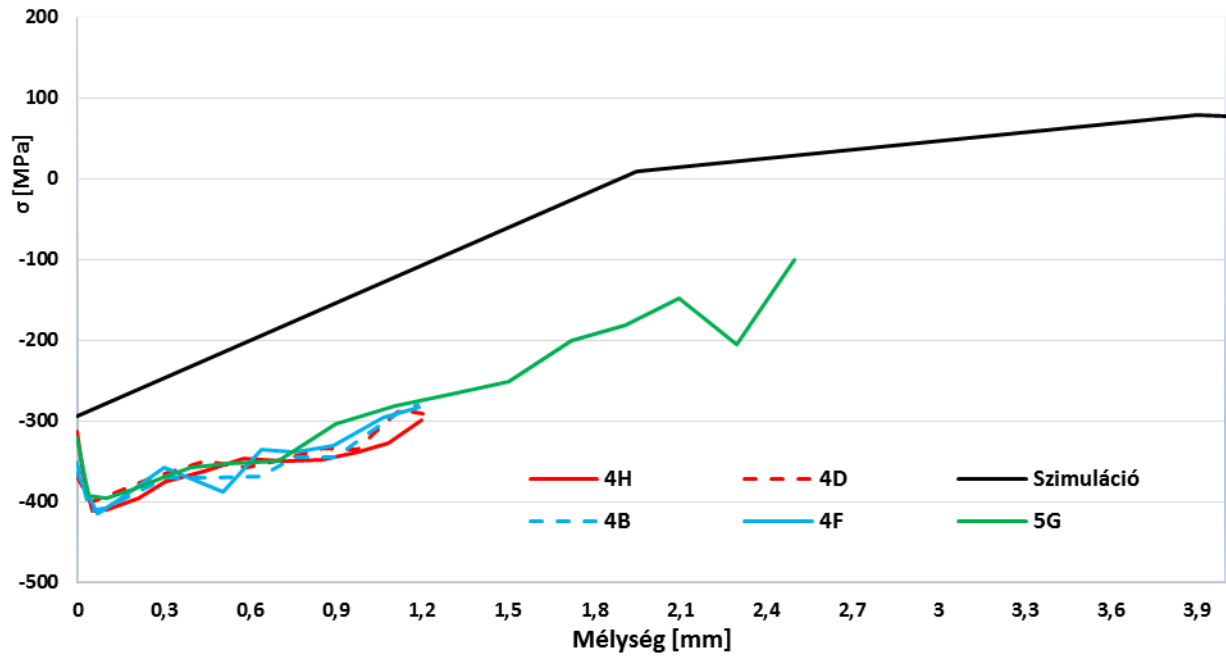
## Szimulációs eredmények



## Röntgendiffrakciós mérési eredmény



68. ábra A maradó feszültség eloszlása az edzés után, edzési hőmérsékletenként. A felső ábrákon a szimulációs eredmények, az alsón a röntgendiffrakcióval mért eredmények



69. ábra A vízzel hűtött (1S) rúd szimulációval kapott sugár menti feszültség eloszlása (0 mm a minta felülete) valamint az elhajlás (D-H) síkjában, és a rá merőleges (B-F) síkban a hosszirány menti 4. mérési pontban (340 mm) és az 5. pont G alkotóján mért mélységi feszültség eloszlás

## 10. Összefoglalás

A dolgozatomban részletesen monitoroztam 37CrS4 típusú acél, járműipari rúd előgyártmány egyes technológiai lépeseit (edzés, megeresztés, hántolás, polírozás, feszültségtelenítés, utópolírozás) követően kialakuló maradó feszültséget és az ezt befolyásoló gyártási körülményeket. A szériagyártás mellett két további szélsőséges állapotot előidéző technológiai lépést (intenzív polírozás, vízhűtés) is alkalmaztam ipari körülmények között. Az így kialakult maradó feszültséget, illetve az azt jellemző állapotot kétféle módszerrel röntgendiffrakciós vizsgálattal és marópróbával mértem. Mind a röntgendiffrakciós vizsgálati eljárást, mind a marópróbas módszert a rúd előgyártmány minősítése céljából kidolgoztam. Ezen túl szövetvizsgálatot, maradék ausztenit vizsgálatot és keménységmérést végeztem. A feszültségeloszlás előjelzésére végeसेlemes szimulációs számításokat alkalmaztam.

Megállapítottam, hogy az általam módosított **marópróbas módszerrel** kapott eredmények a rudak térfogatára vonatkozó, MPa mértékegységgel nem számszerűsíthető módon, de a vizsgált rudak egyes gyártási lépés utáni feszültség eloszlását jól elkülöníthető és reprodukálható módon jellemzik. Nem csak a maradó feszültség mértéke, de annak eloszlása is jellemezhető. A marópróbas eredmények alapján a szériagyártásban kritikus a hántolás művelete. Egyértelmű eredmény, hogy a tisztán termikus eredetű feszültségek nagyobb méretdeformációt okoznak, mint az edzési (termikus és átalakulási) feszültségek. A marózást követő elhajlás szinte mindig a marózott sík normálisának irányába történik, és a kimunkálás előtti rúd egyenessége nem garancia a kimunkálást követő kis elhajlásra.

A **röntgendiffrakciós vizsgálati** eredményekkel kapcsolatosan általánosan elmondható, hogy a nyolc technológiai lépés során, melyből hat a széria gyártás része, kettő pedig kísérleti jelleggel alkalmazott művelet, a feszültség állapot szélsőségesen váltakozik. A változás nem csak a mért értékekre, hanem a jellegre is érvényes, húzó- és nyomófeszültségek váltakoznak. Az erősen változó jelleg egy alkotó mentén is, illetve az alkotók között is előfordulhat.

Az **egyes technológiai lépések maradó feszültségre** gyakorolt hatásáról a következőt állapítottam meg: Az edzési hőmérséklet 860°C – 900°C tartományban történő változtatása nem okoz különbséget a felületi maradó feszültség állapotban. Az edzés után jellemzően feszültségmentes vagy kis értékű nyomófeszültség mérhető, amit a megeresztés tovább csökkent, lecsökkentve az alkotók közötti különbség értékeket valamint a deformációs hajlamot is. A hántolás hatására történik a munkadarabon a legdrasztikusabb feszültség állapot változás, a közvetlen felületen egyértelműen nagy értékű és szórású húzófeszültségek alakulnak ki. A hántolást követő polírozások hatására a feszültség lengése lecsökken. Az intenzívebb polírozás esetében a mintán belüli szórás nagyobb, és az igénybevétel jellegétől eltérően inkább húzófeszültségek alakulnak ki. Az indukciós feszültségmentesítés jelentősen csökkenti a korábbi gyártási lépésekhez képest a deformációs hajlamot. A mérhető feszültségek kisebb értékűek, eloszlásuk egyenletesebbé válik. A feszültségmentesítés utáni vízhűtés hatására a felületi rétegekben -400 ... -300 MPa közötti, jelentős feszültség állapot idézhető elő. A rudak ugyan megtartják egyenességüket, az egyenletes vízhűtés miatt kialakuló feszültség aszimmetria egyenletes, azonban tekintettel a kialakult nagy feszültségekre, az ezt követő anyageltávolítás során megbomló egyensúly a rudak nagyfokú deformációjához vezet. Az utópolírozás a

megmunkálás jellege miatt a feszültségmentesített állapothoz képest nyomófeszültséget eredményez, jellemzően -150 ... 0 MPa értéken belül úgy, hogy a felületen mérhető feszültségek közötti különbségek nagyok.

A hajlító igénybevétel feszültség-eloszlásából kiindulva a rudak elhajlását nem a feszültség, hanem a feszültség aszimmetria okozza. Az **egyes technológiai lépések feszültég aszimmetriára gyakorolt hatásáról** a következőket állapítottam meg: Edzés után az aszimmetria értékek alkotópáronként eltérőek és a hossz tengely mentén is változatos értéket mutatnak, melyek a megeresztést követően jelentősen csökkennek és egyenletesebbé válnak. A hántolás nem csak nagy maradó feszültséget okoz a közvetlen felületen, de nagy aszimmetriával rendelkező állapotot idéz elő, mely eloszlása egyenetlen. A polírozás hatására a feszültség aszimmetria értékek 100 MPa alá, míg az intenzív polírozás hatására kevésbe, csak 150 MPa alá csökkennek. A feszültségmentesítés az aszimmetriában kis értékeket eredményez, melyek eloszlása is kedvezőbb az előző munkafázisoknál tapasztalt értékeknél. A vízűtés heterogén feszültség állapotot eredményező hatása az aszimmetria adatokon is látszik. Alkotónként és alkotón belül is nagy a különbség. Az utópolírozás nyomó és gyengén hajlító jellege miatt a közbelső polírozáshoz hasonlóan a feszültségmentesített állapotot aszimmetria szempontjából is károsan változtatja. Az alkotón belüli és között kialakult feszültséget jelentősen növeli.

A rudak állapotára vonatkozóan a **mért felületi feszültség adatokat és a deformációs adatokat összevetve** azt a megállapítást teszem, hogy amennyiben a mért értékeken belül a feszültség és az aszimmetria értékek kicsik, nem várható a rudak elhajlása (pl. polírozott, feszültség mentesített állapot). Deformáció várható mindazon esetben, ha a feszültség jellemzően kicsi, de az aszimmetria jelentős (intenzíven polírozott állapot), vagy ha kis aszimmetria mellett nagy feszültség, akár húzó vagy nyomó (vízzel hűtött állapot) van a felületen. Különösen hátrányos a helyzet, ha nagy feszültség nagy aszimmetriával párosul (hántolt állapot). Megállapítható, hogy a hántolás a kritikus technológiai művelet, az utópolírozás pedig kimondottan káros. A technológia gyorsítása szempontjából esetlegesen (nem széria gyártásban) alkalmazott vízűtés is rendkívül károsan befolyásolja a rudak állapotát.

A próbákban kialakult makro, és mikro **feszültségek a félértékszélesség adatokban** is megjelennek. Értéke az edzés után a legnagyobb, a darabon belüli változása mind az alkotók mentén, mind az alkotók között jelentősen eltérő. Annak ellenére, hogy a normál feszültség esetében az edzési hőmérséklet közt nem lehetett különbséget kimutatni, a félértékszélesség érzékenyebben reagál. A nagy hőmérsékletű megeresztés után a félértékszélesség értékek mind a három edzési hőmérséklet esetében kiegyenlítődnek, majd a további gyártási lépések esetében különbséget már nem lehet megállapítani.

A **kiugró pontok** környezetének vizsgálatával bebizonyosodott, hogy azok valóban csak lokális kiugrópontok, melyeknek a rúd elhajlására nincs hatásuk.

A marópróbas vizsgálat során alkalmazott **marózás előtt és marózás után** a kimunkálás helyétől távolodva a feszültség nem, vagy csak kis mértékben változik. A **mélyégi feszültség eloszlás** vizsgálatánál a hántolt rudak esetében a szemközti alkotók feszültség eloszlása között (mélyégi feszültség aszimmetria) nagy, esetenként 100 MPa eltérés is mérhető volt. A vizsgálat fontos eredménye, hogy a marózással végzett anyageltávolítás a nagy feszültséget vagy nagy feszültség



gradienst és aszimmetriát tartalmazó rudak esetében okoz nagy deformációt, és a deformáció bekövetkezése nem feltétlen jár együtt a feszültség relaxációjával.

A **maradék ausztenit** mennyisége, valamint eloszlása alapján nem lehet a kialakult maradó feszültségre, valamint a deformációs hajlamra összefüggő következtetéseket levonni. Tehát kijelenthetjük, hogy a kialakult maradó feszültség nagysága és eloszlása nem metallurgiai okokra visszavezethető, hanem a fizikai megmunkálások és termikus hatások eredménye.

A vizsgált **keménység** adatok és a maradék ausztenit mennyisége alapján megállapítható, hogy ez a két tulajdonság nem korrelál konzekvensen. A maradék ausztenit változása nem magyarázza a keménység változásokat és a feszültség aszimmetriát. A keménység különbséget a martenzit tűk mérete és a karbidok mennyiségének eltérése okozza.

A **végeselemes szimulációval** kapott edzett rudak feszültség görbéinek jellege megegyezik. Eltérés a skálázásban van, mind a feszültség mind a távolság esetében, melyet több tényező befolyásolhat. A vízzel hűtött rudak esetében a nyomófeszültség maximumára a szimulációs és mérési eredmények jó közelítést adnak. Az eredmények hasonlósága annak tudható be, hogy szimulációs oldalról ebben az esetben jóval, egyszerűbb problémával állunk szemben, mint az edzés esetében, hiszen ennél a hőkezelésnél nem történik fázisátalakulás.

## 11. Summary

In my thesis work, I monitored the residual stress developed during the technological steps (quenching, annealing, turning, polishing, stress relaxation, post-polishing) and the affecting processing parameters of an automotive rod semi product made of 37CrS4 type steel in details. Besides the standard steps, I applied two additional technological steps resulting extreme conditions (intense polishing, water cooling) realized under industrial conditions. The formed stresses and the characteristic conditions were examined with two methods: X-ray diffraction and machining test. I developed both the X-ray diffraction-based and the machining test methods to qualify the rod semi-products. In addition, I carried out microstructure examinations, retained austenite determinations, and hardness tests. I applied finite element analysis for the prediction of residual stress distribution.

I concluded that the results obtained with the developed **machining test** do not provide numerical MPa values, but they characterize the stress distribution in the full volume of the rods, in a well distinguishable and reproducible manner after the different manufacturing steps. Not only the magnitude, but also the distribution of the residual stress can be characterized. Based on the machining tests, the critical step is the turning in the standard production line. A univocal result is that the pure thermal origin stresses cause larger geometrical distortion than the quenching (thermal and phase transformation) stresses. The bending after machining almost always appear in the normal direction of the plane of material removal and the straightness of the rods prior to machining is not a guarantee for the negligible bending after material removal.

Regarding the results of **X-ray diffraction**, it can be stated in general, that during the eight technological steps, from which six are standard steps, and two being experimental processes, residual stress varies extremely. The variation includes not only the magnitude, but the type as well, tensile and compressive stresses are altering. The heavily varying character can occur along one generatrix and between generatrices as well.

I concluded the following regarding the effect of **individual technological steps on residual stresses**: Changing the quenching temperature between 860°C – 900°C does not cause difference in the developed residual stress. After quenching, typically stress-free state, or low stresses can be measured, which is further decreased by annealing, also decreasing the difference between generatrices and bending tendency. Turning induces the most significant stress change within the specimen, on the surface, large tensile stresses with large scatter develop. The stress variation decreases due to polishing after turning. In the case of intense polishing, the scatter within the specimen is larger and differing from the type of processing, typically tensile stresses form. Induction stress relaxation notably decreases the deformation tendency, compared to the previous steps. The residual stresses are smaller, their distribution becomes more uniform. Due to water cooling applied after stress relaxation a notable stress state between -400 ... -300 MPa can be induced within the near surface regions. The rods retain their straightness, and due to uniform water cooling the stress asymmetry is uniform, but the large stress values lead to a large degree of deformation during the collapsing of the stress equilibrium enhanced by subsequent material removal. Post-polishing induces compressive stresses compared to the stress-relaxed state due to the type of the process, typically within -150 ... 0 MPa with large differences between measured values on the surface.

Originating from the stress distribution during bending tests, the bending of the rods is not caused by the stress, but the asymmetry of the stress distribution. I concluded the following based on **the effect of the different technological on stress asymmetry**: After quenching, the asymmetry values of generatrix-pairs are different and show variable values along the longitudinal axis, which notably decrease and become more uniform after annealing. Turning not only induces large residual stress on the surface, but also develops a state with large asymmetry, which means uneven distribution. Stress asymmetry values decrease below 100 MPa due to polishing and only below 150 MPa due to intense polishing. Stress relaxation results small values in stress asymmetry which is a more beneficial distribution compared to the observed states of the previous steps. The effect of water cooling resulting heterogeneous stress state can also be seen on the asymmetry data as well. There are large differences between generatrices and within one generatrix as well. Similarly to polishing, due to the compressive and slightly bending effect of post-polishing it affects stress asymmetry negatively compared to stress relaxed state. It notably increases stress differences within one generatrix and between generatrices.

**Comparing measured stress and deformation data of the rods** I conclude that as long as stress and asymmetry values are small, the bending of the rods is not expected (for instance: polished, stress relaxed states). Deformation is expected in all cases if the stresses are typically small, but the asymmetry is large (intensively polished state), or if the stresses, either tensile or compressive, are large and the asymmetry is small (water cooled state) on the surface. The case is crucial, when large stresses are paired with large asymmetry (turned state). It can be stated that turning is the critical manufacturing step and post-polishing is univocally harmful. The application of water cooling (not in the standard manufacturing line) to potentially enhance producibility, also extremely harmfully modifies the stress state of the rods.

The **macro- and microstresses** formed within the specimens **appear in the full width at half maximum data** as well. Its value is largest after quenching, its variation along one generatrix and between generatrices within one specimen is different. Although no differences were seen in normal stresses between different quenching temperatures, full width at half maximum data reacts more sensitively. After high temperature annealing the full width at half maximum data are equalised for all three quenching temperatures, and later on, no differences can be detected.

It was proven through the examination of **extreme data points** that such values are truly locally extreme points, which have no effect on the bending of the rods.

The stress does not, or only slightly changes at a distance from the material removal **prior to and after machining test**. Large, even 100 MPa difference was measured between the stress distribution of opposing generatrices during depth stress profile measurements (stress asymmetry depth profile) of the turned rods. An important result of the examination is that the material removal during machining test causes large deformation in rods with large stress or large stress asymmetry, and deformation is not necessarily paired with stress relaxation.

No conclusions regarding bending tendency and developed residual stress can be made based on the amount and distribution of **retained austenite**. Thus, it can be stated that the magnitude and distribution of the formed residual stress can not be linked to metallurgical causes, but to physical machinings and thermal effects.

Based on the **hardness** and retained austenite data it can be stated that these two characteristics do not correlate consequently. The change of retained austenite content does not explain the hardness changes and the stress asymmetry. The hardness differences are caused by the differences of the size of martensite plates and the quantity of carbides.

The character of the stress curves of quenched rods obtained with **finite element analysis** are the same. Differences appear in the scaling of both stress and distance, which can be affected by multiple factors. For the maximum of compressive stress of the water cooled rods, the measured and calculated data show a good agreement. The similarity of results can be attributed to the fact that from the simulation side, this case is an easier problem compared to quenching, since there is no phase transformation at this treatment.

## 12. Tézisek

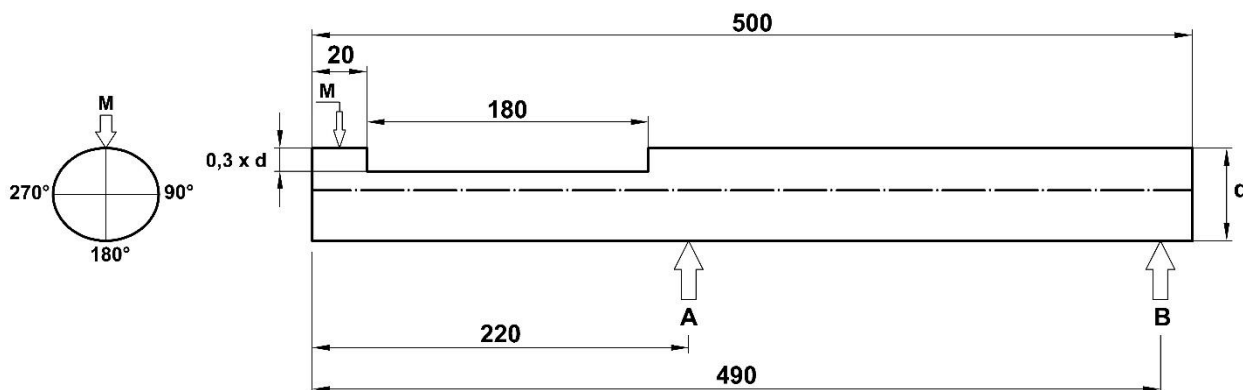
37CrS4 típusú acélból készült, körkeresztmetszetű rúd fogasléc előgyártmány fogazásig, ipari környezetben történő előállítás során monitoroztam a termék maradó feszültség állapotának változását, az előgyártmány tovább feldolgozhatóságának érdekében. A monitorozást technológiai lépésenként történő mintavétellel, a maradó feszültség felületi és felület alatti eloszlásának a meghatározásával végeztem el. A mintákat hat szériagyártási (indukciós edzés, indukciós megeresztés, hántolás, polírozás, indukciós feszültségmentesítés, utópolírozás), valamint két szélsőséges kísérleti (intenzív polírozás, vízhűtés) technológiai lépések után vizsgáltam. A maradó feszültség állapot jellemzésére röntgendiffrakciós és marópróbás eljárásokat alkalmaztam. A kutatás eredményeként a témában új, az irodalomban még nem publikált következő megállapításokat teszem:

### 1. Az ipari környezetben használható mérési eljárásról:

Körkeresztmetszetű acélrúd előgyártmány további forgácsolása során történő alakdeformációs hajlamának kimutatására az alábbi ipari környezetben is használható eljárások alkalmasak.

#### a) Marópróbás módszer

Marópróbás módszer esetén az **1. T-ábra** szerinti elrendezést kell alkalmazni. A és B görgőkön alátámasztott rúdon, az M mérőóra helyén azonos referencia pontot használva marózás előtt és marózás után meg kell mérni a maximális elhajlások mértékét és helyét. A két érték előjeles különbségének abszolút értéke adja a  $\Delta$  elhajlás értékét. Az alakdeformációs hajlamról a  $\Delta$  elhajlás értéke ad információt. Adott célú felhasználás során az elfogadható határértéket kísérletileg kell meghatározni.



**1. T-ábra** Marópróba geometriai paramétereit a kimarózást követően, ahol A, B alátámasztási pontok, M mérőóra

#### b) Röntgendiffrakciós mérési módszer

Központ nélküli röntgendiffraktométer alkalmazása esetén az acélrúd előgyártmány minősítését felületi mérési háló szerint kell elvégezni. A mérési háló a paláston szimmetrikusan 8 alkotó mentén, az egyes alkotókon az átmérő háromszorosára vett távolságra elhelyezett kontúr vonalon lévő mérési pontokból áll, amelyeken tengely irányú feszültségkomponens mérése szükséges. Az egyes pontokban a szabványosított eljárásoknak megfelelően kell a mérést elvégezni. A deformációs hajlamra a felületi normál feszültség nagysága, előjele és a felületi feszültség

aszimmetria értéke együttesen ad információt. További információt ad a mélységi feszültség eloszlás vizsgálat abban az esetben, ha a mélységi vizsgálati helyek felvétele az aszimmetria számításánál leírt helyeknek megfelelően történik. A félértékszélesség adatok a feszültség adatokkal együttesen történő értékelése a felületi minőségre és a mikrofeszültségekre további kiegészítő információt ad.

## **2. A deformáció hajlamának prognosztizálása marópróbával meghatározott paraméterek alapján**

Kimunkálás előtti rúd félkésztermék deformációs hajlamának prognosztizálására a marópróbás vizsgálati módszerrel meghatározott marás előtti elhajlás, marás utáni elhajlás és az azokból meghatározott  $\Delta$  elhajlás ismerete szükséges. Az egyes technológiai lépéseket követő elhajlások számszerű értékeit az **1. T-táblázat** és **2. T-ábra** összesíti. A deformációs hajlamra a meghatározott értéktartományra vonatkoztatva a következő megállapítást teszem:

- a) Amennyiben a marás előtt és marás utáni elhajlás értékek nagyok, de a  $\Delta$  elhajlás kicsi, az arra utal, hogy a nagy elhajlást nem rugalmas maradó feszültség, hanem a rúd eredendő ferdesége okozza, ekkor további deformáció nem várható.
- b) Amennyiben a marás előtt az elhajlás értéke kicsi, az csak a rúd egyenességére garancia, de további deformációs hajlamára nem ad információt.
- c) Amennyiben a  $\Delta$  elhajlás értéke a 0,7 mm-t nem haladja meg, a maradó feszültség okozta méret deformáció, autóipari felhasználásra szánt termék forgácsolásakor nem okoz problémát. Egyéb felhasználásra szánt előgyártmány határértékét kísérleti úton meg kell határozni.

## **3. A deformáció hajlamának prognosztizálása felületi röntgendiffrakciós maradó feszültség adatok alapján**

Kimunkálás előtti rúd félkésztermék deformációs hajlamának prognosztizálására a felületi normálfeszültség és feszültség aszimmetria ismerete szükséges. Az egyes technológiai lépéseket követő paraméterek felületen meghatározott feszültség értékeit az **1. T-táblázat** és **2. T-ábra** összesíti. A deformációs hajlamra a felületen meghatározott értéktartományra vonatkoztatva a következő megállapítást teszem:

- a) Amennyiben a maradó feszültség ( $< |\sim 100|$  MPa) és a feszültség aszimmetria értékek ( $< \sim 100$  MPa) jellemzően kicsik, nem várható a rudak elhajlása aszimmetrikus anyageltávolítás esetén sem.
- b) Deformáció várható mindazon esetben, ha a maradó feszültség jellemzően kicsi (akár  $|\sim 50|$  MPa), de a feszültség aszimmetria jellemzően jelentős ( $> \sim 100$  MPa).
- c) Deformáció várható mindazon esetben, ha jellemzően kis feszültség aszimmetria ( $< \sim 100$  MPa) mellett jellemzően nagy maradó feszültség ( $> |\sim 300|$  MPa) van a felületen, illetve aszimmetrikus anyageltávolítás történik.
- d) Deformáció szempontjából kritikus, ha jellemzően nagy maradó feszültség ( $> |\sim 300|$  MPa) jellemzően nagy feszültség aszimmetriával ( $> \sim 100$  MPa) párosul.

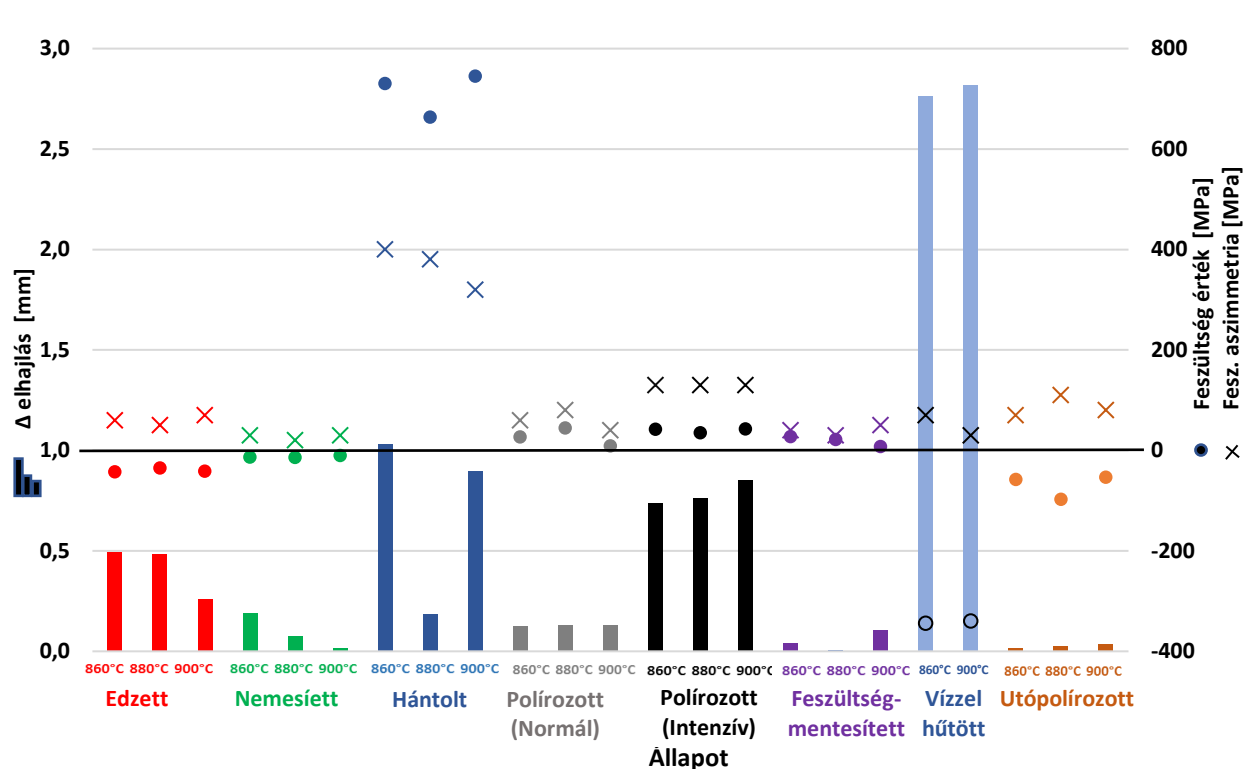
#### 4. A deformáció hajlamának prognosztizálása térfogati röntgendiffrakciós maradó feszültség adatok alapján

Kimunkálás előtti rúd félkésztermék deformációs hajlamának prognosztizálására a röntgendiffrakciós vizsgálat esetében a felület alatti normálfeszültség és feszültség aszimmetria ismerete szükséges. A deformációs hajlamra a térfogatban meghatározott értéktartományra vonatkoztatva a következő megállapítást teszem:

- Ha az azonos kontúron egymástól 180°-ra lévő helyek mélységi feszültség lefutás görbéi különböznek, az elhajlás a mérési helyek által meghatározott síkban bekövetkezik.
- Hasonló lefutás esetén az elhajlás akkor is bekövetkezik, ha a lefutás gradiense nagy.
- A térfogat eltávolítással járó művelet következtében bekövetkező deformáció nem szükségszerűen jár együtt a maradó feszültség relaxációjával.

1. T-táblázat A teljes gyártási folyamatot kísérő felületi maradó feszültség és deformációs mérések összefoglaló eredményei

Edzési Hőmérséklet [°C]	Állapot	Marás előtti elhajlás [mm]	Marás utáni elhajlás [mm]	$\Delta$ elhajlás [mm]	Átlagos feszültség [MPa]	Jellemző maximális feszültség aszimmetria [MPa]
860	Edzett	0,825	0,330	0,495	-43	60
880		1,040	1,525	0,485	-36	50
900		0,250	0,510	0,260	-42	70
860	Nemesített	0,520	0,330	0,190	-14	30
880		0,440	0,515	0,075	-15	20
900		0,350	0,335	0,015	-10	30
860	Hántolt	0,360	-0,670	1,030	730	400
880		0,070	-0,115	0,185	663	380
900		0,360	-0,535	0,895	745	320
860	Polírozott (Normál)	0,145	0,270	0,125	27	60
880		0,105	0,235	0,130	44	80
900		0,120	0,250	0,130	9	40
860	Polírozott (Intenzív)	0,090	0,825	0,735	42	130
880		0,025	0,785	0,760	35	130
900		0,050	0,900	0,850	43	130
860	Fesz. Mentésített	0,090	0,130	0,040	27	40
880		0,135	0,140	0,005	21	30
900		0,180	0,075	0,105	8	50
860	Vízrel hűtött	0,045	-2,720	2,765	-344	70
900		0,060	-2,760	2,820	-340	30
860	Utópolírozott	0,090	-0,075	0,165	-58	70
880		0,105	-0,080	0,185	-97	110
900		0,100	-0,135	0,235	-53	80



2. T-ábra A teljes gyártási folyamatot kísérő felületi maradó feszültség és deformációs mérések összefoglaló eredményei

## 5. Az egyes technológiai lépések hatásáról:

Indukciósan edzett fogasléc előgyártmány (kimunkálás előtti rúd félkésztermék) tengely irányú, felületi, maradó feszültség értékét az egyes technológiai lépések szélsőségesen, -400 ... 1000 MPa között változtatják. Az egyes gyártási lépések után tapasztalt maradó feszültség átlagos értékeit és a feszültségaszimmetria jellemző értékeit az 1. T-táblázat és 2. T-ábra mutatják.

a) Az edzési hőmérséklet a 860 ... 900°C tartományon belüli változása nem okoz érdemi hatást a maradó feszültség állapotban. Az edzés után jellemzően feszültségmentes, vagy kis, maximum 120 MPa értékű tengely irányú, felületi nyomófeszültség alakul ki. A megeresztés a mintán belüli feszültség szintet a -50... 0 MPa tartományra, a feszültségmentesítés 0 ... 50 MPa tartományra változtatja, vagyis mindkét technológia feszültségmentesítést okoz.

b) A hántolás okozza a munkadarabon a legdrasztikusabb feszültség szintbeli változást, nagy értékű és nagy szórású húzófeszültségek alakulnak ki. A feszültség változása egy alkotón belül akár 500 MPa is lehet, valamint az alkotók közti különbségek értéke is nagy, a változás a 300 ... 1000 MPa feszültség értéken belüli.

c) A hántolást követő polírozás a feszültség hántolás során kialakuló lengését lecsökkenti, jellemzően -50 ... 100 MPa tartományon belüli értékekre. A hántolásnál tapasztalható nagy húzófeszültségből polírozás után már nyomófeszültség is kialakulhat. A polírozás intenzitásának növelése a mintán belüli feszültség szórását, illetve a feszültség aszimmetriáját növeli, egyértelműen káros. Szintén káros az utópolírozás művelete is mivel a feszültségmentesített



állapothoz képest  $-150 \dots 0$  MPa értéken belüli, alkotónkénti nagy szórású feszültség állapotot okoz.

e) Kimondottan káros és kerülendő a technológia gyorsításaként a feszültségmentesítést követően alkalmazott vízhűtés, mivel  $-400 \dots -300$  MPa jelentős nyomófeszültség alakul ki. Az adott geometriai és termikus feltételek mellett a pusztán termikus feszültségek a feszültségmentesítést követő vízhűtés esetén a rudak sokkal nagyobb deformációját okozzák, mint a termikus és fázisátalakulási feszültségek kombinációja edzéskor.

### 13. Az eredmények hasznosulása

A rohamosan fejlődő autó- és gépipar, minőségbiztosítási célokból egyre szigorúbb előírásokat követel meg. Nagyon fontos, hogy olyan paraméterek, anyagtulajdonságok is egyszerűen és költséghatékonyan mérhetőek legyenek, melyek a gazdaságos és zökkenőmentes tömeggyártáshoz elengedhetetlenek. A gyártási folyamatoknál a lehető legkevesebb „felesleges” időt veszítsék el, az előre belátható okok miatt. Azonban ehhez elengedhetetlen, hogy egy gyártósor/üzem időoptimalizáltan elérje a maximális idő/darabszám teljesítményét. Ez csak akkor lehetséges, ha ismert és a szükséges előírásnak megfelel a megmunkálandó termék minősége. A marópróbas feszültség vizsgálathoz szükséges berendezések alacsony összköltsége, valamint a módszer egyszerűsége miatt jó lehetőséget biztosít egy helyben, rövid idő alatt elvégezhető méréshez. Ezekből az okokból kifolyólag egy német tulajdonosi háttérű prémium kategóriás gépjárműveket előállító cégnek a módszer felkeltette az érdeklődését és a kutatás céljára kifejlesztett marópróbát, az összes paraméterével együtt, bizonyos alkatrészek beszállítási, valamint gyártás közbeni vizsgálatát minőségbiztosítási célból rajzszerinti előírásban követeli meg. Több Magyarországon lévő autópipari beszállító és gyártó cég érdeklődik az iránt, hogy a központ nélküli röntgendiffraktorral történő maradó feszültség mérést beépítse a saját minőségbiztosítási rendszerébe. Számukra a kutatómunkában ismertett módszer és eredmények hasznos információval szolgálnak. A röntgendiffrakciós vizsgálati eljárás alapvetően szabványosított, de a mérési metodika (adott alkatrész, célirányosan meghatározott maradó feszültség meghatározása) vagy a vizsgálatot végző kompetenciája vagy ritkább esetben a felhasználó feszültség modellezési számításokon alapuló megközelítése. Az általam alkalmazott szisztematikus vizsgálati eljárás egy jó példa az adott alkatrész felhasználása szempontjából fontos információ kinyerésére, amely messze túlmutat a számszerűen meghatározott mérési eredményeken.

Az alkalmazott vizsgálati módszerek és azok eredményei mind a graduális, posztgraduális, mind a doktori képzésben a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet által oktatott tantárgyakban közvetlenül hasznosíthatók.

### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Mertinger Valériának és Dr. Benke Mártonnak kitartó munkájuk, koordinálásuk és szakmai támogatásukért. Hálával tartozom Eugen Girstenbreinnek, akitől a szakmai tapasztalaton kívül nagyon sok szemléletformáló dolgot

sajátíthattam el. Köszönöm Mario Reichertnek, hogy lehetőséget biztosított céljaim eléréséhez. Hálásan köszönöm a Lech-Stahl Veredelung GmbH valamennyi dolgozójának, akik a kutatómukámhoz szükséges próbák előállításában, mérésében részt vettek: Christian Keis, Robert Kundinger, Robert Reisner, Vito Gallo, Anna Braun, Samantha Marquardt.

Köszönöm a segítséget a Műszaki Anyagtudományi Kar Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet minden munkatársának, doktoranduszainak, hallgatóinak, akik az évek során kutatói munkásságom sikerességéhez hozzájárultak.

Nagyon köszönöm Kárpáti Viktornak a szorgos és kitartó munkáját, Dr. Szűcs Máténak a szimulációs számításokhoz nyújtott segítségét, a nagyfelbontású szövetszerkezeti képeket Kovács Árpádnak, valamint Kazinczi Tímea, Hlavács Adrienn, Filep Ádám, Sepsi Máté aktív támogatásukat.

Hálás szeretettel köszönöm szüleimnek, testvéremnek, hogy kutatási munkám sikerének érdekében mindig és mindenben támogattak.

## Irodalmi hivatkozások

- Bárcyz, P. F. (1981). *Metallográfia I*. Budapest: Tankönyvkiadó.
- Bhadeshia, H. W. (2013). Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 355-365.
- Brzoza, M. (2006). *Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug von Stahlbauteilen durch örtliche Beeinflussung der Abkühlung*, Dissertation. Forrás: <https://core.ac.uk/download/pdf/51447914.pdf>
- Coupard, D. P.-I. (2008). Residual stresses in surface induction hardening of steels: Comparison between experiment and simulation. *Material Science and Engineering*, 328-339.
- Cseh, D. (2018). *Maradó feszültség relaxációja fűrésztó igénybevétel közben*. PhD disszertáció. Miskolc.
- DIN EN 15305. (2009). Non-destructive testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction. *Szabvány*. DIN EN.
- Eckstein, H. (1976). *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*. Leipzig: Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie.
- EINAV, I. S. (2016). Revealing the Stresses - New Approach for Industrial Safety, Reliability and Residual Life Assessment. *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, (old.: 62-65). Miami, Florida USA.
- Haimbaugh, R. (2006). *Induktion heat treating*. Ohio: The Materials Information Society.
- Jang, D. W. (1996). Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. *Wear*, 168-173.

- Jinkai, X. J. (2017). Study on Roughness and Residual Stress of Precision Micro-Milling of High Strength Materials. *2017 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*, (old.: 219-223). Shanghai.
- John, M. V. (2011). Optimization of Ball Burnishing Process on Tool Steel (T215Cr12) in CNC Machining Centre Using Response Surface Methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1407-1422.
- Kalentic, N. B. (2017). 3D Laser Shock Peening – A new method for the 3D control of residual stresses in Selective Laser Melting. *Materials & Design*, 350-356.
- Kárpáti, V. M. (2017). Edzés utáni maradó feszültség és deformáció összefüggéseinek vizsgálata roncsolás mentes anyagvizsgálati módszerekkel. *Hungarian NDT Conference*. Ungarn, Eger.
- Kim, W. N. (1992). A study on residual stresses in surface hardening by high frequency induction heating. *Surface and Coatings Technology*, 281-288.
- Krawitz, A. (2001). *Introduction to diffraction in materials science and engineering*. Wiley-Interscience.
- Kristoffersen, H. V. (2001). Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses. *Materials and Design*, 637-644.
- Lemos, G. H. (2014). Residual Stress Analysis of Drive Shafts After Induction Hardening. *Materials Research*, 70-74.
- Leppert, T. P. (2012). Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel. *Production Engineering Research and Development*, 367–374.
- Mika, H. (1991). *Joule-Lenz-törvény*. Forrás: <http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/JouLenTv.htm>
- M'Saoubi, R. O. (1999). Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 225-233.
- M'Saoubia, R. O. (1999). Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. *Journal of Materials Processing Technology*, old.: 225-233.
- Nestler, A. S. (2015). Effect of machining parameters on surface properties diamond burnishing of aluminium matrix composites. *Conference MEFORM 2015, Light Metals – Forming Technologies and Further Processing* (old.: 156-161). Published by Elsevier Ltd. Forrás: Elsevier.
- Ng, D. Y. (1995). Measurement of Barkhausen emission and magnetoacoustic emission from a fractured steel bar. *IEEE transactions on magnetics*, (old.: 3394-3396).
- Nyíregyházi Főiskola. (2016. Január). Forrás: <http://mmfk.nyf.hu/heg/1fej/1fej.htm>
- Ochi, Y. M. (2010). Effects of laser peening treatment without protective coating. *Procedia Engineering*, 491-498.

- Outeiro, J. D. (2002). Machining residual stresses in AlSi 316L steel their correlation with the cutting parameters. *Machining Science and Technology*, 251–270.
- Palaniradja, K. A. (2010). Residual Stresses in Case Hardened Materials. *The Open Materials Science Journal*, 92-102.
- Pan, Q. S. (2017). The Experimental Research on Residual Stress Regulation Based on High-Energy Acoustic Wave. *Proceeding of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, (old.: 888-892). Takamatsu, Japan.
- Paquet, D. L. (2012. November). A New Experimental Method for the Introduction of a Predetermined Amount of Residual Stresses in Fatigue Test Specimens. *Journal of Applied Mechanics*, old.: 1-13.
- Paquet, D., Lantaigne, J., & Bernard, M. (2012). A new experimental method for the introduction of a predetermined amount of residual stresses in fatigue test specimens. *ASME Appl Mech*, 1 - 13.
- Rudnev , V., & Totten , G. (2014). *ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment*. USA: ASM International.
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., & Black, M. (2003). *Handbook of Induction Heating*. USA: Library of Congress Cataloging –in-Publication Data.
- Sharman, A. H. (2006). An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718 when turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 359–367.
- Shin, Y., & Tian, Y. (2006). Laser-assisted burnishing of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 14 - 22.
- Shiping, Z. Y. (2009). Nondestructive measurement system for welding residual stress by ultrasonic method. *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, (old.: 5469-5473). Fukuoka International Congress Center, Japan.
- Stenberg, N. P. (2013). Numerical modelling of turning to find residual stresses. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, (old.: 258–264). Turin, Italy.
- Stresstech Xstress 3000 G3R system operating instructions and instrument documents*. (2012).
- Stuers MovPol*. (2019. 04). Forrás: <https://www.struers.com/de-DE/Products/Electrolytic-Preparation/Electrolytic-equipment/MovPol>
- SUN, J., QIN, F., & REN, C. W. (2014). Residual stress measurement of the ground wafer by Raman Spectroscopy. *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, (old.: 867-870). Chengdu, China.
- Totten, G., Howes , M., & Inoue , T. (2008). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. USA: ASM International.
- Verő, J. K. (1977). *Fémtan*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó.

- VOLKER, L. (2010). *Wärmebehandlung des Stahl* (10. Auslage. kiad.). Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmitte.
- Vourna, P. H. (2015). Correlation of Magnetic Properties and Residual Stress Distribution Monitored by X-Ray and Neutron Diffraction in Welded AISI 1008 Steel Sheets. *IEEE transactions on magnetics*.
- Wikipedia. (2019. 02 19). *Maxwell-egyenletek*. Forrás: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Maxwell-egyenletek>
- Withers, P. (2007). Residual stress and its role in failure. *Reports on progress in physics*, 2211–2264 .
- Zhuang, W. H. (2001). Investigation of residual stress relaxation under cyclic load. *International Journal of Fatigue*, 31-37.

## A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk jegyzéke

József, Majtényi; Marton, Benke; Valeria, Mertinger; Timea, Kazinczi: The Effect of Quenching Temperature and Polishing Force on the Residual Stress and Deformation of Rack Bar Semi-Products, *Materials Science Forum* 885 pp. 1-6. (2017).

József, Majtényi; Viktor, Kárpáti; Márton, Benke; Valéria, Mertinger: Comparative Destructive and Non-Destructive Residual Stress Measuring Methods for Steering Rack Bar Semi-Product, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* F12 pp. 60-68. (2017).

Majtényi, József; Kárpáti, Viktor; Benke, Márton; Mertinger, Valéria: Maradó feszültség meghatározása marópróbás és röntgendiagramos módszerekkel járműipari kormányfogasléc félkésztermék gyártási folyamatában, *Bányászati és Kohászati Lapok-Kohászat* 150: 5 pp. 35-41. (2017).

Kárpáti, Viktor; Majtényi, József; Benke, Márton; Varga, Gyula; Mertinger, Valéria: Edzés utáni maradó feszültség és méretdeformációk korrelációja, In: Dr. Tóth, Tamás; Hohol, Róbert (szerk.) XXVII. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiállítás külföldi részvevőkkel Veszprém, Magyarország: Gépipari Tudományos Egyesület, Hőkezelő Szakosztály, (2016).

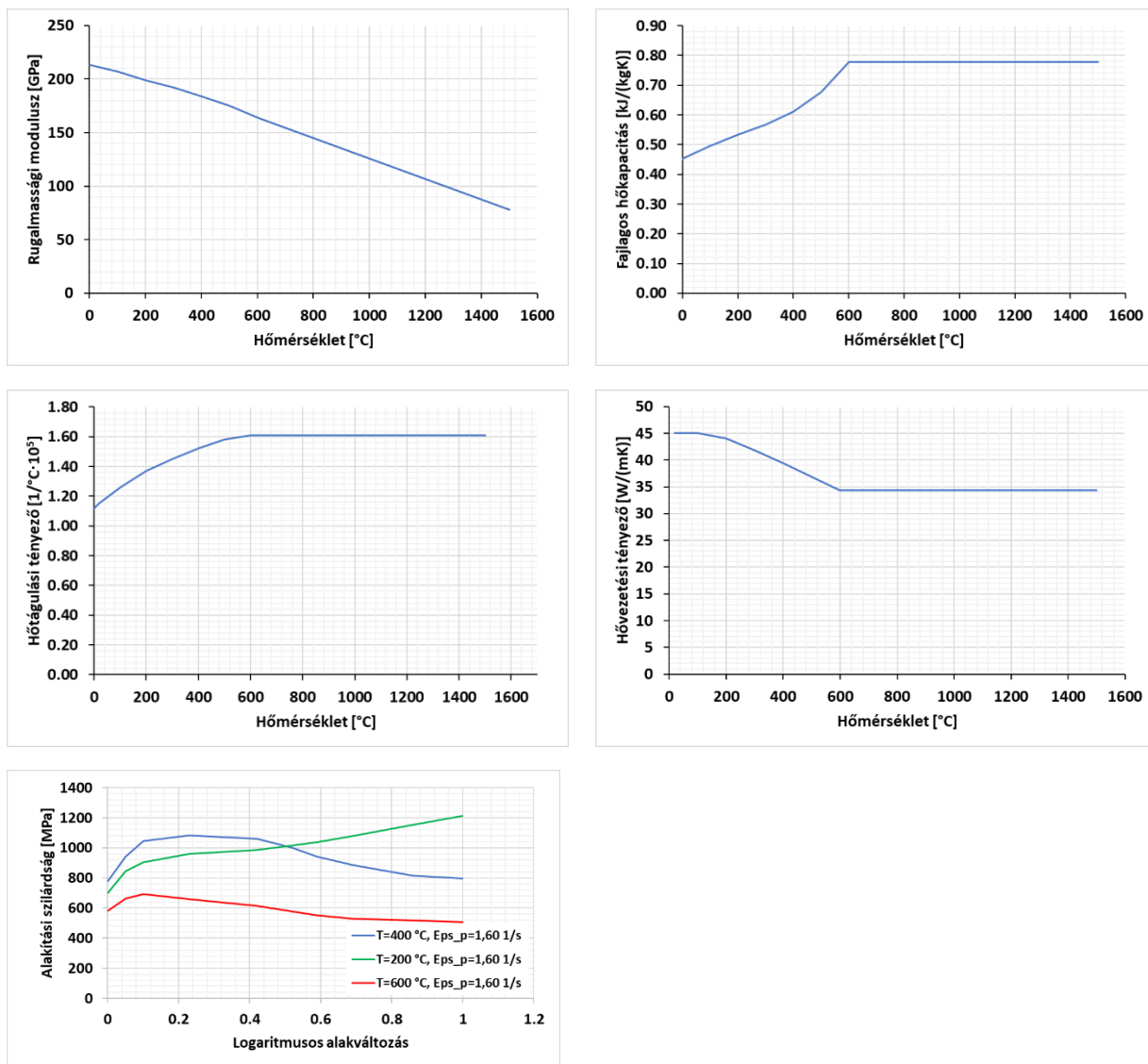
Viktor, Kárpáti; József, Majtényi; Szabolcs, Nyitrai; Márton, Benke; Valéria, Mertinger: Comparative study of residual stress state induced by quenching and tempering, In: Kékesi, Tamás (szerk.) The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference Miskolc, Magyarország: University of Miskolc, (2016) pp. 1-8. Paper: B13.

## Mellékletek

**1. Melléklet Különböző rudak marópróbával meghatározott  $\Delta$  elhajlás értéke és a vevői visszajelzések korrelációja**

d [mm]	Állapot	Acél	$\Delta$ elhajlás [mm]	Vevői visszajelzés	d [mm]	Állapot	Acél	$\Delta$ elhajlás [mm]	Vevői visszajelzés
26	Polírozott	37CrS4	1,56	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,815	Nagy % selejt
26	Megeresztett	16MnCrS5	1,524	Nagy % selejt	29	Megeresztett	ZF50	0,815	Nagy % selejt
22	Polírozott	31CrMoV9	1,295	Nagy % selejt	20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,795	Néhány selejt
22	Polírozott	31CrMoV9	1,245	Nagy % selejt	26	Megeresztett	16MnCrS5	0,785	Néhány selejt
20,5	Polírozott	16MnCrS5	1,24	Nagy % selejt	20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,765	Néhány selejt
42	Megeresztett	51CrV4	1,22	Nagy % selejt	20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,745	Néhány selejt
20,5	Polírozott	16MnCrS5	1,185	Nagy % selejt	26	Megeresztett	16MnCrS5	0,755	Néhány selejt
29	Megeresztett	ZF50	1,08	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,825	Nagy % selejt
20,5	Polírozott	16MnCrS5	1,02	Nagy % selejt	42	Megeresztett	51CrV4	0,945	Nagy % selejt
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,945	Nagy % selejt	26	Megeresztett	16MnCrS5	1,25	Nagy % selejt
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,925	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,21	Megfelelő
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,92	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,36	Megfelelő
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,9	Nagy % selejt	29	Megeresztett	ZF50	0,005	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,885	Nagy % selejt	29	Megeresztett	ZF50	0,02	Megfelelő
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,88	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,295	Megfelelő
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,865	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,26	Megfelelő
20,5	Polírozott	16MnCrS5	0,825	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,32	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,275	Megfelelő	28	Polírozott	ZF50	0,33	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,29	Megfelelő	28	Polírozott	ZF50	0,365	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,255	Megfelelő	28	Polírozott	ZF50	0,3	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,155	Megfelelő	22,2	Polírozott	ZF50	0,265	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,275	Megfelelő	22,2	Polírozott	ZF50	0,09	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,275	Megfelelő	31	Polírozott	ZF50	0,235	Megfelelő
28	Polírozott	ZF50	0,19	Megfelelő	31	Polírozott	ZF50	0,33	Megfelelő
29	Megeresztett	ZF50	1,08	Nagy % selejt	28	Polírozott	ZF50	0,29	Megfelelő
29	Megeresztett	ZF50	0,405	Megfelelő					
28	Polírozott	ZF50	0,25	Megfelelő					

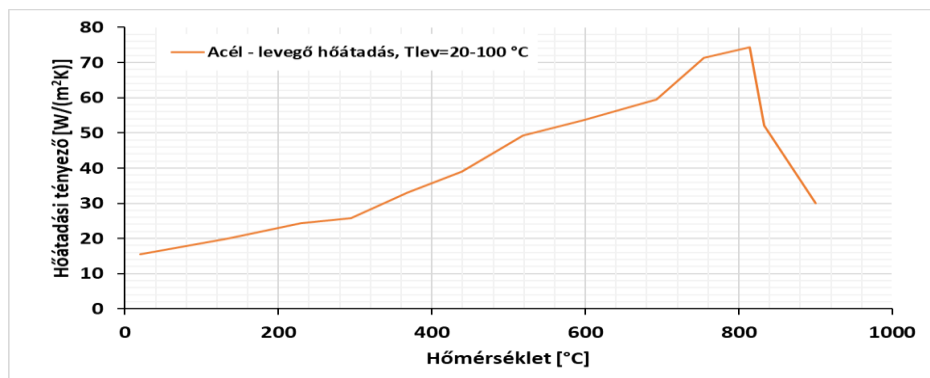
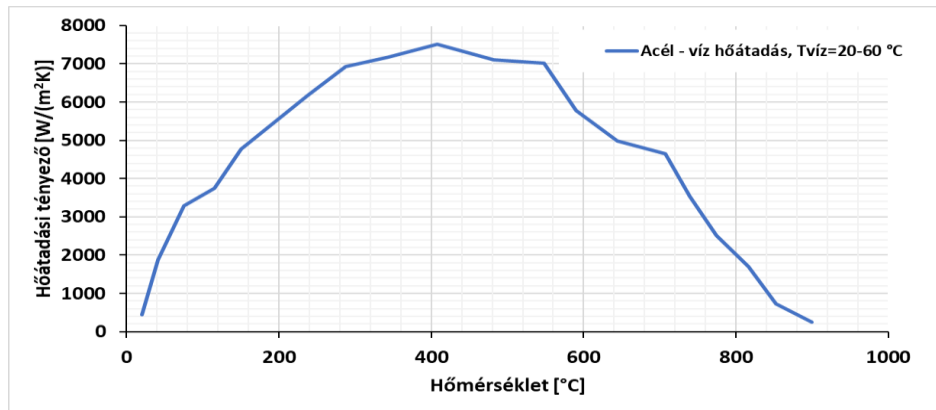
## 2. Melléklet A 37CrS4 ötvözet hőmérsékletfüggő paramétere: rugalmassági modulusz, fajlagos hőkapacitás, hőtágulási tényező, hővezetési tényező, alakítási szilárdság



## 3. Melléklet Az acél és levegő különböző tényezői

Anyagminőség	Mágneses permeabilitási tényező [Hm <sup>-1</sup> ]	Elektromos permittivitási tényező [Fm <sup>-1</sup> ]	Fajlagos vezetőképesség [Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Levegő	1,25 10 <sup>-6</sup>	8,854 10 <sup>-12</sup>	0,00
Acél	1,25 10 <sup>-6</sup>	1,00	$\sigma(T) = \frac{1}{a + b \cdot T - c \cdot T^2 + d \cdot T^3}$ ahol, $a=4,9659 \times 10^{-7}$ , $b=8,4121 \times 10^{-10}$ , $c=3,7246 \times 10^{-13}$ , $d=6.196 \times 10^{-17}$

## 4. Melléklet Az acél-víz és acél-levegő hőátadási tényezői

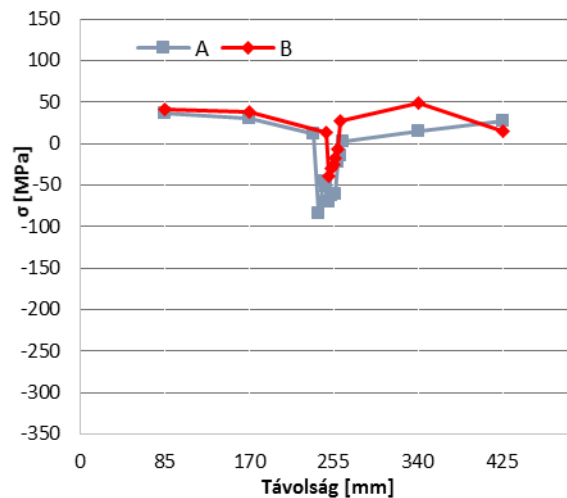
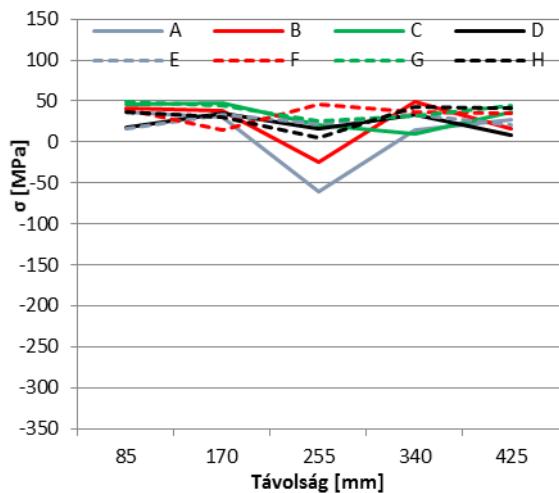


## 5. Melléklet A számításokban edzési hőmérsékletenként figyelembe vett tekercs áramerősségek

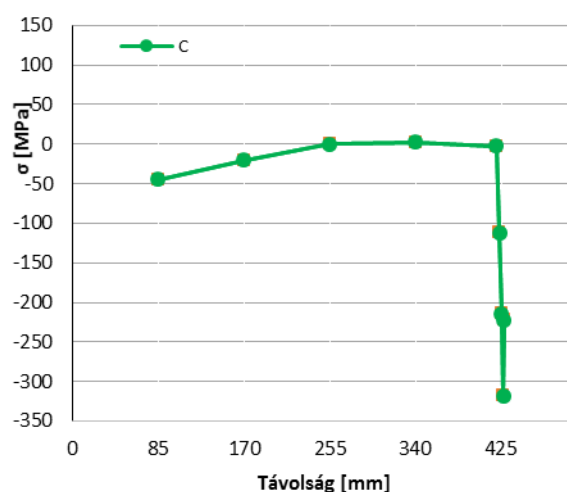
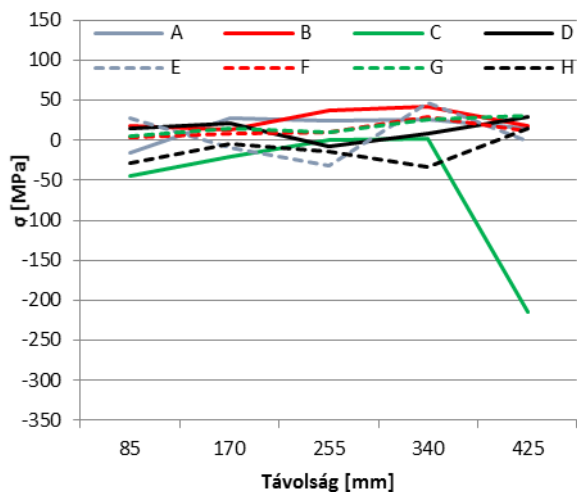
T <sub>Edzési</sub>	Tekercs áram [A]				
	Edzés		Megeresztés		
	Előhevítő szakasz	Hevítő szakasz	Gyors hevítő szakasz	Kalibráló szakasz	Hőntartó szakasz
860°C	12,96	5,44	9,32	5,95	3,495
880°C	13,14	5,44	9,32	5,95	3,495
900°C	13,31	5,44	9,32	5,95	3,495



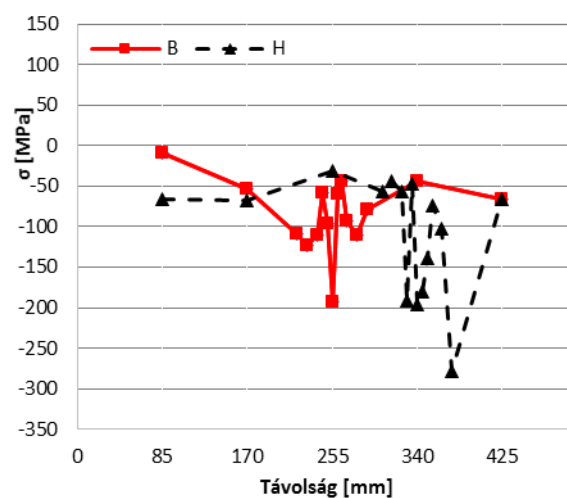
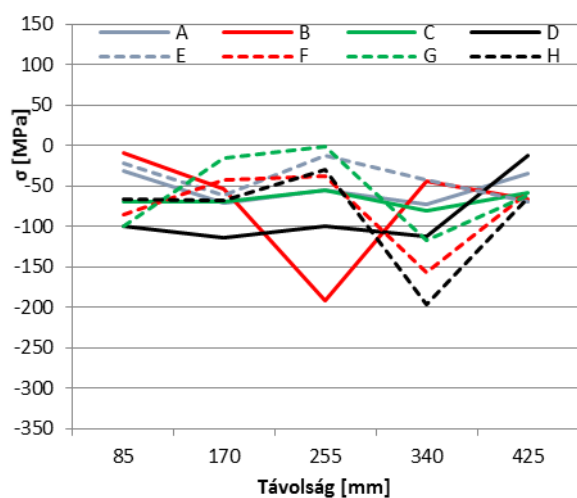
### 6. Melléklet A felületi lokálisan kiugró maradó feszültség értékek környezetében végzett térképező vizsgálatok eredménye



A (3E) feszültségmentesített rúd maradó feszültség értékei a 8 alkotó mentén, valamint az A és B alkotó 255 mm-nél mért kiugró pontok környezetében mért feszültség értékek

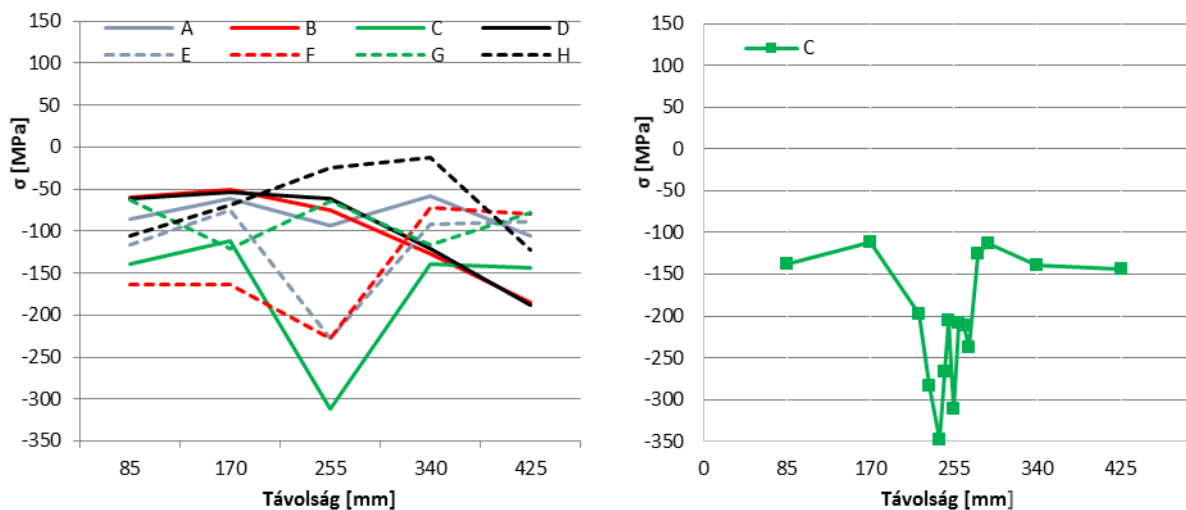


A feszültségmentesített (1E) rúd maradó feszültség értékei a 8 alkotó mentén, valamint a C alkotójának 425 mm-nél lévő kiugró pont környezetében mért feszültség értékek

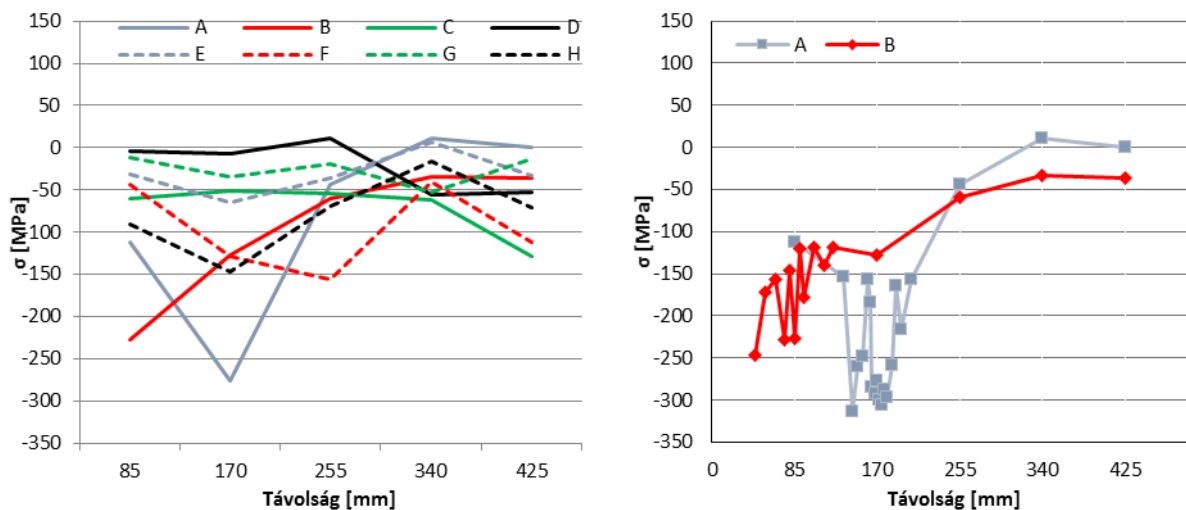


Az utópolírozott (3NP) rúd maradó feszültség értékei a 8 alkotó mentén, valamint a B alkotó 255mm-nél és H alkotó 340 mm-nél lévő pontok környezetében mért feszültség értékek

### 7. Melléklet Az utópolírozott rudak alkotóin mért kiugró pontok környezetében mért feszültség értékek

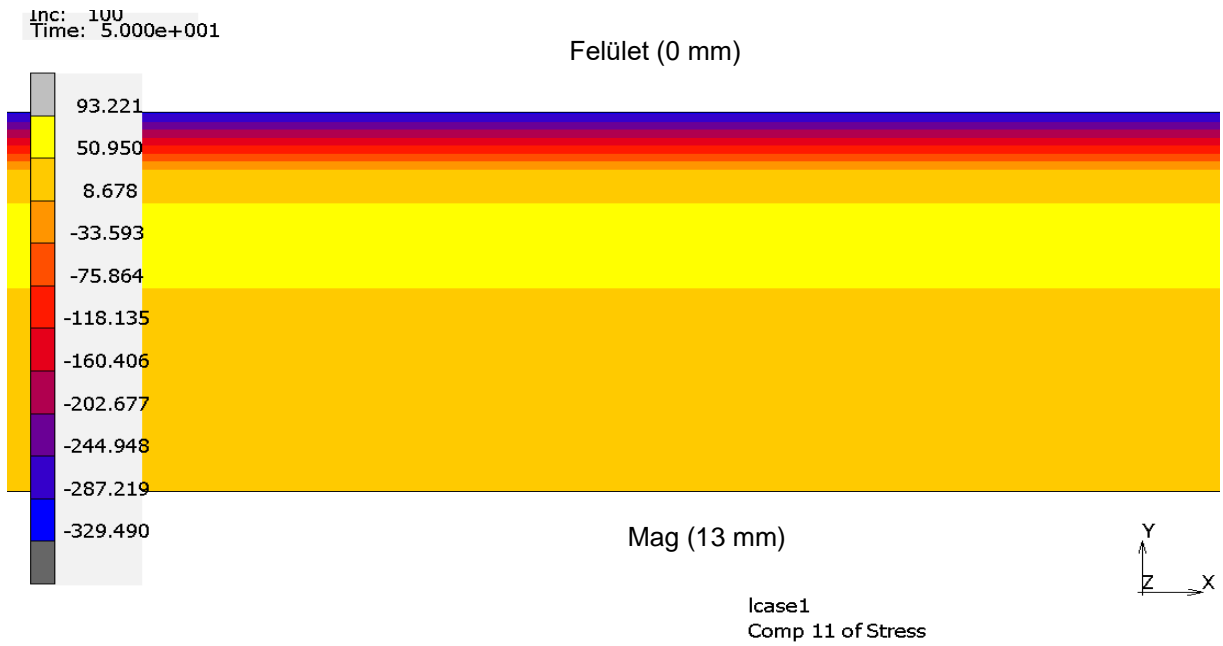


Az utópolírozott (6NP) rúd maradó feszültség értékei a 8 alkotó mentén, valamint a C alkotó 255mm-nél lévő kiugró pont környezetében mért feszültség értékek



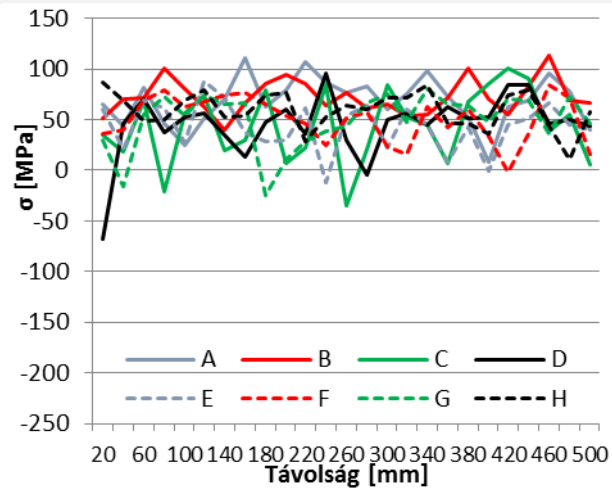
Az utópolírozott (1NP) rúd maradó feszültség értékei a 8 alkotó mentén, valamint az A alkotó 170 mm-nél és a B alkotót 85 mm-nél lévő pontok környezetében mért feszültség értékek

## 8. Melléklet A vízzel hűtött rúdban sugár irányban kialakult feszültség eloszlás



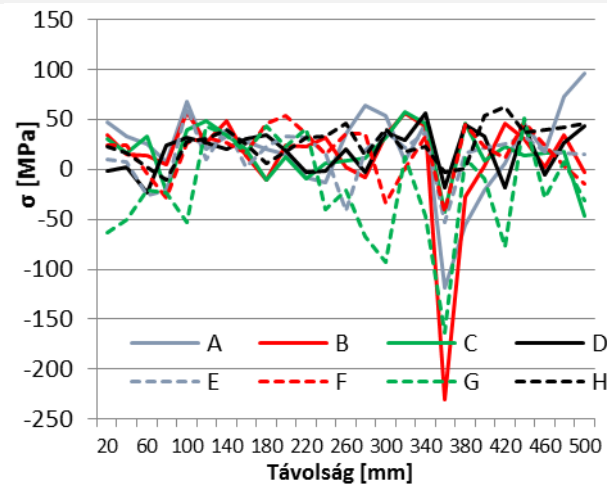
## 9. Melléklet A polirozott 2. rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

PG2 - 860 °C

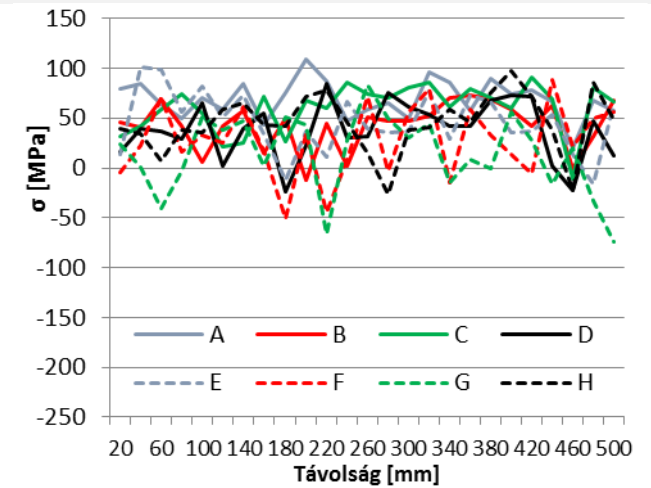


GG2 - 880 °C

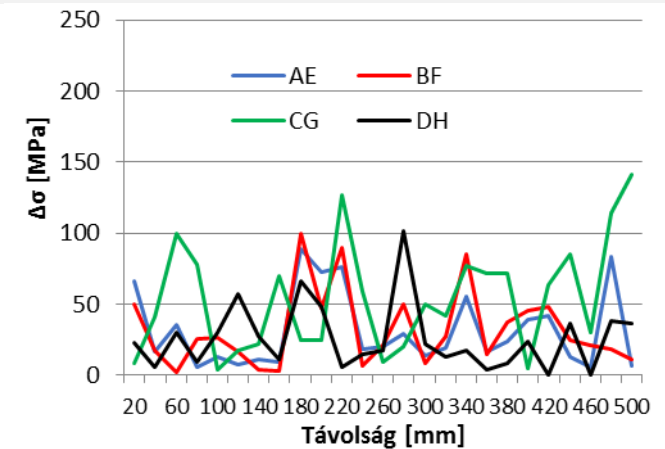
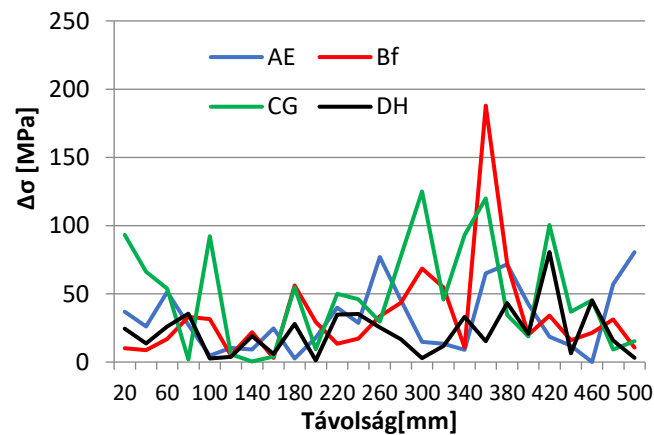
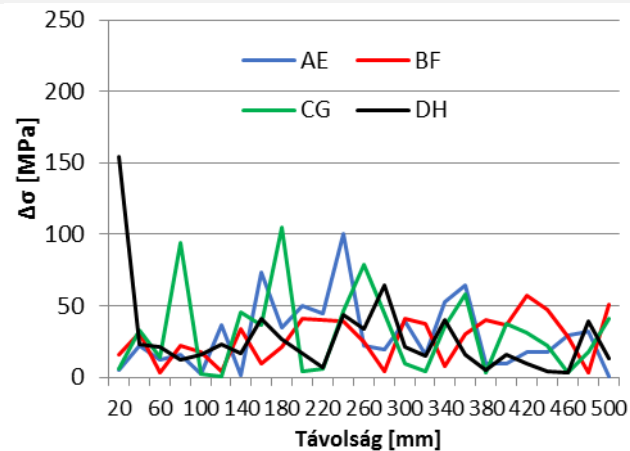
Maradó feszültség



SG2 - 900 °C

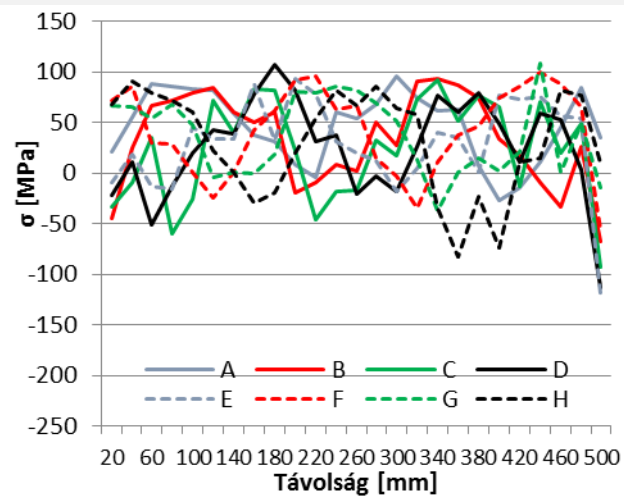


Feszültség aszimmetria



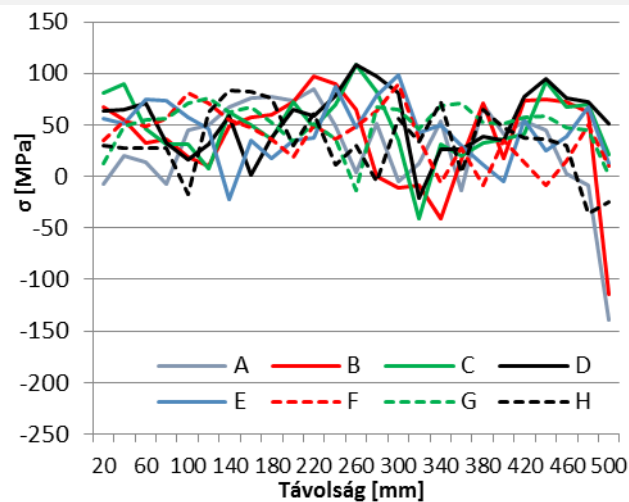
## 10. Melléklet Az intenzíven polírozott 2. rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

PNG2 - 860 °C

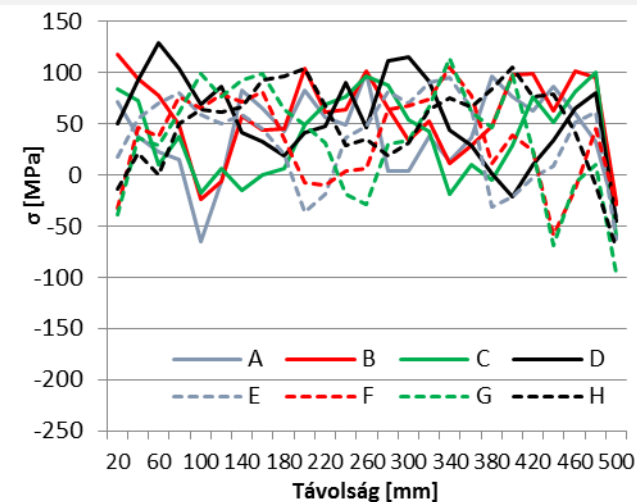


GNG2 - 880 °C

Maradó feszültség



SNG2 - 900 °C



Feszültség aszimmetria

