

Miskolci Egyetem
Műszaki anyagtudományi Kar
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola



Fogasléc előgyártmány előállításának maradó feszültség vonatkozásai

Tézisfüzet

Majtényi József

okleveles kohómérnök

Tudományos vezetők:

Prof. Dr.Mertinger Valéria, egyetemi tanár

Dr.Benke Márton, egyetemi docens

Miskolc

2020

I. A kutatási feladat rövid összefoglalása

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), (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. Célom 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, nyomó feszültségek) 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. Célom 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.

A 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). 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 elegendőek, 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?**

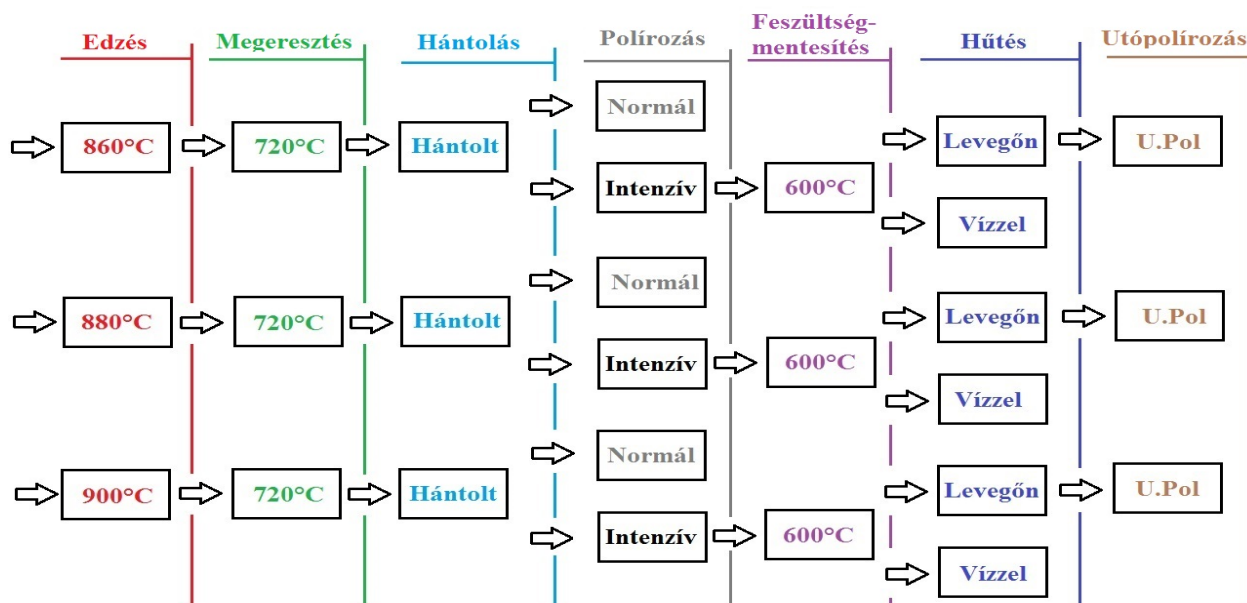
II. Az elvégzett vizsgálatok rövid leírása

A felhasznált acél típusa 37CrS4 a DIN EN 10083-3:2007 szabvány szerint. 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.

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 (különböző edzési hőmérséklet, intenzív polírozás, feszültségmentesítést követő vízhűtés) természetesen ipari körülmények között.

A vizsgálatokhoz gyártott és felhasznált rudak állapotát, az **1. ábra** foglalja össze, a rudak elnevezését és az elvégzett vizsgálatokat az **1. táblázat** mutatja.



1. ábra A vizsgálatokhoz gyártott és felhasznált rudak állapota

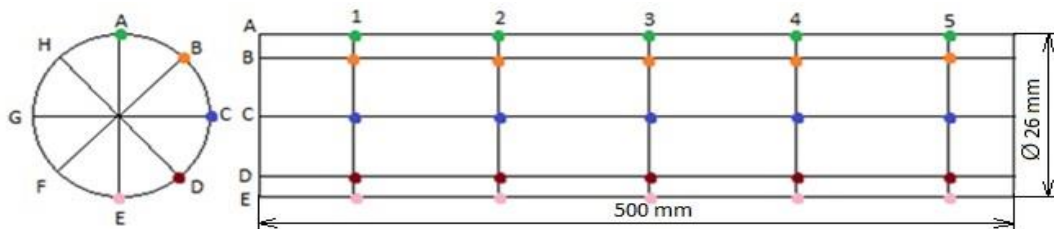
1. táblázat A kutatási terv alapján gyártott próbák jelölése, állapota, valamint a próbákon elvégzett vizsgálatok és elnevezéseik: Ma, - maradék ausztenit; XRD, - röntgendiffrakció; SEM, - pásztázó elektronmikroszkóp; VE, - szimuláció (végelelemes módszer)

Jelölés	T edzési [°C]	Állapot és „elnevezés”	Maró próba	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	Feszültség mentesítés után „Vízben 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						

A különböző gyártási lépések után vett próbákon 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 **felületi, és kémiai maratás alkalmazásával mélységi röntgendiffrakciós és marópróbás módszer** alkalmaztam. Elsőként mindig a roncsolásmentes röntgendiffrakciós módszerrel, majd ezt követően ugyanazon mintán a marópróbás módszerrel végeztem méréseket. Az okok felderítésére röntgendiffrakciós **maradék ausztenit** tartalom mérést, **szövetszerkezeti vizsgálatot** és **keményiségmérést** alkalmaztam. A rúd hőkezelési folyamatának **számítógépi szimulációját** az MSC.Marc végelemes 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.

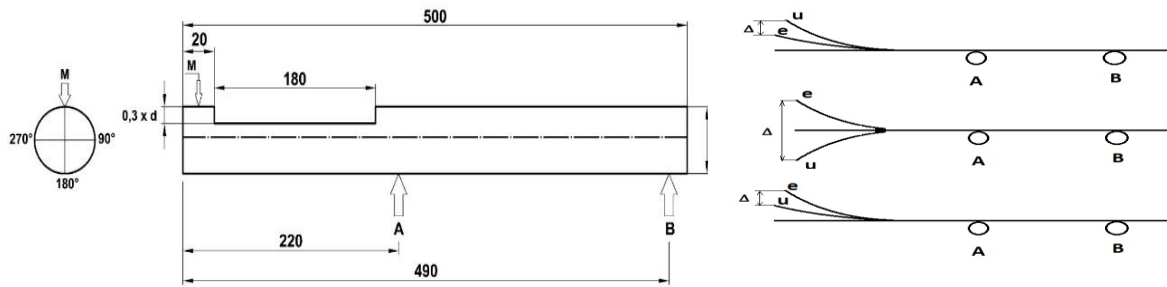
Az 1. ábra szerinti gyártási lépések után kivett próbadarabok **röntgendiffrakciós vizsgálata** a következő módon történt: Minden gyártási folyamat után, az edzési hőmérsékletenként kivett próbákat nyolc alkotóra felosztva – melyeket az ABC betűivel neveztem el – alkotónként egymástól azonos távolságra lévő 5 illetve néhány esetben, 25 pontban végeztem el a méréseket (2. ábra).



2. 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. A feszültség mérés során nyert adatokból vizsgáltam a félértékszélesség változását és számoltam feszültség aszimmetria értéket is.

A mechanikus deformáción alapuló **marópróbás módszerrel** kapcsolatosan 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 Δ elhajlásra vonatkozó toleranciát. Az, hogy a termék elfogadható –e 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 Δ elhajlás alapján ad információt, korábban nem alkalmazták. A mérés lényege, hogy a 3. ábra szerinti rajz alapján a mérendő próbának az M pontban egy ütőmérő 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° -ban körbeforgatva megkeressük a rúd maximális elhajlási pontját, aminek a helyét X-szel jelöljük.



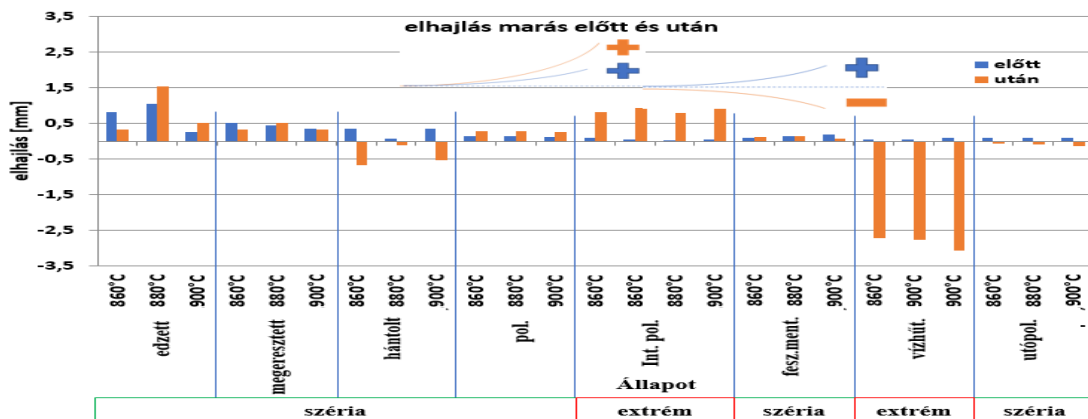
3. ábra A marópróba paraméterei és a Δ elhajlás értelmezése: A,B görgőalátámasztási helyek, M mérőóra helye, e - a rúd állapota kimarózás előtt, u - a rúd pozíciója kimarózás után

Ezt követően a próbát a rajzon szereplő előírásnak megfelelő paraméterekkel kimarózzuk, innen kapta a „Marópróba” elnevezést. 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 marás előtti és marás utáni mért elhajlás értéket előjelesen kivonjuk egymásból, és az abszolút értékét vesszük, így kapjuk a Δ elhajlást. Az elhajlás értelmezését a 3. ábra szemlélteti. Ebből kifolyólag a marás előtti elhajlás értéke mindig pozitív, a marás utáni elhajlás lehet pozitív és negatív, a Δ elhajlás pedig szintén mindig pozitív előjelű. A próbadarabban lévő maradó feszültség állapotra a Δ elhajlás érték utal. Az üzemi tapasztalat szerint a Δ elhajlás határértékének alkatrésztől, állapottól és felhasználástól függő értéket határoztunk meg, jellemzően a 0,3-0,8 mm tartományban

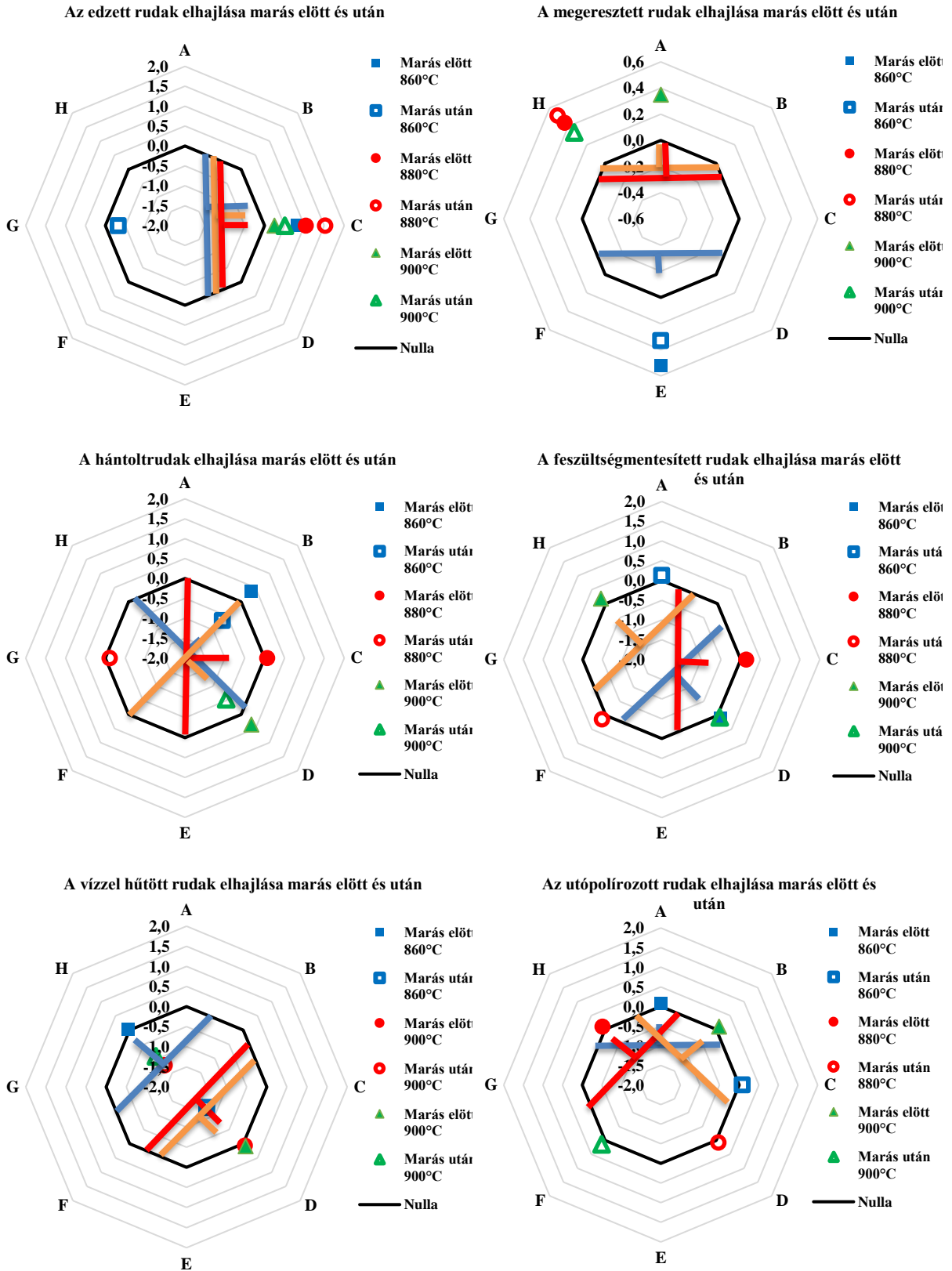
III. Kutatási eredmények rövid összefoglalása

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 Δ elhajlás értékeket az 1. T-táblázat foglalja össze. Az állapotok szerinti elhajlását marás előtt és után a 4. ábra mutatja. A változást a rúd geometriájához rögzítve rózsadiagramok formájában (5. ábra) is bemutatom.



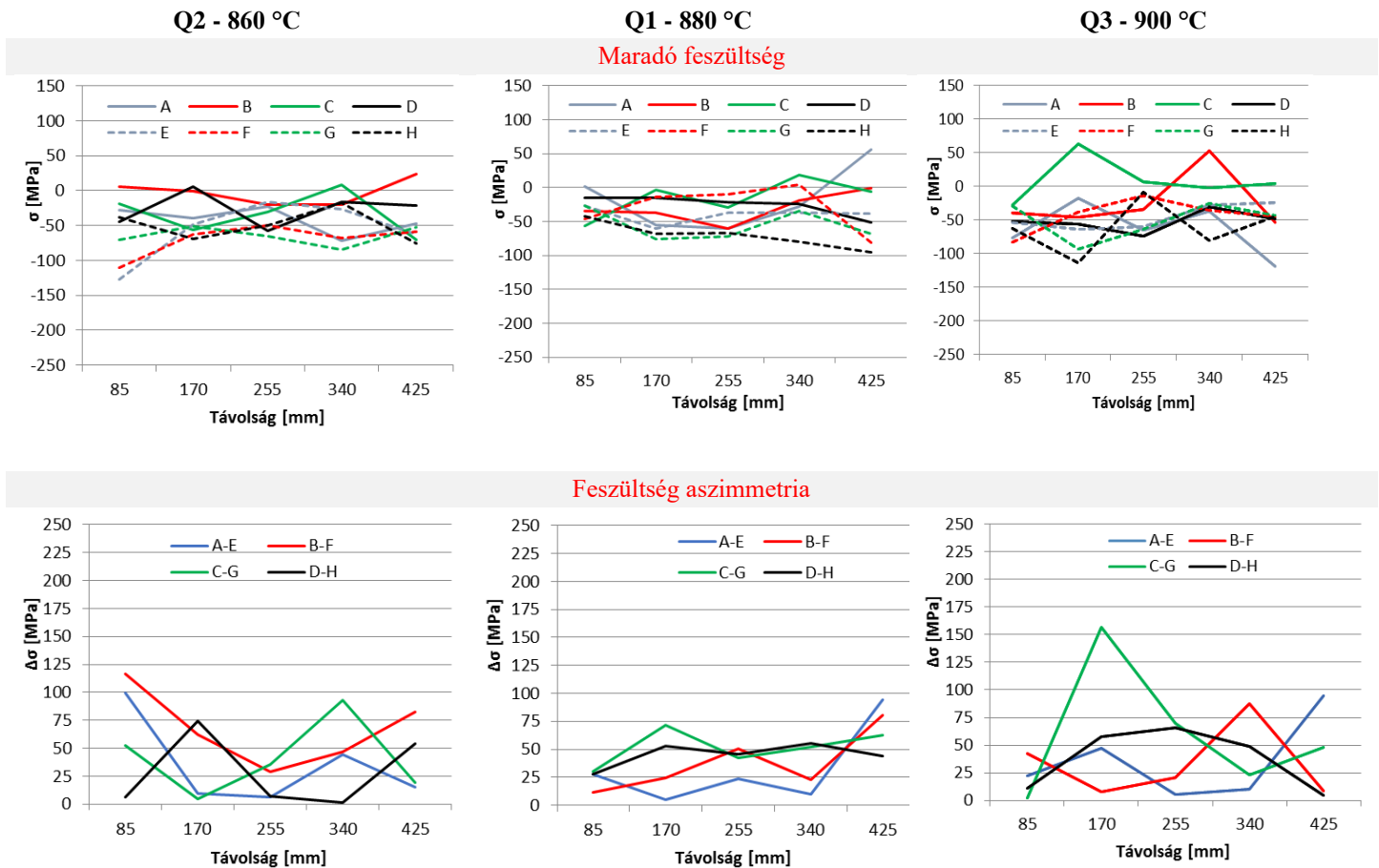
4. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért deformáció értékei



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

Felületi maradó feszültség, feszültség aszimmetria és félértékszélesség értékei

A különböző edzési hőmérsékleten edzett rudak, felületi alkotó menti feszültség eloszlását a 6. ábra mutatja. Az ábrákon feltüntettem a felületi feszültség aszimmetria értékeit is.



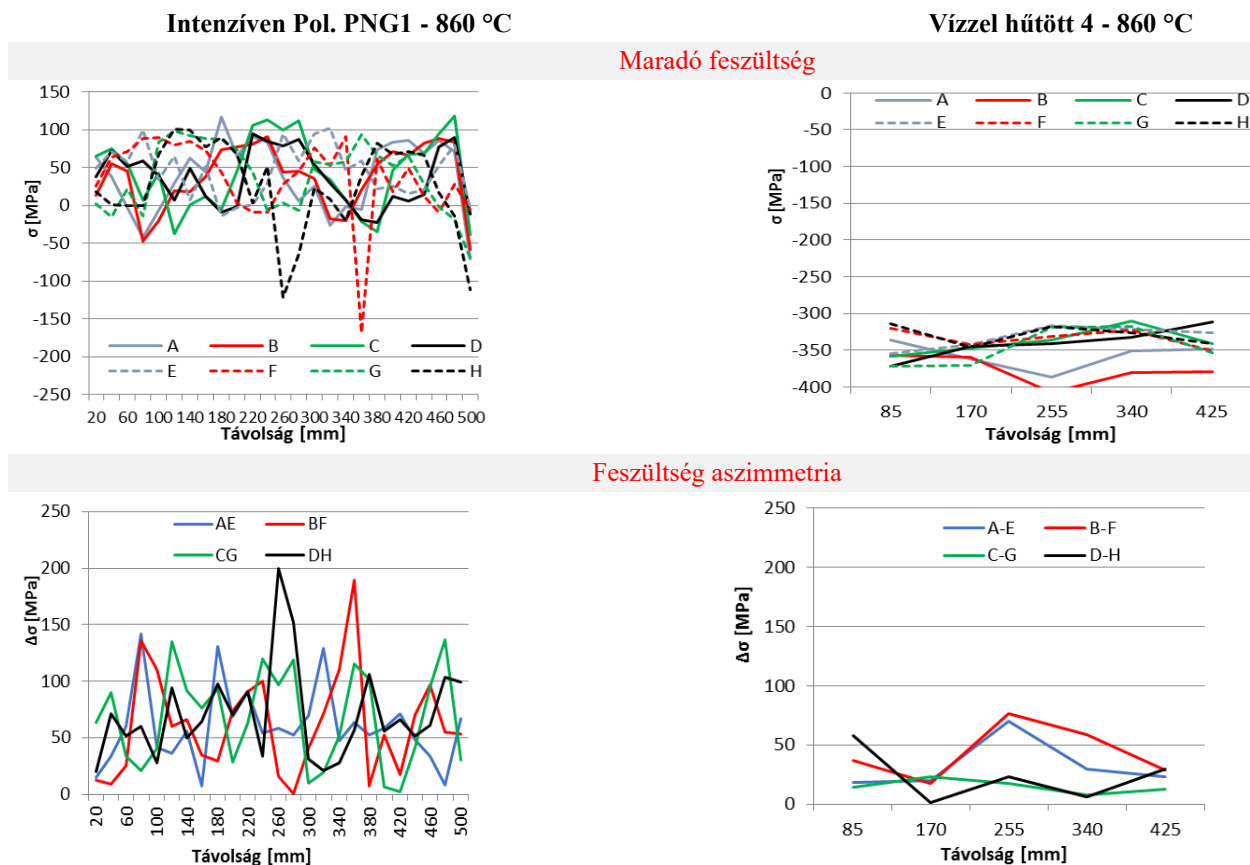
6. ábra Az edzett rudak maradó feszültség és feszültség aszimmetria diagramjai

Az edzési hőmérséklet a 860°C – 900°C tartományban történő változtatása **nem okoz érdemi különbséget** a kialakult felületi maradó feszültség jellegére ezért ebben az összefoglalásban a 860°C-on edzett rudak eredményeit szemléltetem.

A különböző állapotú rudak felületi alkotó menti feszültség és feszültség aszimmetria eloszlását a 7. ábra sorozat mutatja. A vizsgálatokat gyártástechnológiai sorrendben végeztem el és az eredményeket is ilyen sorrendben mutatom be. A szélsőséges paraméterekkel gyártott rudak vizsgálati eredményeit a 8. ábra mutatja. 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.



7. ábra A különböző állapotú rudak felületi alkotó menti feszültség eloszlása (széria gyártás)



8. ábra A szélsőséges paraméterekkel gyártott rudak felületi alkotó menti feszültség eloszlása

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.**

Maradék ausztenit vizsgálat eredménye

A **maradék ausztenit vizsgálat** arra irányult, hogy mi a feszültség gradiens illetve feszültség aszimmetria kialakulásának mi az oka. Erre vonatkozóan alapvetően kétféle ok lehet, a nem egyenletes vagy túlságosan nagy termikus gradiens, illetve ennek következményeként a nem egyenletes fázisátalakulás. 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**.

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. A sugár szerinti átlagos keménységek a 270 – 310 HV

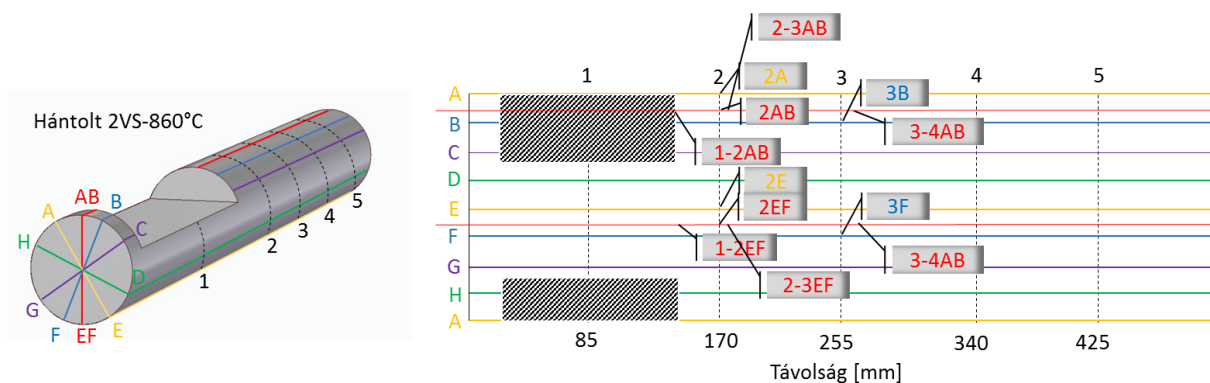
0,5 közé esnek. Azonban **megállapítható, hogy a keménység adatok és a maradék ausztenit mennyisége nem korreál konzekvensen.**

Szövetvizsgálat eredmények

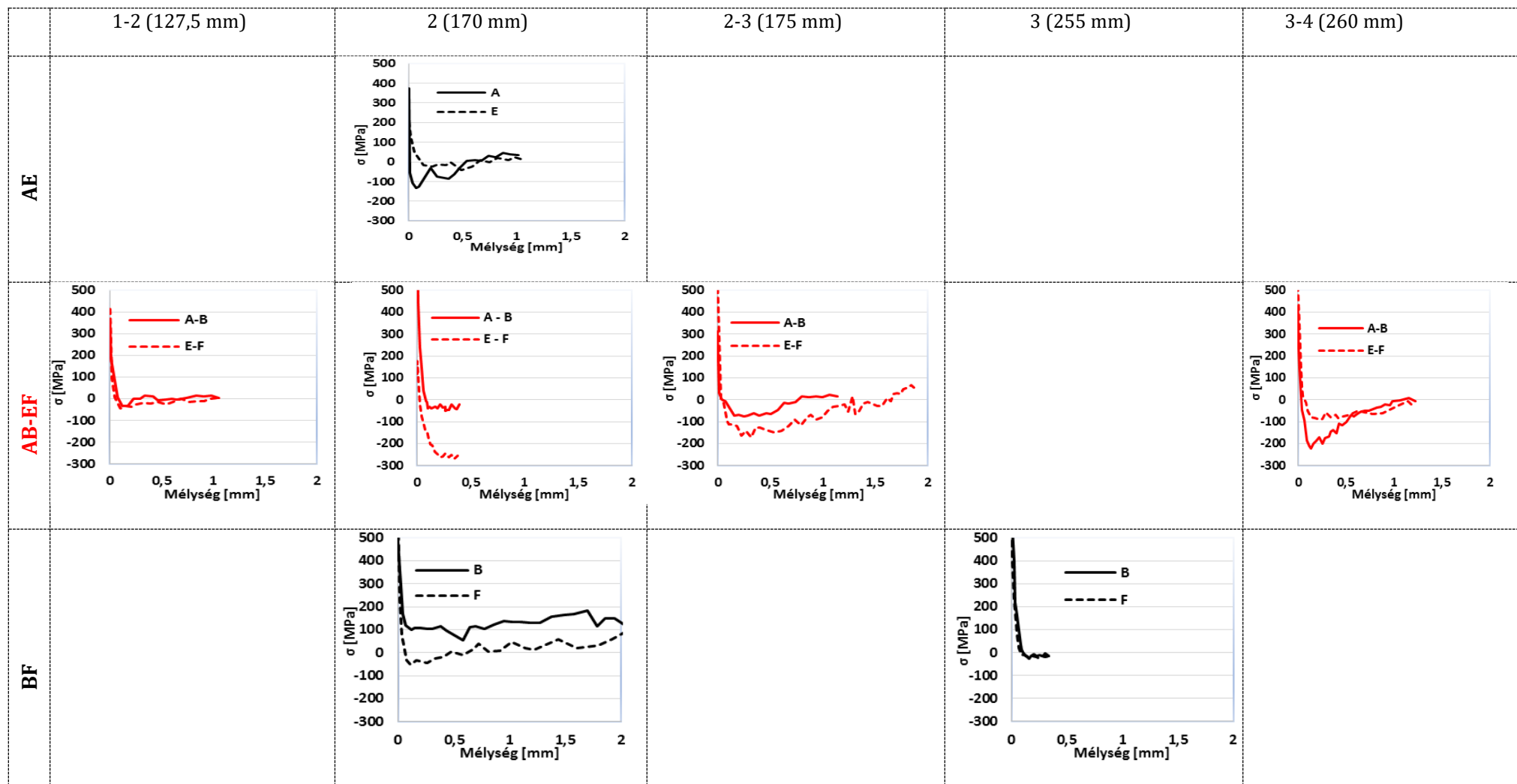
Az elektronmikroszkópos szövetvizsgálat nagyon finom martenzites szövetet, és a magas megeresztési hőmérsékletnek tulajdonítható egyenletes eloszlású finom karbidokat mutatott ki.

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 hossztengety mentén a kiugró pontok kivételével nem jelentős. A radiális feszültség gradiens meghatározására mélységi feszültség vizsgálatokat végeztem. A vizsgálati pontok kiválasztásánál szempont volt, hogy az elhajlás síkjában és ettől eltérő helyeken is legyen mérési pont, valamint a hossztengety mentén a kimarózáshoz közel, és ettől távolodva is. Példaként a 2VS rúd eredményeit mutatom be. Az egyes mérési pontokat a rúd kiterített felületi palástján ábrázoltam (9. ábra). Az elhajlás síkját pirossal jelöltem. A hántolt rúd mélységi feszültség mérési adatai alapján látható, hogy a felületen nagy húzófeszültségek ébredtek, melyek maximum 100 μm mélységig vannak jelen (10. ábra).



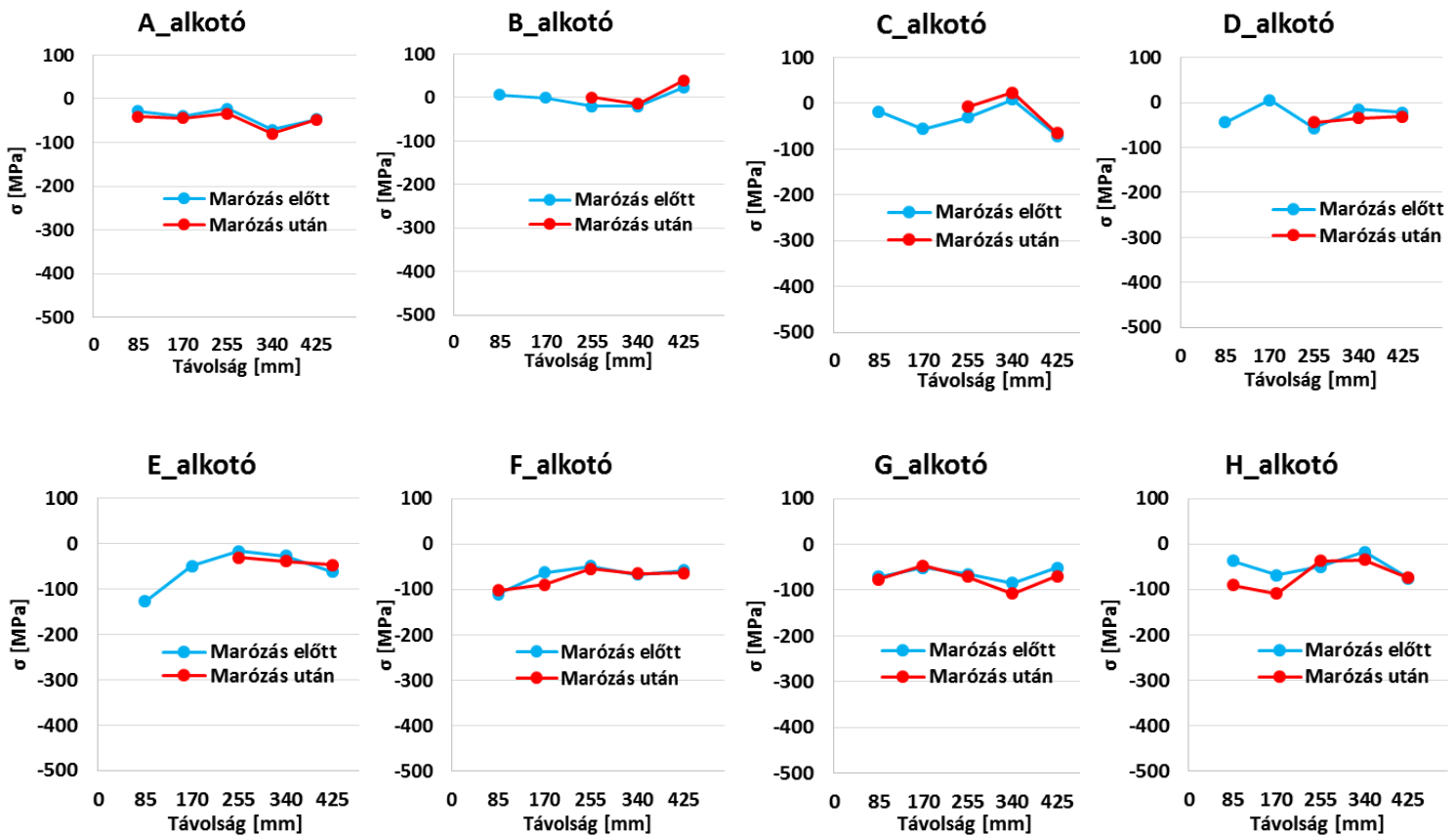
9. ábra A hántolt (2VS – 860°C) rúdon felvett alkotók és a kiterített paláston a mérési pontok. Az elhajlás síkját (AB-EF) a piros vonal jelzi



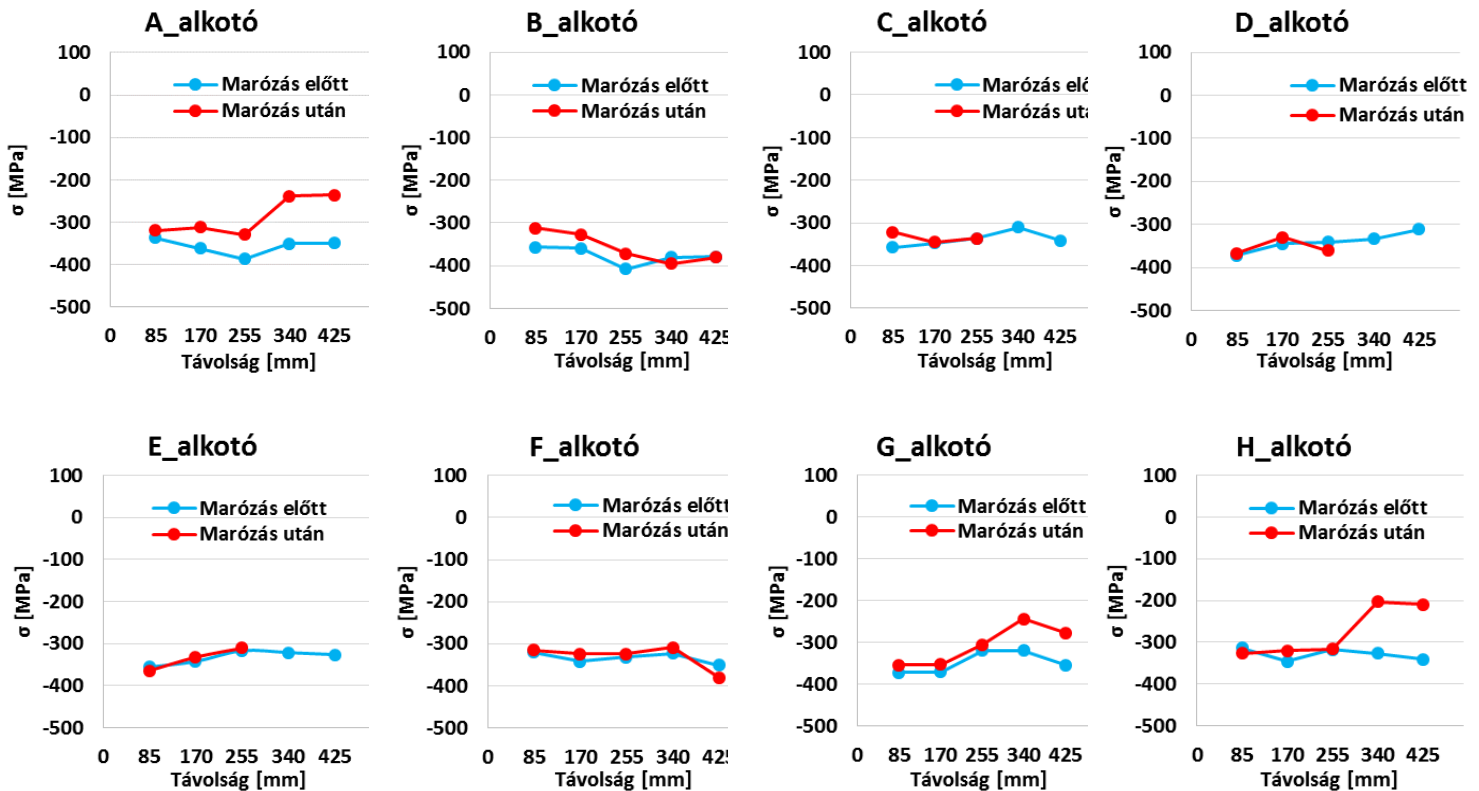
10. ábra A hántolt (2VS) rúd elhajlás síkjában (piros), valamint a mellette lévő síkokban (fekete) különböző hosszirány menti, szemben lévő pontokban mért mélységi feszültség eloszlása

Kimarózás hatásának tisztázása

A (2VS) rúd esetében a **kimarózás közvetlen környezetében a felület alatti feszültség nulla közeli** állapotban volt. 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) (11. ábra) és a vízzel hűtött (4-860°C) rúd (12. ábra) esetében elvégeztem a felületi maradó feszültség vizsgálatot kimarás előtt és után is, mind a 8 alkotó mind az 5 pontjában. **A 4 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 (255 – 425 mm-es pontok, AGH alkotók) jelentkezik. Mivel ennél a rúdnál az elhajlás a kimarás helyével ellentétes oldal fele történt ez az eredmény első pillanatban meglepő lehet. **Azonban 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. 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.



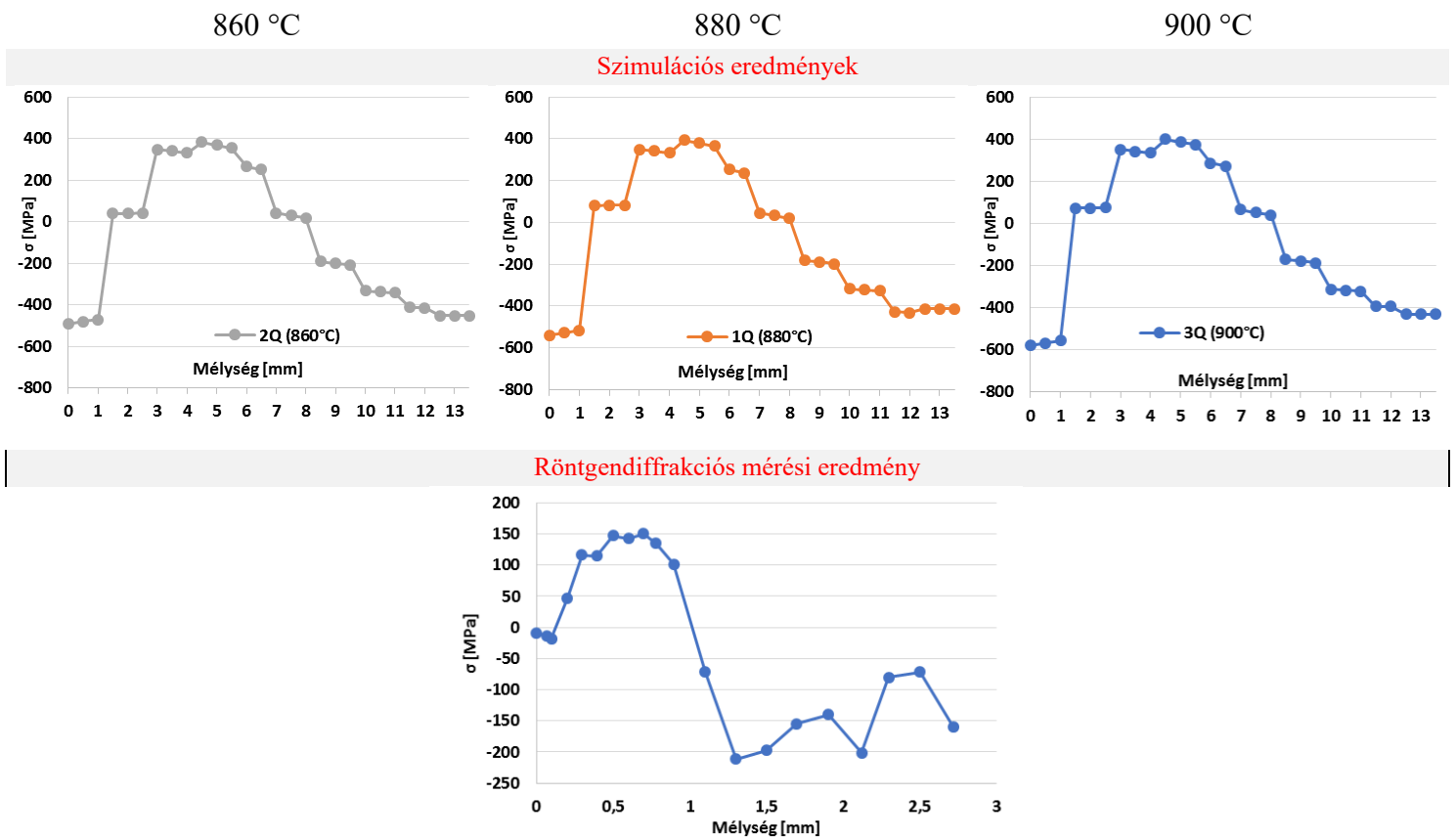
11. ábra Az edzett (2Q) rúd maradó feszültség értékei a nyolc alkotó mentén marás előtt és marás után (Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer bal szélén történt)



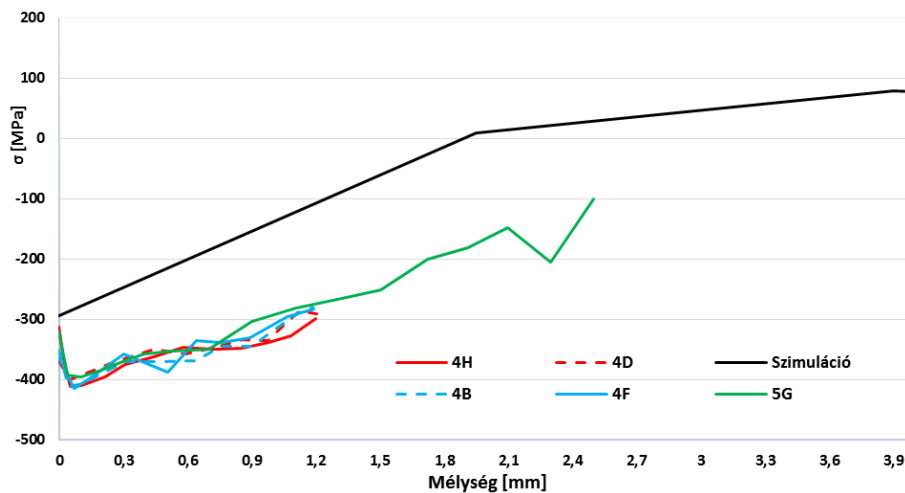
12. ábra A vízzel hűtött (4) rúd maradó feszültség értékei a nyolc alkotó mentén marás előtt és marás után (Ebben az esetben a kimarás a rúd feszültség méréshez rögzített koordináta rendszer jobb szélén történt)

Végeselemes szimulációval kapott eredmények

Mindhárom edzési esetet (860 °C; 880 °C és 900 °C), megvizsgáltam végeselemes analízissel (13. 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 vízhűtést követő feszültségállapot szimulációs eredményei jobb egyezést mutatnak a mérési eredményekkel (14. ábra). 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.



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



14. 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 mélyégi feszültség eloszlás

IV. Új tudományos eredmények

Tézisek

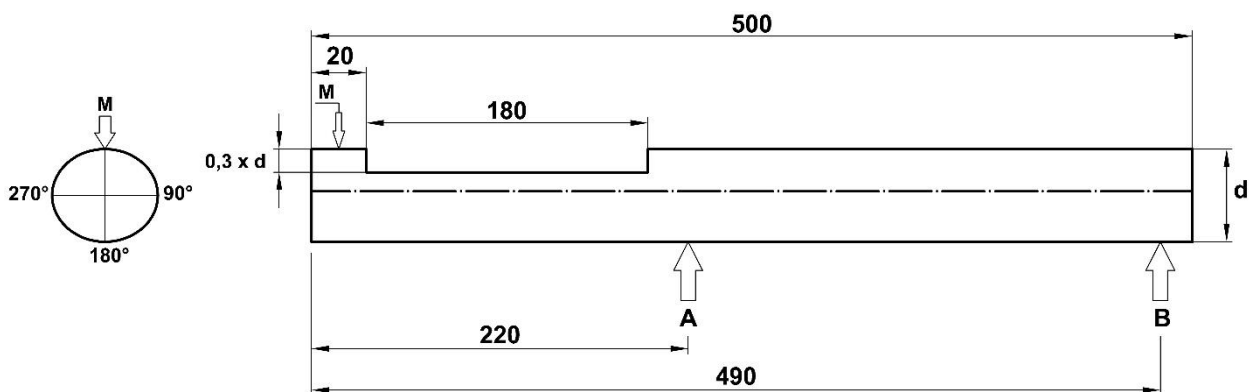
37CrS4 típusú acélból készült, körkeresztmetszetű rúd fogasléc előgyártmány fogazásig, ipari környezetben történő előállítása során **monitoroztam a termék maradó feszültség állapotának változását**, az előgyártmány tovább feldolgozhatóságának érdekében. A monitorozást **technológiai lépéseként történő 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 Δ elhajlás értékét. Az alakdeformációs hajlamról a Δ elhajlás értéke ad információt. Adott célú felhasználás során az elfogadható határértéket kísérletileg kell meghatározni.



1. T-ábra Marópróba geometriai paraméterei 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 Δ 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 Δ 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 Δ elhajlás értéke a 0,7 mm-t nem haladja meg, a maradó feszültség okozta méret deformáció, autóiipari 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 normál feszültség 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.

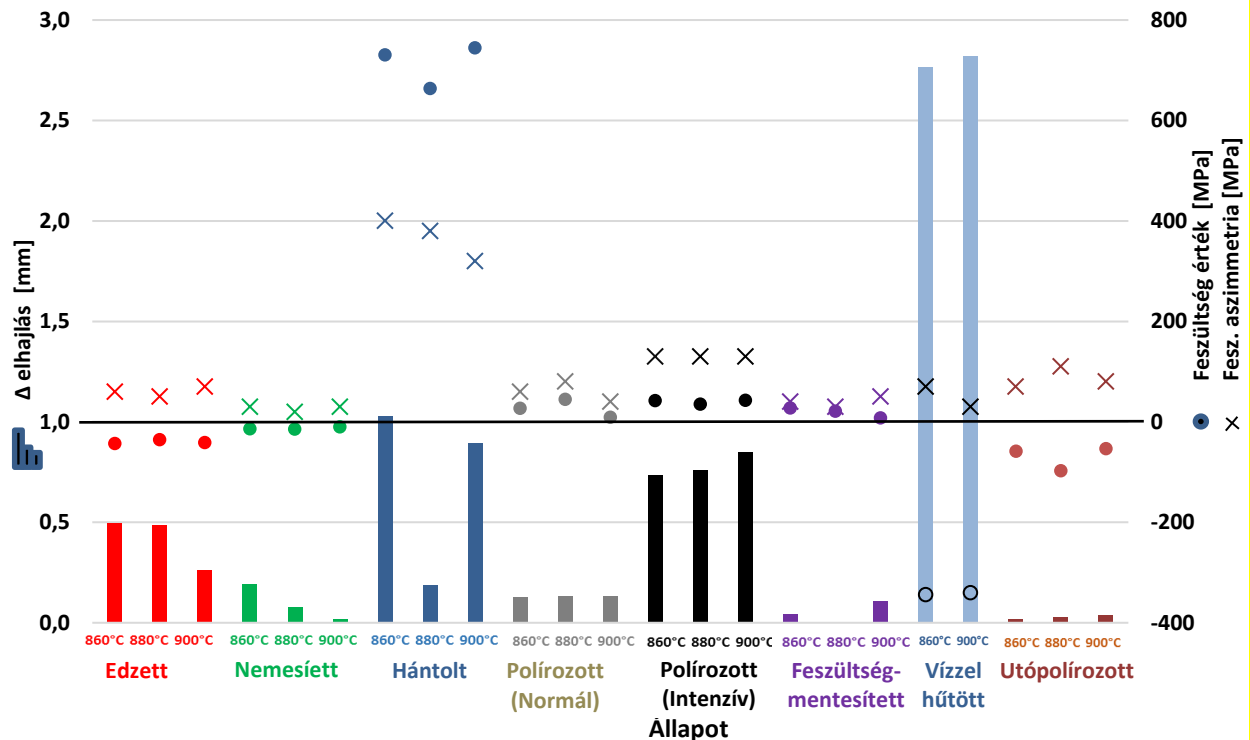
4. A deformáció hajlamának prognosztizálása térfogati röntgendiffrakciós maradó feszültség adatok alapján

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 bekövetkezhet, 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]	Δ 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.

V. 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 autóiipari beszállító és gyártó cég érdeklődik az iránt, hogy a központ nélküli röntgendiffraktorral történő maradó feszültség mérést beépítse a saját minőségbiztosítási rendszerébe. Számukra a kutatómunkában ismertetett 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 Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet által oktatott tantárgyakban közvetlenül hasznosíthatók.

VI. 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.

VII. A témában megjelent saját publikációk

- [1] Majtényi, József ; Kárpáti, Viktor ; Benke, Márton ; Mertinger, Valéria - Maradó feszültség meghatározása marópróbás és röntgendiffrakciós módszerekkel járműipari kormányfogasléc félkésztermék gyártási folyamatában - BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 150 : 5 pp. 35-41. , 7 p. (2017).
- [2] 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. , 6 p. (2017)
- [3] 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. , 9 p. (2017)
- [4] 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) pp. 174-179. , 6 p..
- [5] 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 , 8 p.

VIII. Hivatkozások

- Withers, P. (2007). Residual stress and its role in failure. *Reports on progress in physics*, 2211–2264 .
- Jang, D. W. (1996). Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. *Wear*, 168-173.
- Kristoffersen, H. V. (2001). Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses. *Materials and Design*, 637-644.
- Outeiro, J. D. (2002). Machining residual stresses in AISi 316L steel their correlation with the cutting parameters. *Machining Science and Technology*, 251–270.
- 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.
- 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.
- 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>