

Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

EFOP-3.6.1-16-2016-00011 projekt:

**Feszültség kimutatására alkalmas ipari körülmények között is
alkalmazható mérési módszer kidolgozása hengeres acél félkész termékek
esetére**

Majtényi József

okleveles anyagmérnök

Tudományos vezetők:

Dr.Mertinger Valéria

Dr.Benke Márton

Miskolc

2020

1. Bevezetés

A modern jármű-, autó- és gépgyártásban a fél késztermékek 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 feldolgozáskor 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 gép gyártók saját előírásaik szerint megkövetelnek, anyageltávolítás (marózás) hatására történő deformációs vizsgálatot. Ebben az esetben kizárólag a kész rúd marózás utáni elhajlását nézik.

Az alapgondolatom az, 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 a projektsorán 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.

2. Célkitűzés

Célom a projekt keretén belül a 2. Korszerű Anyagok és Technológiák Kiválósági Központ 2.1. Különleges Anyagok Tudományos Műhelyében bekapcsolódás a gyártási feszültségeknek a technológiai folyamatra gyakorolt hatásának kimutatása és a feszültség kimutatására alkalmas ipari körülmények között is alkalmazható mérési módszer kidolgozása hengeres acél félkésztermékek esetére. További célom volt, hogy kimutassam melyek a kritikus gyártási lépések a tovább feldolgozás 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.

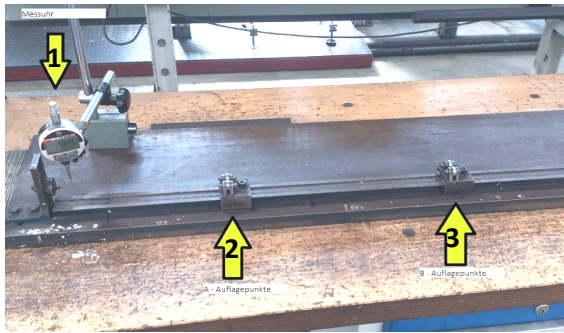
3. Marópróbás módszer

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 ütését, 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 ütés értékét meghatározni, hanem a kimarás előtti és az azt követő ütések különbsége a döntő a termék feszültség-eloszlás állapota szempontjából. Ezért a kutatáshoz kidolgoztam ezen módszernek a részleteit, a próbatest paramétereit, a Δ ütésre 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 ütés érték jellemzően terméktől függően 0,6-1 mm volt. A marópróbának ilyen fajta minősítését, mely a Δ ütés alapján ad információt, korábban nem alkalmazták. Azonban, az egyik neves német autógyártónak felkeltette az érdeklődését 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. Azt, hogy a rúd melyik oldaláról legyen a kimunkálás elvégezve, a röntgendiffrakciós mérési eredmények alapján határoztam meg oly módon, hogy ahol nagyobb szórás volt tapasztalható a feszültség eloszlásban, ott maróztuk ki. A marózás előtti és utáni ütés értékeket rózsadiagramokon szemléltetem. A rudak ütésének mérése szolgáló tartórendszert és mérőórát a **1. ábra** mutatja. A sínen csúsztatható tartóörgők lehetővé teszik, hogy a rajzi előírásoknak megfelelően állítsuk be a távolságot.

A mérés lényege, hogy a **2. ábra** szerinti rajz alapján a mérendő próbának az M pontban egy ütémérő óra segítségével megkeressük a legkisebb ütési pontját, amit bejelölünk és a mérőórát ebben a pontban lenullázzunk. Ez lesz a referencia (0) pont. A próbát 360°-ban körbeforgatva megkeressük a rúd maximális ütési pontját, aminek a helyét X-szel jelölünk. A mért értéket táblázatban (**1. táblázat**) rögzítjük. Ezt az állapotot marás előtti állapotnak nevezzük, hiszen itt a próba keresztmetszete még teljes. Ezt követően a próbát a rajzon szereplő előírásnak megfelelő paraméterekkel kimarózzuk, - innét kapta a „Marópróba” elnevezést – úgy, hogy a próbán bejelölt X-maximum ponthoz mutató sugár a marógép asztalára 90°-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 ütését, ebben az esetben úgy, hogy a mérőórát a korábban 0-val jelölt (referencia) pontnál nullázzuk le.



a)

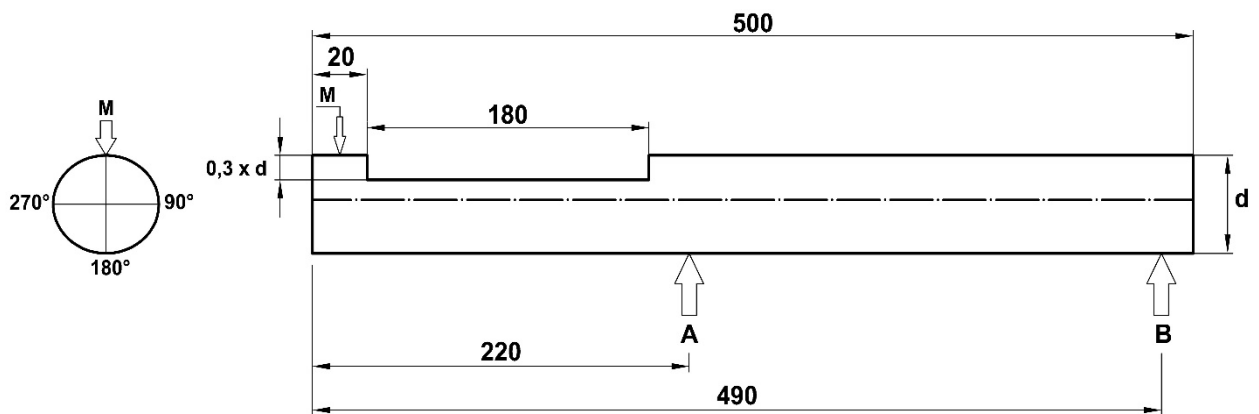


b)



c)

1. ábra A marópróbas módszer a) a vizsgálati rendszer, zöld nyíl: tartógörgők (2,3) és mérőóra (1) b) ütés mérése kimarózás előtt c) és kimarózás után



2. ábra A marópróba paramétere

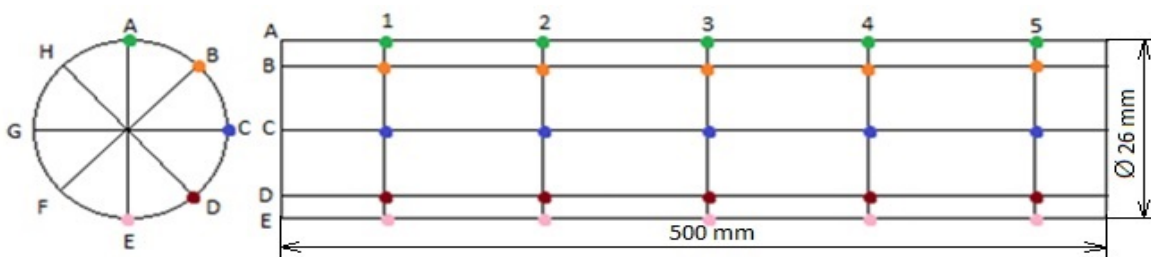
Az így kapott maximális ütés értékét táblázatban rögzítjük. A marás előtti és marás utáni mért ütés értéket, előjelesen kivonjuk egymásból, majd ezt a számot a Δ ütés mezőbe beírjuk. A próbadarabban lévő maradó feszültség állapotra, a Δ ütés érték utal. Az üzemi tapasztalat szerint a Δ ütés határértékének alkatrésztől, állapottól és felhasználástól függő értéket határoztunk meg, jellemzően a 0,3-0,8 mm tartományban.

1. táblázat Példa a marópróbás méréssel meghatározott adatokra

A próba száma	Marás előtti ütés [mm]	Marás utáni ütés [mm]	Δ ütés [mm]
1	0,060	0,145	0,085
2	0,075	-0,195	0,260

4. Röntgendiffrakciós maradó feszültség vizsgálat

A röntgendiffrakciós vizsgálat 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 (3. ábra). A maradó feszültség mérések során a StressTech XStress 3000 G3R központ nélküli röntgendiffraktométert használtam, mely direkt maradó feszültség mérésre lett kifejlesztve A röntgendiffrakciós méréssel az acélrúd feszültség állapotának „feltérképezése” volt a cél. Minden mérési pontban axiális irányú feszültség komponenszt mértem. Ennek oka, hogy a rudak deformációját, az elhajlást 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, de jellemzően nem nagyobb, mint néhány 10 μm .



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

5. Marópróbával meghatározott deformáció értékek

A marózás (alapanyag eltávolítás) hatására bekövetkező elhajlás „ütés” mértéke a mintadarabok térfogati feszültség eloszlását, illetve a feszültség aszimmetriáját jellemzi. Az egyes technológiai lépések (edzés, megeresztés, hántolás, polírozás, feszültségmentesítés, vízűtés, utópolírozás) után mért ütés és Δ ütés értékeket a 2. táblázat foglalja össze. Az állapotok szerinti elhajlást marás előtt és után a 4. ábra, a Δ ütsést pedig a 5. ábra mutatja. A változást a rúd geometriájához rögzítve, rózsadiagramok formájában (6. ábra) is bemutatom. A

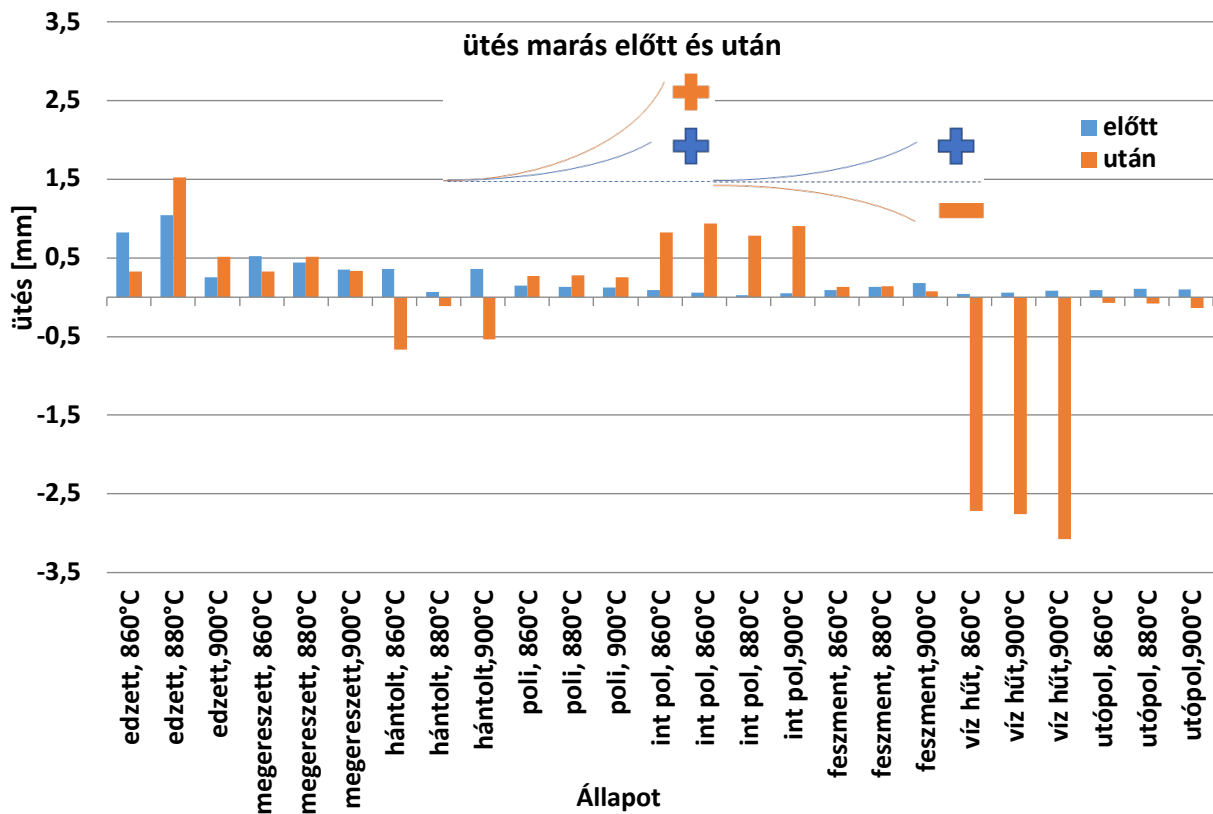
három párhuzamos (különböző edzési hőmérsékletű) minta adatai egymáshoz képest véletlenszerűen jelennek meg, mivel a mérőháló felhelyezése a hengeres darabok mentén teljesen véletlen volt. A vizsgálat jellegéből adódóan a marózás előtti ütés értéke mindig pozitív. A marózást követően ez lehet pozitív 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 4. ábra rajza is mutatja.) A rózsadiagramokon a nulla vonalat erősebben emeltem ki. Feltüntettem a három minta marózás előtti, illetve marózás utáni ütés mértékét és azt is, hogy az ütés 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 ütések értékét is, fontos megjegyezni, hogy a rúd egyenességére utaló kicsi érték (pl. vízzel hűtött, intenzíven polírozott állapot) nem garancia a kimunkálást követő kis elhajlásra. Az ütések 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 ütések 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 Δ ütés 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 Δ ütés 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 Δ ütések értékét a hántolt állapothoz közeli értékre. A feszültségmentesítés eléri hatását, az eddigi legkisebb Δ ütés 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 Δ ütés volt mérhető, de ez az érték nagyobb, mint a levegőhűtésű feszültségmentesítés után, vagyis az utópolírozás is növeli a rudakban lévő feszültséget.

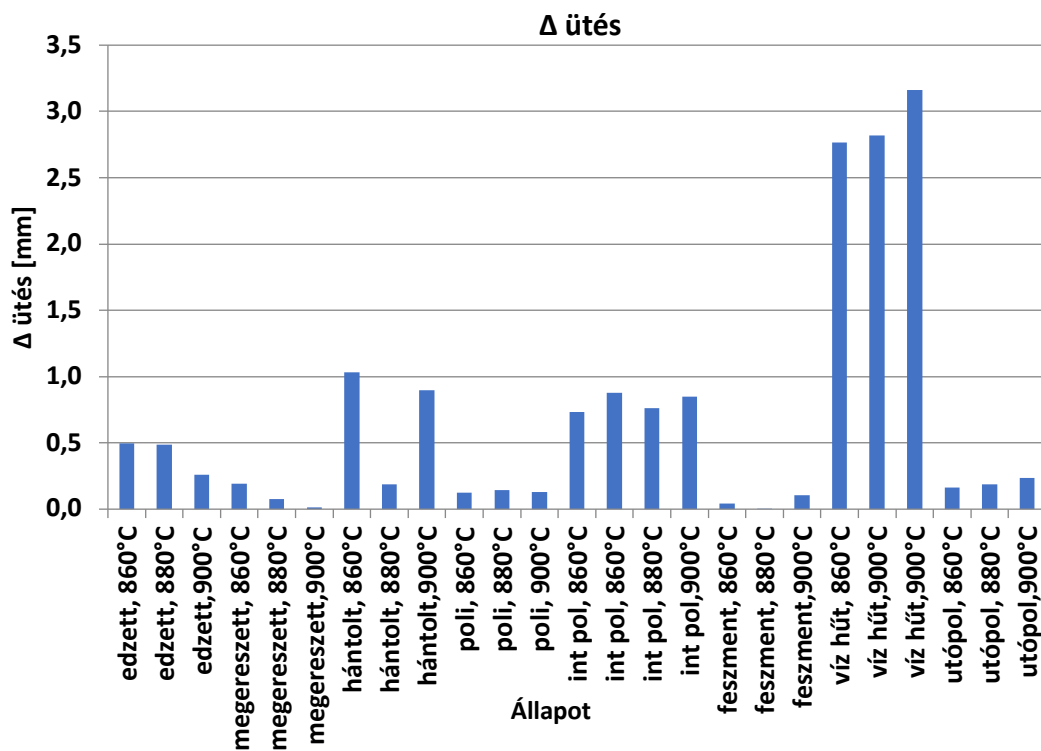
A rózsadiagramok egyértelműen mutatják, hogy a marózást követő elhajlás szinte mindig a marózott sík normálisának irányába történik, vízhűtést követően mindhárom esetben negatív irányba. Ez feltehetően arra utal, hogy a vízzel hűtött rudak feszültségeloszlása eltérő a többi esethez képest.

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

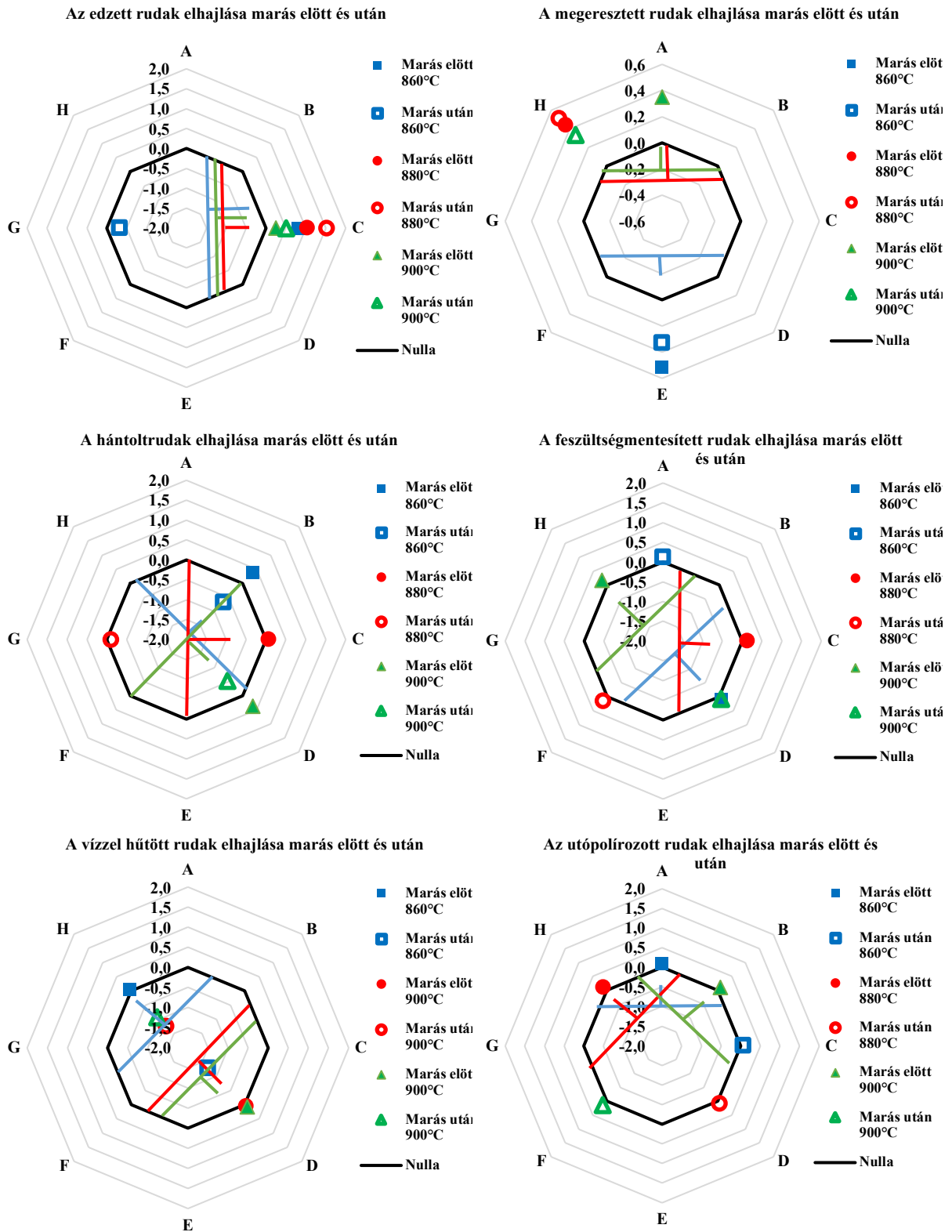
A próba száma	Edzési hőmérséklet	Állapot	Marás előtti ütés [mm]	0-pont [Alkotó]	Marás előtti max pont [alkotó]	Marás utáni ütés [mm]	Marás utáni max pont [alkotó]	Δ ütés [mm]
Q2	860	Edzett	0,825	G	C	0,330	G	0,495
Q1	880		1,040	G	C	1,525	C	0,485
Q3	900		0,250	G	C	0,510	C	0,260
B1	860	Megeresztett	0,520	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	Vizzel 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



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



5. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért Δ ütés értékei



6. ábra A különböző állapotú rudak marózás előtt és marózás után mért Δ ütés [mm] értékei a rudak geometriájához rögzítve

6. Következtetések

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 mértéke, de annak eloszlása 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. Valamint a kimarózást követő nagy deformáció (Δ ütés) akkor alakul ki, ha a rúdban nagy a mélységi feszültség aszimmetria (szemközti alkotók mélységi feszültség lefutása eltérő) vagy nagy a mélységi feszültség gradiens. Továbbá a kimarózást követő nagy deformáció (Δ ütés) akkor alakul ki, ha a rúdban nagy a mélységi feszültség aszimmetria (szemközti alkotók mélységi feszültség lefutása eltérő) vagy nagy a mélységi feszültség gradiens.

7. 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 marópróbás 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 prémium autógyártónak felkeltette az érdeklődését olyannyira, hogy a kutatás céljára kifejlesztett próbát, az összes paraméterével együtt, bizonyos alkatrészek beszállítási valamint gyártás közbeni vizsgálatát minőségbiztosítási célból rajzszerűn előírásban követeli meg. Több Magyarországon lévő autóiipari beszállító és gyártó cég érdeklődik 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 és posztgraduális, mind pedig a doktori képzésben a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet által oktatott tantárgyakban közvetlenül hasznosíthatók.

- 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>