

CSEH DÁVID – MERTINGER VALÉRIA – BENKE MÁRTON – CZIBIK ÁDÁM

A maradó feszültség és a felületi hőkezelési hibák közötti kapcsolat

Cikkünkben beszámolunk egy maradó feszültség mérésorozatról, melyben csapágygyűrűket a gyártási technológia különböző fázisaiban monitoroztunk. Az egyes gyártási műveletek után ugyanazokat a gyűrűket (öt párhuzamos projektmintá) roncsolásmentesen vizsgáltuk, mindig azonos felszíni pontokban mérve a tangenciális irányú maradó feszültséget. Némely lépésekben egyedi mintákat is megvizsgálhattunk, amelyeken roncsolásos méréseket végezhattunk, mivel ezeket mérés után nem helyeztük vissza a gyártástechnológiába, a soron következő műveletbe. Cikkünkben bemutatjuk, hogy milyen változásokon megy keresztül a minták maradó feszültségállapota az egyes műveletek során. Az egyedi minták vizsgálatának eredményei rámutatnak, hogy a kerületi maradó feszültség eloszlásának egyenetlenségei hőkezelési hatásokkal hozhatók kapcsolatba.

1. Bevezetés

Valamely alkatrész gyártása során alkalmazott technológiai folyamatok jellegzetesen befolyásolják a félkész termék állapotát, mint például a mechanikai és szöveti jellemzőket, a textúrát és a belső feszültségeket. Ezek a jellemzők sokszor összefüggnek, sokszor változnak a következő művelet hatására és bizonyos esetben maradó hatással is járhatnak. Optimális esetben ezeket a hatásokat ismerjük és nyomon követhetjük, akár tudatosan is irányíthatjuk. A forgácsolás, köszörülés, különböző céllal végzett hőkezelések speciális, az előidéző gyártási folyamatra jellemző maradó feszültségállapotot eredményeznek. [1, 2, 3] Egy munkadarab végső maradó feszültségállapotára általában az utolsó gyártási lépés gyakorolja a legnagyobb hatást, de

nem elhanyagolhatóak a korábbi műveletek sem.

A csapágygyűrűk gyártása során a kovácsolt előgyártmányt, az ún. toronygyűrűt forgácsolják, nemesítik, végül finom megmunkálásnak vetik alá. E gyűrűk selejtté válásának egyik leggyakoribb oka a gyűrűk deformációja, az ún. ovalítás, melynek kialakulásáért a maradó feszültségállapot megmunkálás következtében történő átrendeződése áll. Ha a feszültségeloszlás a kerület mentén aszimmetrikus és lokálisan meghaladja a folyáshatárt, akkor az adott térfogatrészben maradó alakváltozás következik be, a feszültség relaxációja közben. Korábbi vizsgálataink során hőkezelt gyűrűk kerületi feszültségeloszlása és ovalítása között fennálló összefüggést kerestük. A hőkezelés a befejező finomkösörülési műveletet megelőző gyártási lépés. Készre munká-

lás előtt ellenőrzik a gyártmány kör-szerűségét, és bizonyos ovalitási mértéket meghaladóan a gyűrű selejtes, tehát kiemelik a gyártási sorból. Egy gyártási periódus során tapasztalt szokatlanul nagyszámú ovalitási probléma kapcsán kezdtük vizsgálatainkat eleinte csak hőkezelt gyűrűkön. Megállapítottuk, hogy az ovalítás kialakulása után a feszültségaszimmetria az ovalítás kialakulása során történő leépüléssel megszűnik, ezért az a hőkezelt gyűrűn már nem mutatható ki [4]. A végtermékben található maradó feszültségértéket befolyásolja a gyártmány teljes előléte, ezért a maradó feszültség evolúciójának jobb megértése érdekében roncsolásmentes módszerrel feltérképeztük azt a gyártási folyamat egyes lépései után [5, 6, 7]. Az egyes technológiai lépések utáni maradó feszültségállapotot ugyanazokon a gyűrűkön, ugyanazon a helyen vizsgáltuk. A gyártási folyamat egyes lépéseit a gyártó a vizsgált darabok nyomon követésével valós gyártási körülmények között kivitelezte.

Cikkünkben a mérési sorozat azon eredményeinek bemutatására helyezük a hangsúlyt, amelyeknél a hőkezelési hibákból adódóan szöveti inhomogenitások és feszültségaszimmetriák alakulnak ki.

2. Vizsgálatok

A vizsgált csapágygyűrűk alapanyaga EN ISO 683-17 szabvány szerinti 100CrMn6 ötvözet (C:1,0; Si:0,6; Mn:1,1; Cr:1,5 [m/m %]). A csapágy külső és belső gyűrűit közös kovácsolt előgyártmányból, a toronygyűrűből alakítják ki. A toronygyűrűt esztergálják, először a termék külső gyűrűt adó részét, majd a belső gyűrűt

Cseh Dávid okleveles anyagmérnök, a Miskolci Egyetemen PhD-hallgató, 2014-ben az OTDT Pro Scientia Aranyéremmel tüntette ki. Kutatási területe: maradó feszültség vizsgálatok.

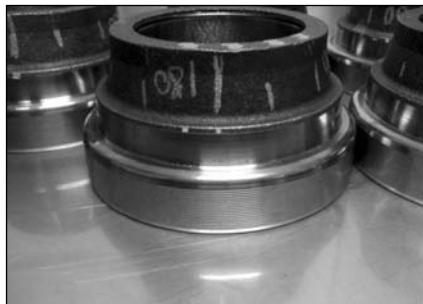
Mertinger Valéria szakmai életrajzát jelen lapszámunk 12. oldalán közzétettük.

Benke Márton okleveles anyagmérnök, a Miskolci Egyetem FKNI-MTA tudományos munkatársa. Kutatási területe: alakemlékező ötvözetek, röntgendiffrakciós vizsgálati technikák.

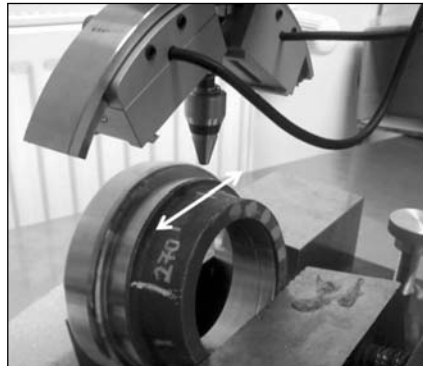
Czibik Ádám BSc anyagmérnök, a Miskolci Egyetem MAK-on MSc-hallgató.



Kovácsolt állapot (1. művelet)



Külső gyűrű esztergálás után (2. művelet)



■ 2. ábra. A 2. technológiai lépést követő feszültségmérés és a mért feszültség iránya



Szétválasztás után (3. művelet)



Hőkezelés után (4. művelet)

■ 1. ábra. A vizsgált gyűrűk az egyes technológiai lépések után

adó részt. Ezután a belső gyűrűt elválasztják a külsőtől. A következő technológiai lépés a gyűrűk nemesítő hőkezelése. A hőkezelés teljes időtartama alatt a külső és belső gyűrűket külön-külön kosarakba helyezik. A belső gyűrűket ömlesztve, külső gyűrűket szabályos hexagonális rendben, elválasztó rácsok alkalmazásával helyezik a hőkezelő kosarakba. A hőkezelés után a gyűrűket készre köszörülik.

A külső és belső gyűrűket is vizsgáltuk kovácsolt állapotban, illetve a külső gyűrűk forgácsolása után. A 3. és 4. lépésben (a külső és belső gyűrűk szétválasztása után és hőkezelés után) már csak a külső gyűrűkön folytattuk a kísérletet. (1. ábra).

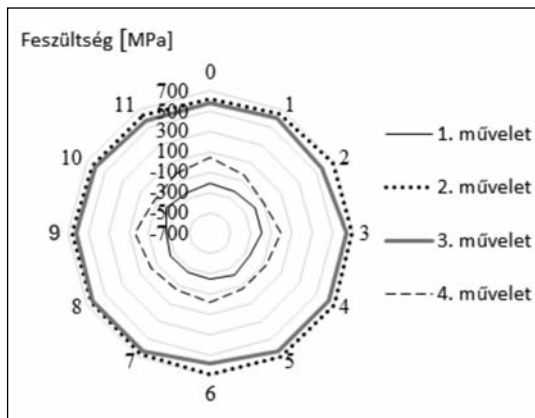
A reprezentatív mintavétel érdekében öt párhuzamos gyűrűn (projektminták) végeztünk vizsgálatokat minden felsorolt lépés után. A gyűrűk külső palástjának középső kerületén, 12 egymástól egyenlő távolságra lévő pontban mértük a feszültség értékét tangenciális irányban. A projektmintákon kívül használtunk néhány egyedi mintát, amiken mélységi maradó feszültségprofilot vettünk fel az egyes technológiai lépéseket követően. A felszíni anyagi rétegek eltávolításához Struers Mo-

vipol 5 mobile elektrolitos polírozó berendezést használtunk. A leválasztott anyag rétegvastagságát egy tapintásos elven működő Mitutoyo távolságmérővel határoztuk meg (μm -es pontossággal). Néhány esetben szövetvizsgálatot is végeztünk, ehhez fénymikroszkópot és pásztázó elektronmikroszkópot (SEM Zeiss EVOMa10), a feszültségmérésekhez pedig Stresstech Xstress 3000 G3R röntgendiffraktométert használtunk. A berendezést maradó feszültségmérésre fejlesztették ki, ez tette lehetővé, hogy roncsolásmentesen, próbakivágás nélkül a gyűrűket többször is újra mérhessük. Röntgendiffrakciós

maradó feszültségméréshez szükséges a minta adott szöggel történő döntése úgy, hogy a vizsgálati pontfókusz adott távolságban maradjon. A berendezés egyedi módszert alkalmaz a probléma megoldására, ugyanis a minta mozgatása helyett a nyugalomban lévő minta felett dönti a teljes goniométert [3, 8, 9]. Példaként a második művelet utáni mérést mutatja be a 2. ábra, amin fehér nyíl jelzi a megmért feszültség irányát. A maradó feszültségértékeket Cr-röntgensóval történő mérés alapján, a ferrit (211) reflexiójának eltolódásából határoztuk meg. A méréseket 5-5 döntési pozícióban (-35° -tól 35° -ig), Ω -módban, 10 másodperces expozíciós idővel, 1 mm sugárfoltátmérővel végeztük el. A maradó feszültség számításához a következő anyagi konstansokat használtuk: Poisson-tényező $\nu = 0,3$, Young-modulus $E(211)=211000 \text{ MPa}$. A röntgendiffrakciós mérések értelmezésénél mindig szem előtt kell tartani, hogy a mért adat a gerjesztett térfogatra jellemző, és a mérési módszer által definiált vizsgálati irányban fellépő feszültséget adja meg.

3. Eredmények

Az öt projektminták feszültségértékeit az egyes műveletek során egy korábbi közleményünkben [8] részletesen bemutattuk. Az öt gyűrű között nem lehetett érdemi eltérést kimutatni egyik művelet után sem. Az egyes műveletek után viszont drasztikus különbségeket mértünk mind előjeles, mind abszolút értékben. Példaként az 5.



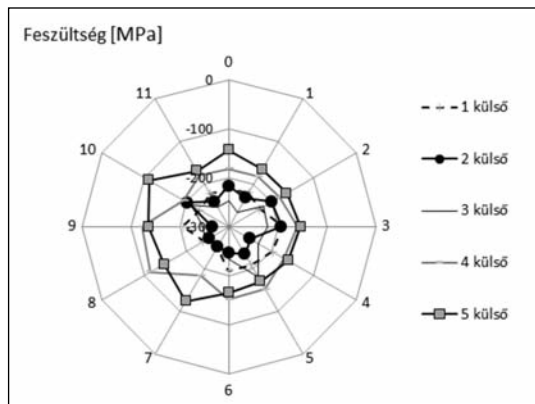
■ 3. ábra. A 3. számú gyűrű technológiai feszültségei [MPa] a kerület 12 pontján (0–11 jel) tangenciális irányban

számú külső gyűrűn mért technológiai feszültségeket mutatja a 3. ábra. A mért feszültségértékek szórása egyszer sem haladta meg a 20 MPa-t, ezért jelen ábrán szórásadatokat nem szerepeltetünk. A kovácsolás után (1. művelet) a feszültségértékek $-150\dots-250$ MPa között alakulnak. A forgácsolás hatására egy igen nagy, 600 MPa körüli húzófeszültség marad vissza (2. művelet). A gyűrűk szétválasztása (3. művelet) a külső gyűrűre nincs hatással, sem a feszültség értéke, sem eloszlása nem változik meg. Azt az előzetes teóriát, miszerint a külső gyűrű torzulását a belső gyűrű „elhúzása” okozhatja, ezzel cáfolni tudtuk. A hőkezelés egy kis értékű nyomófeszültséget, vagy feszültségmentes állapotot eredményez (4. művelet).

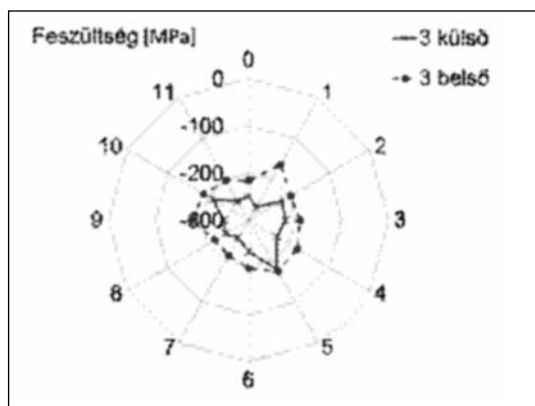
Mivel a kovácsolás utáni állapotban (1. művelet) a gyűrűk közül kettő erősen oxidos állapotban érkezett, sósavas revétlenítést alkalmaztunk. A revétlenítés, még ha kis mennyiségben is, anyagválasztással jár, az így kapott felületen történő mérés már nem a kovácsolt felületre jellemző adatokat szolgáltatja, hanem a felület alatti értékekre volt jellemző. Ez meg is mutatkozott a mérési eredményekben. A 4. ábrán a 4. és 5. számú revétlenített gyűrűkön kisebb nyomófeszültség-értékeket mértünk, míg az eredeti kovácsolt felületen (1, 2, 3. sz. gyűrűk) a -300 MPa körüli érték volt jellemző.

A vizsgálati módszer érzékenysége, illetve a technológiai részletek hatása a kovácsolt külső és belső gyűrűk közti különbségben látszik jól. Mind az öt gyűrűnél azt tapasztaltuk, hogy a külső gyűrűk nagyobb nyomófeszültséget tárolnak, mint a belsők. Erre mutat példát az 5. ábra.

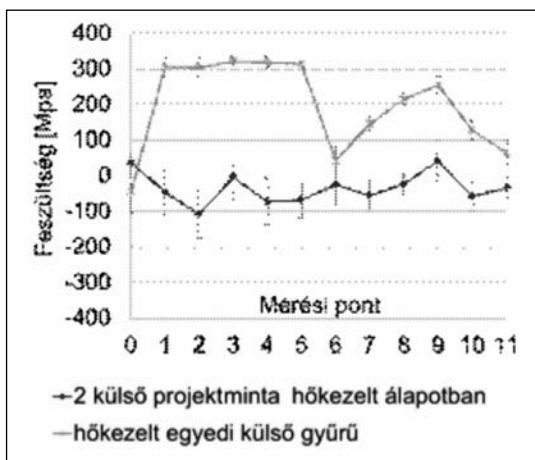
A 6. ábrán egy projekt- és egy egyedi külső gyűrű feszültségeloszlását láthatjuk a hőkezelési művelet után. A projektminta egyenletes szimmetrikus eloszlást, ezzel szemben az egyedi minta durva aszimmetriát mutat. Az aszimmetrián túl veszélyt jelent az is, hogy a nyomófeszültség



■ 4. ábra. Kovácsolt (1, 2, 3) és kovácsolt majd kémiai revétlenített (4, 5) külső gyűrűk feszültségeloszlása a kerület 12 pontján (0–11 jel) tangenciális irányban



■ 5. ábra. Kovácsolt külső gyűrű és belső gyűrű feszültségeloszlása a kerület 12 pontján (0–11 jel) tangenciális irányban



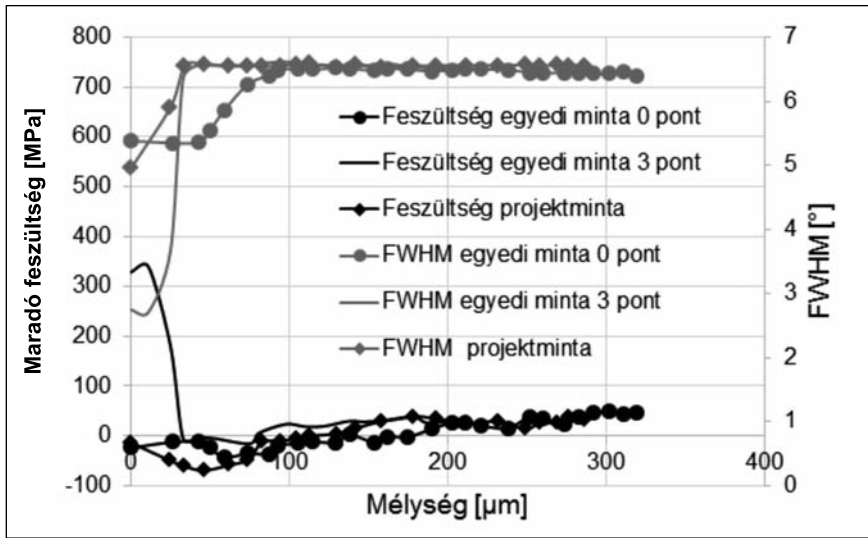
■ 6. ábra. Két külső gyűrű feszültségeloszlása a hőkezelés után a kerület 12 pontján (0–11 jel) tangenciális irányban

helyett helyenként már 300 MPa körüli húzó értékek is megjelennek. Az is látható, hogy az egyes mérési adatok nagyobb szórással terheltek a projektminta esetében, mint az egyedi minta értékei.

A jelenség további vizsgálatához

mélységi feszültségprofilot vetünk fel az egyedi gyűrű 0 jelű (közel feszültségmentes) és a 3-as jelű (húzófeszültséggel terhelte) mérési pontjaiban. Mivel a hőkezelés után nem vizsgáltunk további technológiai lépést, referenciaként a projektmintán is felvettük a mélységi feszültségprofil. Az eredmények a 7. ábrán láthatók. A projektminta és az egyedi gyűrű 0 pontjában felvett mélységi feszültségprofil együtt mozog. 50 μm mélységben már az egyedi gyűrűnek a kiugró felszíni maradó feszültségértéket produkáló 3-as pontjának görbéi is a normál lefutás szerint alakulnak. A 3-as pontban tapasztalt kiugró feszültségértéket valamilyen felszíni hatás okozza. Egyértelmű, hogy az egyedi gyűrű 3-as pontjának anomáliája kb. 50 μm mélységig jelentkezik. A feszültségvizsgálat után szétvagtuk az egyedi gyűrűt és megvizsgáltuk a szövetszerkezetét a 0 és a 3-as jelű mérési pontokban. Az eredményt a 8. ábra mutatja. A 3-as jelű pont alatt a felületközeli rétegekben durva martenzites szövetet látunk, vagyis az eltérő feszültségértékek egyértelműen az eltérő szöveti jellemzőkkel hozhatók kapcsolatba.

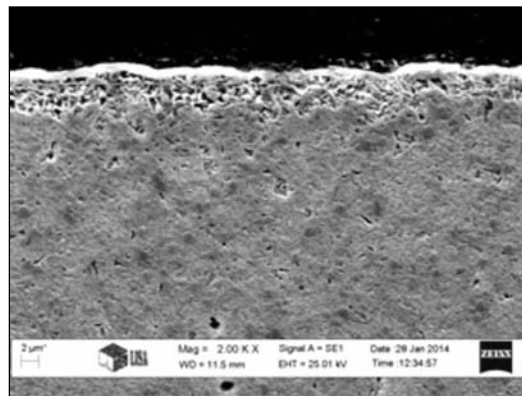
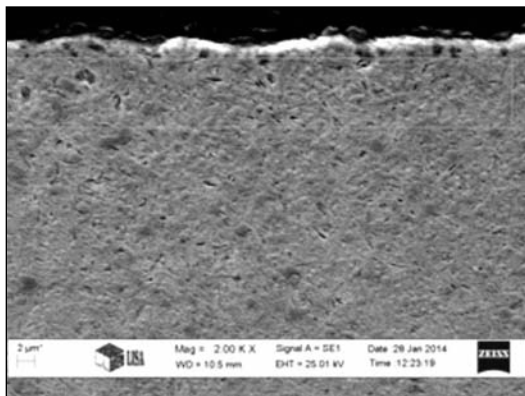
Ahhoz, hogy az eltérő szöveti jellemzők okát megértsük, meg kell vizsgálni a kovácsolt gyűrűk szövetét és feszültségeloszlását a felület alatti rétegekben. A 9. ábra mutatja a gyűrű metszeti szövetképét és feszültségeloszlását. Az ábrákon jól látható, hogy a szövetkép felső, a mért felülethez közeli része erősen dekarbonizálódott, gyakorlatilag tisztán ferrites, míg alatta lemezes perlitből, majd az alatt szferoiditós szövetből áll. A feszültségeloszlásnál azt láthatjuk, hogy a felszín közeli ferrit kisebb nyomófeszültséget tárol, mint a nagyobb karbon tartalmú perlités rész. A profil félérték szélesség-értéke (FWHM) szintén az oldott karbon tartalomra utal, a dekarbonizálódott részen értéke nagyobb. Ennek függvényében vizsgáltuk meg az anomáliát mutató hőkezelte minta feszültség- és félérték szélesség-profilját is (7. ábra). Mivel a



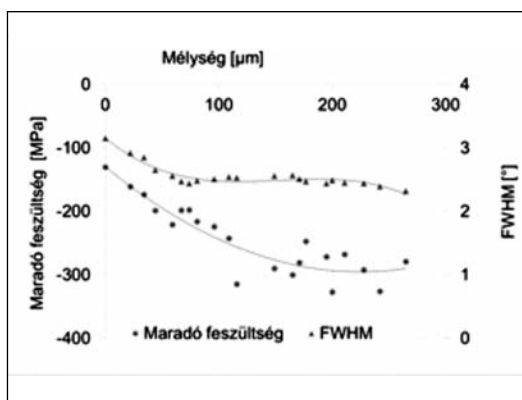
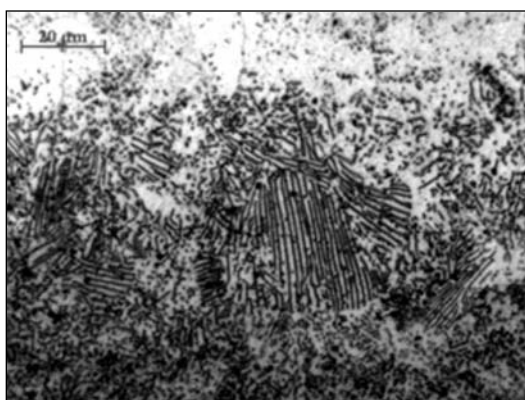
7. ábra. A hőkezelt egyedi gyűrű 0 és 3 jelű pontjában, valamint a projektmintán felvett feszültség- és félértékszélesség-profil (FWHM) a felület alatt

hőkezelést követő feszültségeloszlást a hűtési- és fázisátalakulási viszonyok is befolyásolják, ezért a félértékszélesség-értékeket vettük alapul. Ezek szerint az anomáliát mutató egyedi minta 3-as jelű pontjánál a húzófeszültséget a nagyobb karbon-tartalom okozza. A martenzit nagyobb

karbontartalmára utal annak durvább szövetszerkezete is. A nagyobb karbon-tartalom eredhet a rosszul beállított kemenceatmoszférából is (cementálódik a felület). Ha a hőkezelés során a gyűrűk helyenként összeérnek, akkor kialakulhat a felületi ötvözőinhomogenitás.



8. ábra. A hőkezelt egyedi gyűrű 0 és 3 jelű mérési pontjában készített keresztmetszeti csiszolatok SEM-felvételei



9. ábra. Kovácsolt gyűrű keresztmetszeti fénymikroszkopós képe (kép felső széle a mért felületi oldal) és feszültségeloszlása, valamint félértékszélesség-eloszlása (FWHM) a felület alatt

4. Összefoglalás

Röntgendiffrakciós mérésorozatokkal végigkísértük öt párhuzamos csapágygyűrű kovácsolás, forgácso-lás, szétzúrást és hőkezelést követő maradó feszültségváltozását. A mé-reseket ugyanazokon a gyűrűkön, roncsolásmentesen, minden egyes technológiai lépés után, a gyűrűk kerülete mentén, ugyanabban a 12 pontban végeztük el. A gyűrűk külső palástján mért érintő irányú maradó feszültségek értéke a gyártási tech-nológia során -300 MPa-tól 600 MPa-ig változott. A kialakuló feszültség jellege (húzó vagy nyomó) egyér-telműen jellemző az adott technológi-ai lépésre: kovácsolás után nyomó-, esztergálás után húzó-, a szétválasztás nem okozott változást és a hőke-zelés újra nyomófeszültséget ered-ményezett. A projektgyűrűk esetén az egyes műveletek utáni változás a kerület mentén egyenletesen, szim-metrikus módon következett be. Egyedi gyűrű vizsgálatánál viszont erősen aszimmetrikus feszültségállapotokat is találtunk pl. a hőkezelés utáni gyűrűkön. Egyértelmű, hogy az aszimmetrikus feszültségállapot a gyűrűk torzulását, ovalitását okozhatja. Közvetett, mikroszerkezeti vizsgálatainkkal meg-mutattuk, hogy a feszültségaszim-metria oka összetételebeli inhomogenitás, mely a hőkezelés kísérő-jelenségeivel, úgy-mint nem egyenle-tes dekarbonizáció, cementálódás, oxidáció hozható kapcsolatba. Vizsgálatainkkal a hő-kezelési hibák feszültségállapotra gyakorolt hatásá-nak a jelentőségét szerettük volna bemutatni.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Szabó-Gyurján Valériának és az FAG Magyarország Ipari Kft.-nek a gyűrűk megmunkálásáért, valamint Kovács Árpádnak a SEM-felvételekért. A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Alkalmazott Anyagtudomány és Nanotechnológia Kiválósági Központ keretében valósult meg.

Irodalom

- [1] Heat treating ASM Handbook Vol. 4, ASM International 1991, USA pp. 606–607.
- [2] Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International 2008, USA pp. 347.
- [3] A. D. Krawitz: Introduction to diffraction in materials science and engineering, John Wiley 2001, pp. 119–143., 278–318.
- [4] Cseh D., Mertinger V.: Maradó feszültség vizsgálatok ovális csapágy gyűrűkön, Anyagmérnöki Tudományok, 38/1. (2013), pp. 47–55.
- [5] J. Epp, H. Surm, T. Hirsch, F. Hoffmann: Residual stress relaxation during heating of bearing rings produced in two different manufacturing chains, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) pp. 637–643.
- [6] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, A. G. Olabi: Methods of measuring residual stresses in components, Materials and Design 35 (2012) pp. 572–588.
- [7] H. Bhadeshia: Steels for bearings, Progress in Materials Science 57 (2012) pp. 268–435.
- [8] Cseh D., Mertinger V., Benke M., Czibik Á.: Csapágygyűrű technológiai feszültségeinek vizsgálata, XXVI. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiallítás külföldi résztvevőkkel. (2014) pp 195–199.
- [9] P. J. Withers, H. Bhadeshia: Residual Stress Part1- Measurement techniques, Mat Sci and Technology, April 2001 Vol17 pp. 355–365.
- [10] Gray S.: Schajer Practical residual stress measurement methods, John Wiley 2013, pp. 140–161.

BAUERNHUBER ANDOR – MARKOVITS TAMÁS – TRIF LÁSZLÓ – BOCZ KATALIN
– CSANÁDY ANDRÁSÉ

Acél és PMMA adhéziója lézersugár hatására

A felhasznált műanyagok mennyiségének növekedése eszközeinkben szükségessé teszi a műanyagok hagyományos szerkezeti anyagokkal történő kötését, amelyekre megoldást jelenthet a lézersugaras fém-polimer kötés. A kötés erősségeért felelős kölcsönhatás, a műanyagban lejátszódó változások és azok hatása a kötés minőségére azonban javarészt még ismeretlen. A bemutatott vizsgálatok során a szerzők megvizsgálták az alkalmazott PMMA-műanyagban a kötés során bekövetkező változásokat, valamint a kötés erősségeért felelős adhézió különböző formáit. A kötések metszeti csiszolatait, illetve a szakított felületet pásztázó elektronmikroszkóppal, valamint Raman-spektroszkópiával vizsgálták, és meghatározták a fémfelületre jellemző jellegzetes hőmérséklet-eloszlást a folyamat közben. Vizsgálták továbbá a műanyagban létrejövő buborékok anyagát és hatását a kötés szilárdságára. Az eredmények alapján elmondható, hogy a legnagyobb szilárdságú kötés létrehozására a bemutatott jelenségek miatt a technológiai beállítások csak egy szűkebb tartománya alkalmas.

Bevezetés

A különböző műanyagok termelése és alkalmazási lehetőségei egyre növekednek. A műanyagok felhasználásának bővülését elsősorban az anyagcsalád könnyű megmunkálhatóságával, kedvező sűrűség-szilárdság arányával és kémiai ellenálló képességével magyarázhatjuk. Van azonban a műanyagoknak olyan

fizikai jellemzői, amelyek a régóta használt szerkezeti anyagok, mint a fémek és a kerámiák jellemzőitől elmaradnak. Ilyen például a hőállóság és a szilárdság, amely miatt a műanyagok gyakran nem alkalmazhatók önállóan szerkezeti elemekként. Az elvárt tulajdonságok biztosítása érdekében szükséges lehet kötésük pl. a fémekkel [1]. Megfelelő kialakítás esetén az így létrehozott alkatrészek

egyszerre hordozzák mindkét anyag előnyeit, vagyis a kis tömeget és a nagy szilárdságot. Különösen nagy jelentősége lehet az ilyen hibrid alkatrészeknek a járműgyártásban a környezetvédelem és a fenntarthatósági törekvések erősödése miatt. A műanyagok alkalmazásának növekedése kihívások elé állítja a kötéstechnológiák fejlesztőit is. A tömegtermelés olyan feltételeket támaszt, amelyek az eddig alkalmazott eljárásokkal csak nehezen teljesíthetők. Ilyen feltételek pl. a nagy ismétlési pontosság és kis méretszórás, vagy a rendkívül rövid ütemidő, a hozzáadott anyag vagy elem kezelési idejének csökkentése. A felsorolt elvárásoknak megfelelnek a lézersugaras eljárások, amelyek ezért igen gyorsan terjednek az iparban [2].

A lézersugaras kötéstechnológia egy új és ígéretes változata a fém és a lézeráteresztő polimer kötése, amellyel hozzáadott anyag nélkül válik lehetővé fémek és műanyagok közvetlen kötése. A kötést legtöbbször lemezek között, átlapolat geometriával készítik. Az eljárás során a