

MARADÓ FESZÜLTSÉGEK CSÖKKENTÉSE ULTRAHANGON ALAPULÓKEZELÉSEL

REDUCTION OF RESIDUAL STRESS WITH ULTRASONIC BASED TREATMENT

Gyóni Viktor Zoltán^{1*}, Weltsch Zoltán¹

¹AnyagtechnológiaTanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Magyarország

Kulcsszavak:

Ultrahang
Feszültség
Csökkentés
Acél
Anyag

Keywords:

Ultrasonic
Stress
Reducing
Steel
Material

Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20
Átdolgozva 2018. október 27
Elfogadva 2019. március 5

Összefoglalás

Egy termék, munkadarab előállítása tulajdonságai alapján pl.: geometriai méret stb. sok folyamatból állhat. Az eljárások során nem csak a munkadarab geometriai méreteit változtatjuk meg, hanem a darab belsejében a feszültségeket minden egyes alakadás és megmunkálás során. Az így keletkezett feszültségeket csökkenteni vagy éppen kiegyenlíteni kell annak érdekében, hogy ne okozzanak problémát a későbbiek során. Ilyen eljárások során számolni kell a kezelés idejével, alkalmazhatóságával és energia igényével. A jelen szakirodalmi áttekintésben bemutatott kísérleti eredmények azt bizonyítják, hogy egy gyors és sokoldalú kezelési eljárás létrehozására alkalmas technológia az ultrahangos feszültségcsökkentés, ami a későbbiekben leválthatja a termikus eljárásokat is.

Abstract

The production of a product can consist of many steps and processes depending on what expectations are requested. During the processes, not only the geometrical dimensions of the workpiece are altered, but the stress state inside of the piece inside of the piece also can be changed after each finishing and machining processes. The resulting stress states should be reduced or balanced to not avoid any problems later. Such procedures should consider the time, applicability and energy need of the treatment. The experiments we reviewed in the literature so far have proved that ultrasonic residual stress reduction could be a novel technology to create a fast and versatile treatment process, which can eventually replace thermal procedures.

1. Bevezetés

Az iparban mindig arra törekszenek, hogy a terveknek elvárásoknak megfelelően elő tudják állítani a megfelelő terméket. A megmunkálások során, azok következtében, vagy éppen az előzetes képlékeny alakítások során maradó feszültségek alakulnak ki, amik nem csak a darab

* Kapcsolattartó szerző: 0630/938-9337
E-mail cím: viktorgy12@gmail.com

élettartamát csökkenthetik a felhasználás során ért hatásoktól függően, hanem magát a gyártás menetét, hatékonyságát is nehezíthetik az általuk okozott deformációk miatt.

A feszültség csökkentéseknek fontos szerepe van, csak úgy, mint a gyártás többi részénél, itt is törekedni kell a költséghatékonyságra, mégis a legfontosabb szempont a hatékonyság és az adott feszültség csökkentő eljárásra szánt idő, ami a mai gyártási tendenciákat figyelembe véve minél rövidebb, annál kedvezőbb mind a cég és a felhasználó szempontjából is.

A legsűrűbben alkalmazott eljárások mai napig a termikus eljárások, mivel az ilyen eljárások terén van a legtöbb ismeret, amit alkalmazni tudunk. A feszültség csökkentés terén a hatékonysága a mai napig kielégíti az ipar bizonyos szegmenseit, mivel anyagtól függetlenül használható és optimalizálható. Egyetlen nagy hátránya viszont a berendezés. Mivel a megfelelő hőmérsékletek elérése nagy energia igényű és a gép fizikai méreteiből adódóan korlátozott méretű geometriákat lehet vele kezelni.

A legtöbb esetben mikor a maradó feszültségeket csökkentjük szem előtt kell tartani, hogy a darab tulajdonságait, ha nem szükséges ne változtassuk meg. Ez akkor lényeges, hogyha az adott szerkezet tulajdonságai megfelelnek az elvártaknak és csak a maradó feszültséget szeretnénk csökkenteni.

Ilyen esetekben ajánlott olyan eljárásokat alkalmazni, amelyek nem igényelnek hőbevitelt, eljárástól függően nagyobbat vagy kisebbet. Azok az eljárások, amik nem ezen az elven működnek kis számban vannak jelen és még kisebb számban alkalmazzák a gyártásban. Talán a legelterjedtebb a mechanikai rezgések útján történő eljárás, aminek alapelve a megfelelő amplitúdó és frekvencia alkalmazásával történő feszültség csökkentés, itt a hátránya, hogy a darab geometriája befolyásolja az eljáráshoz alkalmazott berendezések méreteit és paramétereit.

Így jöhetnek szóba az ultrahangos rezgéseket alkalmazó eljárások, aminél egy magasabb állandó frekvencia értéken vagyunk képesek az eljárást elvégezni, figyelembe véve a kezelés idejét és amplitúdóját.

Több kutatás, irodalom is kimutatta, hogy az ultrahanggal történő vibrációs feszültségcsökkentő technológia jól alkalmazható a fémek belső feszültségének úgy evezett kioltásában. Wen He rámutatott, hogy a munkadarabra kifejtett nagy frekvenciás vibráció csökkenteni tudja a maradó feszültséget - a hagyományos, vibrációs feszültségcsökkentéshez hasonlóan -, ugyanakkor maga a mechanizmus teljesen eltérő és egy kisebb feszültségkeltő eszköz is lehetővé teszi akár mikro-mechanikai egység belső feszültségeinek csökkentését. [4]

A cikk során ultrahangos kezelésekkal foglalkozó irodalmak eredményeit és a paraméterek, változtatásainak hatékonyságát foglaltam össze.

2. SU-8 fényérzékeny réteg, ultrahanggal történő rezgetés elvén megvalósuló feszültségcsökkentése

Az SU-8 egy epoxi alapú, UV fény közelében negatív tónusú fényvédő polimer. Kiváló fizikai, mechanikai tulajdonságokkal és korrózióálló képességgel rendelkezik, ezáltal ideális fotopolimeranyaga nagy kiterjedési tényezőjű szerkezetek gyártásához, a mikro-elektromechanikai rendszerekben (MEMS). Azonban az SU-8-at csak korlátozott mértékben használják a MEMS rendszerek gyártásakor, mivel az anyagban lévő belső feszültség jól ismert módon hatással van a szerkezet általános mintázatának minőségére. A belső feszültség az SU-8 réteg repedéseit okozhatja és azt, hogy ez által nem megfelelő mértékben tapad az alapréteghez. Ezek a jelenségek annál jobban felerősödnek, minél vékonyabb a filmréteg.

A probléma megoldása céljából természetesen más kutatók is végeztek már kutatásokat. Ugyanakkor ezek a munkák mind a folyamat paramétereinek vagy a maszk kidolgozás optimalizálására törekedtek és nagyban függtek a kísérleti körülményektől.

2.1. Feszültség keletkezése és hatása a fényérzékeny rétegben

Tény, hogy a gyártás során (post-exposure-bake – PEB) az SU-8 rétegben belső feszültségek alakulnak ki. A PEB folyamata során, a molekulák között keresztkötések képződnek, és az SU-8 réteg odatapad az alapréteghez. A SU-8 (50 ppm/K) fotopolimer termikus expanziós együtthatója (CTE) nagyon magas, az általában alapréteggként (szubsztrátumként) használt anyagokéhoz képest, mint például a szilícium esetében 2,3 ppm/K. A folyamat során

térfogatcsökkenés megy végbe, amely az SU-8 rétegben húzófeszültség kialakulásához vezet, az SU-8 réteg és a szubsztrátum CTE-jének eltérése miatt. A bevonat meghajlik a filmrétegben található belső feszültség hatására. (1. ábra) [1]



1. ábra: Az SU8 fényvédő réteg és az alapréteg meghajlása a belső feszültségek hatására [1]

A térfogatcsökkenést az SU-8 molekuláinak keresztkötései gerjesztik. Kutatók kimutatták, hogy az SU-8 filmréteg belső feszültségei a PEB hűtési folyamata során keletkeznek, és amikor azok felszabadulnak, akkor a rétegen látható repedések, torzulások, jönnek létre. Ezért az ultrahangos feszültségcsökkentést a PEB után végezték. [3]

2.2. Alkalmazott eszköz

Az alkalmazott eszköz frekvenciája 20 kHz, a vibráció amplitúdója a munkaasztalon folyamatosan állítható. Az ultrahang generátor alakítja át az állandó jelet (50 Hz) egy ultrahang frekvenciájú, elektromos oszcillációs jellé (20 kHz) majd az ultrahang jelátalakító a jelet mechanikai (20 kHz) rezgésekké. A vibrációt átviszik a munkatáblára, miután a fogantyú segítségével fokozzák annak amplitúdóját, és ekkor a munkaasztalon rögzített minta együtt rezeg a munkaasztallal. Ha a minta a munkaasztalon nincs rögzítve, akkor horizontális irányba fog kilengeni a kísérlet során. Ezért egy szorító berendezés elkészítése elkerülhetetlen. A kísérlet során egy Si lapkát használtak szubsztrátumként. Mivel a Si lapka vékony és törékeny, a szorító nem csak a minta rögzítéséhez kell, hogy alkalmas legyen, de nem is tehet kárt az SU-8 filmréteg felületi szerkezetében. [1]

2.3. Vizsgált darab előkészítése

A fizikai kísérlet során 1,5 inch átmérőjű Si alapréteget és az SU-8 2075 fényvédőt (MicroChem Corporation, USA) használtak. A kísérlet előtt az Si réteg vastagságát indukciós mikrométerrel mérték, az Si réteg felületi érdesség profilját pedig profilométer segítségével határozták meg (Surfcorder ET4000M, Kosaka Laboratory Ltd. Japan). [1]

A kísérlet menete során először lemossák a Si lapot acetonnal, etanollal, desztillált vízzel, majd szárították, és ezt követően forgatták az SU-8 fényvédőt maximum 1500 ford/perc sebességgel, majd áthelyezték a mintát 20 percre egy síkfelületre. Ezt követte az előmelegítés 75 percen keresztül 85°C -on egy vízszintes melegítőlapon, majd lehűtötték szobahőmérsékletre. Az utómelegítés 5 percig tartott 85°C-on. [1]

2.4. Kezelések hatásai paraméterek függvényében

A kezelések során három különböző paramétert vizsgáltak meg, amelyek befolyásolták annak eredményességét: a kezelés ideje, teljesítmény bevitel, vibráció amplitúdója.

A mérések során egy átalakított, mondhatjuk tovább fejlesztett Stoney formulát alkalmaztak, ami figyelembe vette a réteg vastagságát, az anyagi tulajdonságokat és a görbület sugarát.

$$\sigma_{st} = \left(\frac{1}{1+\delta}\right) \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s) t_f} \times \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right) \quad (1)$$

δ = kétréteg vastagsága közötti arányszám

E_s = szubsztrátum Young-modulusa

t_s = teljes vastagság

t_f = filmréteg vastagsága
 ν_s = szubsztrátum Poisson tényezője
 R = görbület rádiusza
 R_0 = kiinduló görbületi sugár

Ez alapján határozták meg a feszültség értékeket, amik a rétegben keletkeztek. A csökkenés mértékét egy k tényezővel mérték, ami a kezdeti és a kezelés utáni feszültség értékek különbsége és a kezelés előtti feszültség hányadosaként adta meg a hatékonyságát a paraméterek alapján.

Kezelés ideje alapján való mérések azt mutatták, hogy kezelés idejének variálása az egyik olyan paraméter, ami kapcsolódik a kezelés hatékonyságához, de ennek az egy paraméternek a változtatása nem feltétlenül okozza a legjobb hatást, amit elvárnánk. A kezelés során 64W teljesítmény bevitellel dolgoztak és 5, 10, 15, és 20 percig alkalmazták rögzített pozícióban. A mérések alapján elmondható, hogy a legnagyobb hatékonyságot 10 percnél érték el utána annak mértéke a későbbi időkben fokozatosan csökkent a tíz percig való növekedése is mindössze 4-5% közzé esett.

A bevitt teljesítmény változtatása a második paraméter, ami alapján vizsgálták az effektivitást, a 64, 102, 144 W-on. Mivel a 10 perces kezelés határfoka volt a legjobb a kezelési idő ennek megfelelően volt megválasztva. A mérések alapján a bemeneti teljesítmény növelésével az effektivitás is drasztikusan megnőtt. A teljesítmény növelésével 8-9%-os növekedés tapasztalható volt.

A harmadik vizsgált paraméter a vibráció amplitúdója, amit a darab helyzetének változtatásával változtattak meg. A darab geometriai középpontja a rezgés középponttól távolabb lett elhelyezve, és ennek hatására változott az amplitúdója a kezelésnek. A rezgés középpontban 15 μm a szélén 19 μm . Itt is 10 percig és 64 W-on kezelték a darabokat. A távolság növelésével itt is növekedést értek el, ami viszont nem nagyobb a kezelési idő változtatásánál, ami 4-5% volt a feszültség csökkentés terén. Ennek ellenére itt folyamatos növekedés volt tapasztalható.

3. 316-os megjelölésű anyag feszültségcsökkentésének sikeressége

M Shalvandi, Y Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi kutatásaik során, az ultrahangos feszültségcsökkentés eredményét a konvencionális, termikus eljárás eredményeivel hasonlították össze a 316-os rozsdamentes anyagon. Leírások szerint a hagyományos vibrációs feszültségcsökkentés folyamata alacsony frekvenciájú, magas amplitúdójú, dinamikus feszültségekkel történő gerjesztés révén kivitelezhető. Ez az eljárás viszont csak a nagyobb méretű tárgyakra korlátozódik, hiszen a nagy amplitúdójú vibráció deformálja a kisebb, vékonyabb szerkezeteket. A kutatók egy új, az ultrahangos vibráción alapuló feszültségcsökkentő eljárást mutatnak be, amely alkalmazható kisebb, vékonyabb alkatrészekben is. Az ultrahangos vibráció amplitúdóját, a feszültségcsökkentés idejét, illetve az előterhelési paramétereket értékelték ki a vizsgálatok során. [2]

A folyamat hatékonyságát a maradó feszültség művelet előtti és utáni értékeinek összehasonlításával becsülték meg. A folyamat hatékonyságát szintén összevetették a termikus feszültségcsökkentés módszerével. Ez a módszer alkalmazható majdnem minden vékony lemez, vagy kisebb falvastagságú alkatrész termikus és mechanikus maradó feszültségének csökkentése esetében, mint például a repülőgép szárnyának hegesztett lemezei.

Itt a kutatást végzők nem csak a feszültség csökkentést vizsgálták a darabon, hanem az acél akusztikai lágyulását is.

3.1. Alkalmazott eszköz

A berendezés egy nagy frekvenciájú energiaellátóból, amely nagyteljesítményű elektromos impulzusokra képes, egy ultrahangos jelátalakítóból, amely piezoelektromos szerkezet, egy összekötőelemből, egy repülőgépekhez használt alumínium ötvözetből készült tölcser jellegű alkatrészből, egy különleges érmesajtólóból áll, amely a vibráció útján erőt fejt ki a munkadarabra. A piezoelektromos szerkezet állandó hullámot bocsát az összekapcsoló részre.

Nagy teljesítményű MPI generátort használtak a vibráció keltésére. A jelátalakító rezonancia frekvenciája körülbelül 24500 Hz volt. A jelátalakítóéval megegyező rezonancia frekvenciával

rendelkező tölcseért erre a célra alakították ki, melynek anyaga Al7075-T6 volt. Az ultrahangos vibrációt a tölcseren keresztül juttatták el a munkadarabhoz. [2]

3.2. Vizsgált darab előkészítése

Három különböző típusú, ugyanolyan hosszúságú és szélességű, de eltérő vastagságú Almen mintát választottak ki. Ezeket N, A és C típusoknak nevezték, melyek 0,772; 1,283 és 2,372 mm a vastagságúak voltak. A mintadarabok alakítását (kalapálását) a Reymehr cég gépével végezték, a szabvány leírásainak megfelelően. A légnomás 8 MPa volt, a darabnak a fúvókától lévő távolságát 100 mm-re, a csapás szögét 83°-ra állították, a fúvóka átmérője 5 mm a gömbfejes ütés átmérője pedig 0,45 mm volt. A munkadarabok gömbfejes kalapálása, a fejen elért ívmagasság mérése után, elvégezték az ultrahangos feszültségcsökkentő műveletet a mintadarabokon.[2]

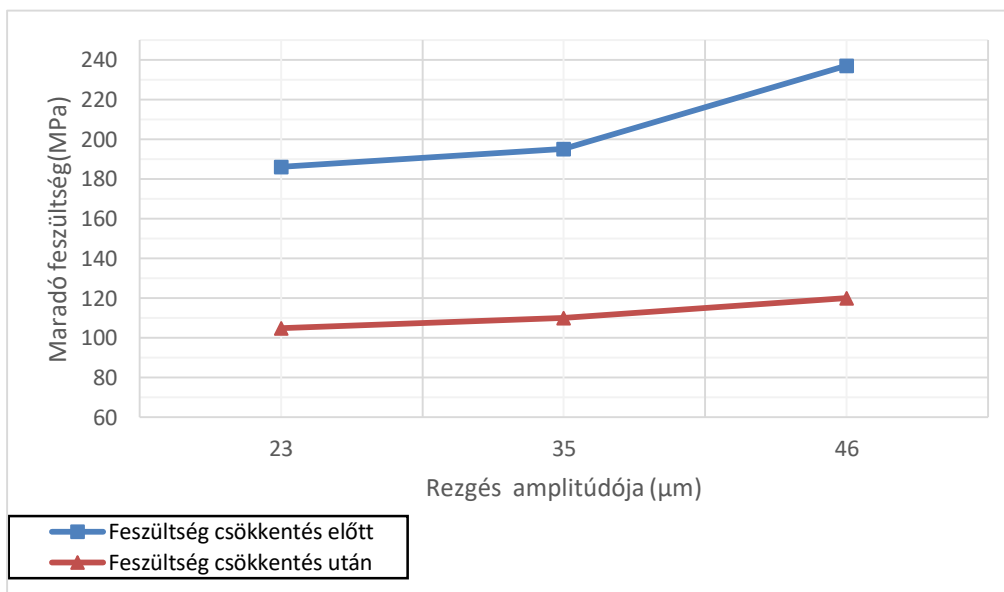
3.3. Kezelés és eredményei

A feszültségcsökkentés ideje rendre 2, 5 és 8 perc, a vibrációs amplitúdó 23, 34,5 és 46 μm volt. A szerzők a feszültség csökkentés hatásait a termikus kezelések hatásaival hasonlították össze a vizsgált paraméterek beállítása mellett.

Elsőnek a termikus eljárást vették figyelembe, amely során a mérésekből az jött ki, hogy a feszültség csökkentés hatása nagyjából 40%.

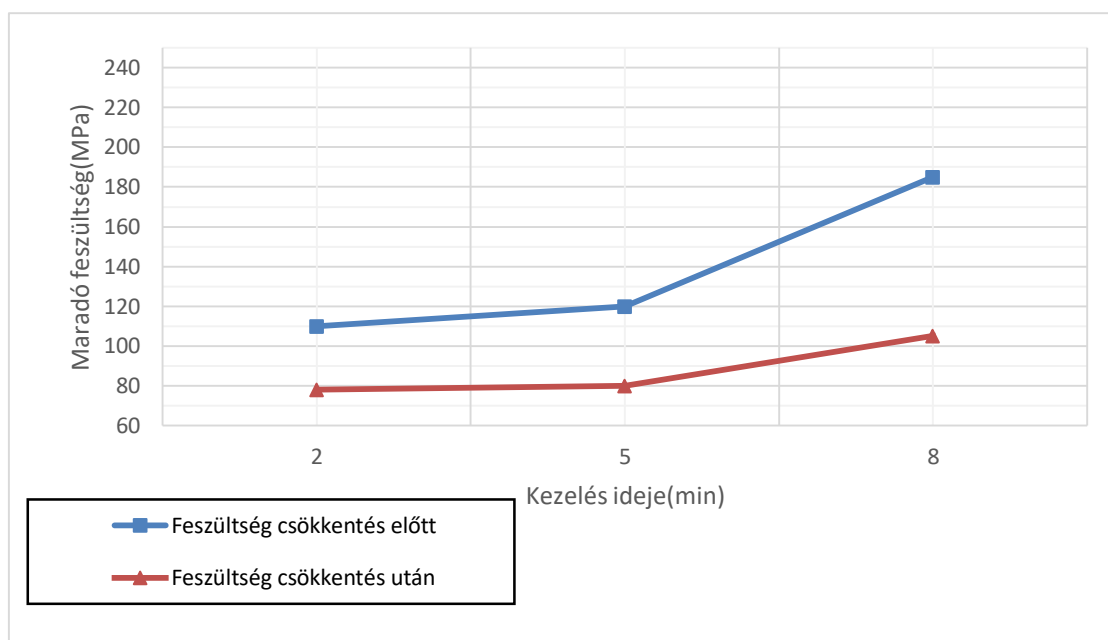
Ezután az ultrahangos kezelés eredményeit vizsgálták a kezelés idejének és amplitúdójának függvényében.

A vibrációs amplitúdó hatását vizsgálva elmondható, hogy annak értékét 23 μm -ról 46 μm -ra növelve, a maradó feszültség jelentősebb mértékben (237 MPa-ról 120 MPa-ra) csökkent. (2. ábra) [2]



2. ábra: A vibráció amplitúdójának hatása a maradó feszültségre [2]

Látható, hogy a feszültségcsökkentésre szánt idő is növeli a feszültség csökkentés várható eredményét. Jelen tanulmány szerzői is arról számolnak be, hogy a feszültségcsökkentési idő 2-ről 8 perce történő növelésével a feszültség értéke 185 MPa-ról 105 MPa-ra csökkent. (3. ábra) Egyes irodalmak szerint ez a tendencia, hosszabb idők esetében, például már 20 perc után megfordulhat és csökkenés várható a feszültségcsökkenés mértékében, intenzitásában.



3. ábra: A vibrációs idő hatása a belső feszültségek csökkenésére [2]

A kísérletek során kijött, hogy az ultrahangos eljárással kapott feszültségcsökkenés értékei 38%-ra tehetők, ami kissé elmarad ugyan a termikus kezelés eredményeitől, de az nem számottevő és nagy berendezéseknél is kisebb energijelhasználással alkalmazható.

4. Következtetés

Az Su-8 és a acélon elvégzett kísérletek során különböző paramétereket vizsgáltak, amelyek befolyásolhatják a kezelés eredményességét. Ezek a paraméterek a kezelés ideje, teljesítmény bevitel és a vibráció amplitúdója volt. Ezel a vibrációs elven történő eljárások fontos tényezői a frekvencia mellett. Ultrahang által generált vibrációt alkalmaztak így annak tartományában egy állandó frekvencián kezelték a darabot. Az acél és a fényvédő réteg kezelése során 20 és 30 kHz közötti értékekkel dolgoztak és ezek a hatásokot kismértékben befolyásolták. Ebből következtethetünk arra, hogy a másik három paraméter jelentősége nagyobb mértékű

Elsőnek is a kezelés ideje, mindkét kísérlet során hatással volt a kezelésre. A kezelési idő a mérések alapján egészen tíz percreg effektív az e feletti idő tartományt nem vizsgálták. A 316-os rozsdamentes anyagon nem mentek el tíz percreg a kezelés során, a nyolc perces kezelési idő mellett jó eredményeket mutattak fel így is. A fényvédő réteg vizsgálatából viszont következtethetünk arra, hogy a tíz perces kezelési időn belül is a feszültség csökkentő hatás növekszik.

A második vizsgált paraméter, amely közös volt a két kísérlet során, a kezelés amplitúdója. Itt egyértelműen kijött, hogy a kezelés amplitúdója minél nagyobb, annál nagyobb hatásokkal dolgozik az eljárás. A kísérletek alapján az vonható le következtetésként, hogy az amplitúdó növelésének hatására nem következik be hatások csökkenés csak növekedés.

A harmadik paraméter a teljesítmény bevitel volt. Ennél csak az egyik cikk foglalkozott olyan formában, ami a feszültség csökkentéshez kapcsolódik (a másik cikk magasabb teljesítmény alkalmazásával csak az akusztikus lágyulásra tér ki). Ennél a paraméternél az időhöz és amplitúdóhoz viszonyítva nagymértékű növekedést tapasztalhatunk nem csupán 4-5% értékűt, hanem attól függően mekkora ugrás van a két teljesítmény érték között, akár 10%-ról is beszélhetünk.

Ezek ismeretében kijelenthetjük, hogy igenis van lehetőség és potenciál az ilyen típusú feszültség csökkentő eljárásokban. A megfelelő paraméterek megválasztása mellett anyagon és geometrián alkalmazható és költséghatékonyabb eljárások jöhetnek létre belőle.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és Európai Unió támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer Du Ligun, Wang Qijia
- [2] Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief M Shalvandi, Y Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi
- [3] SU-8 Photolithography and Its Impact on Microfluidics Rodrigo Martinez-Duarte and Marc J. Madou (<https://pdfs.semanticscholar.org/ac6a/495d309f93a08746f7dc7957dd85b71fc7c1.pdf>)
- [4] Effects of ultrasonic impact treatment on weld microstructure, hardness, and residual stress Chuan Liu, Dongjun Chen, Michael R. Hill, Minh N. Tran & Jiasheng Zou