



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR**

**Kandó Kálmán Multidiszciplináris Műszaki Tudományok
Doktori Iskola**

Doktori téziszfüzet

**Vékony karosszérialemezekbe lézersugárral írt
logisztikai kódok jelölési és elektromágneses elvű
kiolvasási rendszerének vizsgálata**

című témakörből,
amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Készítette:

Kalincsa Zoltán
okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Takács János
tanszékvezető, egyetemi tanár

Budapest, 2007

Bevezetés

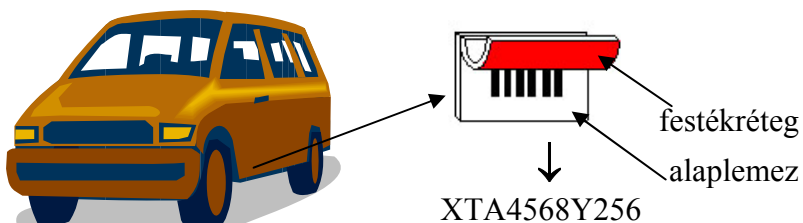
A logisztika fejlődésével egyidőben, a termelésben és az elosztásban az azonosító eszközök (kódok) jelentősége előtérbe került. Számos területen alkalmaznak olyan jeleket vagy jelcsomagokat, amelyek önmagukban, vagy egymáshoz való viszonyukban információt hordoznak. Valamennyi azonosítási eljárás közül azonban legnagyobb gyakorlati jelentőségű a vonalkód. A vonalkód általában olyan optikailag érzékelhető kód, ahol a világos és sötét mezők meghatározott változása fejezi ki az információt [1]. Az automatikus termékazonosítás e széleskörűen használt (sokszor papír alapú optikai vonalkódos) módszere azonban használhatatlanná válik a vegyi kezelések, festés esetén, vagy korrózióknak kitett felületeken. A logisztikai rendszerekben az ilyen információvesztés a rendszer megbízható használatát rontja.

Számos esetben fontos lehet az is, hogy az információ ne legyen könnyen kiolvasható (rejtett legyen). A gépjárművek sorozatszámait, például motor, alvázszám rendszerint mechanikusan, pl. beütéssel, külön számtábla felszegecseklésével, az utóbbi években látható számok gravírozásával, vagy lyuksorozat kialakításával oldották meg. Ezeket a módszereket alapvetően a vizuális kiolvashatóság jellemzi. Számos tapasztalat mutatja, hogy járműlopások során ezek a jelek gyakran egyszerű eszközökkel, kis költséggel átírhatóak.

A modern lézertechnikai és a korszerű anyagtudományi ismeretek alapján ferromágneses anyagokban kialakíthatóak olyan egyedi azonosítók (kódok), amelyek az anyag szerkezetében létrehozott változások eredményeként jönnek létre [2,3,4,5]. A jelölés során a lézersugár fázisátalakulásokat, szövetszerkezeti változásokat hoz létre a jelölendő fém felületközeli rétegében, melyek eredményeként a fém saját anyagában létrehozott anyagszerkezeti változásokon alapuló jelek alakíthatóak ki. A szerkezetváltozásokat a kapcsolódó fizikai tulajdonságok (mágneses, illetve a transzport tulajdonságok) helyi megváltozása alapján, megfelelő mérési módszerek segítségével érzékelhetjük.

E dolgozat olyan lézersugaras jelölési rendszerrel foglalkozik, amelyben az információt az anyag szerkezetében, a fémek felületközeli rétegében a szövetszerkezet lokális megváltoztatása révén kialakított jelek hordozzák. Ezen új típusú jelölési rendszerben a jelek hasonlóak az optikai vonalkódokhoz, de kiolvasásukhoz nem szükséges a vizuális láthatóság. A jelek kialakításakor célszerű olyan szerkezetváltoztatást használni, amelynek érzékelése akár bevonaton (pl.: festékrétegen) keresztül is, érintkezés nélkül, roncsolásmentesen, a jel megsemmisülése vagy számottevő megváltozása (kiolvashatóságának megváltozása) nélkül megvalósítható. A jelek információtartalmát roncsolás- és érintkezésmentes, mágneses, elektromos vagy akusztikus jellemzők mérésével lehet kiolvasni és célelektronika segítségével értelmezni. Az így kialakított, anyagszerkezeti változásokon

alapuló jelek egyenkénti, nagypontosságú kiolvashatósága logisztikai rendszerekben is használható vonalkódok alkalmazásának az alapja lehet.



1. ábra A lézeres jelölés felhasználásának egyik lehetséges példája

A lézersugárral kialakított kódok az alvázba, a karosszéria elemeibe vagy tetszés szerinti egyezményes helyre már a gyártási folyamat során (kezdetén) felvihetők, amint erre az 1. ábra is utal.

2. A témához kapcsolódó tudományos irodalom áttekintése

A lokális lézersugaras hőkezelésen alapuló kódok kialakításáról kevés információ található a tudományos közleményekben. A kódok kialakításának az alapja az alapszövet tulajdonságainak a megváltoztatása hőkezelés útján.

A BME KSK Járműgyártás és -javítás Tanszéken (BME KSK JJT) folytatott korábbi kutatások alapján kiderült, hogy a lokális szövetszerkezet-változáson alapuló jelölési rendszer a korszerű ipari gyakorlat számára is számos új lehetőséget hordoz magában, például a hossz mérés extrém eseteire, vagy az egyedi azonosítók kialakítására [7,30]. A jelölés első sikeres alkalmazása a vasúti sínek termikus feszültségállapotának a meghatározása volt [1,2,3,4]. Ebben a jelölési rendszerben egymástól azonos távolságban lévő, öt jelből álló jelcsoport segítségével határozták meg a termikus dilatáció és/vagy az üzemi terhelések által keltett feszültségeket a vasúti sínekben. A sínek nagy karbon tartalma ($C \approx 0,6\%$) miatt a helyi hőkezelés hatására kialakuló, ferrit-perlites alapszövettől eltérő martenzites szövet létrejötté egyértelműen bizonyítható volt. A sínjelölésre használt jelölési paraméterekkel (lézerteljesítmény, foltátmérő, pásztázási sebesség) és az alkalmazott jeltávolsággal és jelmélységgel – tekintettel a korróziós hatásokra is – tartós, stabil jelek váltak kialakíthatóvá a nagy karbon tartalmú szerkezeti acélokban. A kis karbon tartalmú vékony acéllemezekben kialakítandó jelek esetére a jelkialakítás és kiolvásás eredményeiről szinte nincs hozzáférhető információ.

Lézersugaras felületi hőkezelésekről elsősorban olyan publikációk kerültek közlésre, amelyekben a hagyományos hőkezelési feladatok, korszerű lézeres megoldásait mutatják be, főként a hagyományos hőkezelésekkel elérhető célok érdekében [2,3,4,7,9,29].

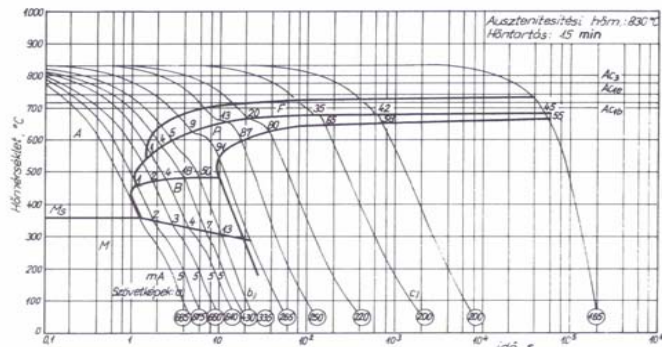
A megfelelő lézersugaras kezelés az anyag felületközeli rétegeiben szerkezetváltozást hoz létre. Ez a változás bonyolult energiabecsatolás és hőelnyelési jelenség kombinációjának az eredménye. A felületen elnyelt fényenergia (fotonok energiája) a felületközeli néhány atomsor energiataralmának rendkívül gyors növelésével jár, s mivel a hőelvezetés lassabban zajlik le, mint az energia becsatolódása, ezért a fém felületközeli rétege felhevül.

A lézersugárral a felületen, illetve a kölcsönhatási zónában, a hevítést követően, olvasztás, elgőzölögtetés, plazma állapot kialakulása is elérhető, amely hatásmechanizmusok képezik a különféle lézersugaras megmunkálások változatos módozatait [7,9,29].

A felület túlhevítése, megolvasztása azonban a lézersugaras jelölésnek nem kívánatos. Az energiaelnyelés és a hőelvezetés sebességkülönbségétől és az anyagösszetételtől függően így is többféle szerkezetváltozás jöhet létre. Vas-karbon ötvözetek esetében a lehűlés után kialakuló szerkezet nagymértékben

függ attól, hogy az ötvözet helyi olvadása megindult-e, vagy csak α - γ - α átalakuláson ment át a hőhatásvézetbe került anyagrésze. Az elnyelt energiamentiség függ az alkalmazott lézertípustól (TEM, λ), az alapanyag elnyelő képességétől, a felületminőségétől, az alkalmazott abszorbenstől, stb. [6,7,8,9].

Hőkezelésen a fémek teljes tömegének, vagy felületi lokális részének tervszerű hőmérséklet változtatásait értjük, melynek célja az ötvözet tulajdonságainak a módosítása, a szerkezet megváltoztatása révén. A hűtési sebesség növelése azt eredményezi, hogy a diffúziósebesség csökkenése következtében a $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás az atomok hosszú távú diffúziója nélkül megy végbe. A szakirodalom főként a nagyobb karbontartalmú ($C\% > 0.2$) szerkezeti acélok keménység-növelő, szívósság-fokozó és egyéb ipari alkalmazás szempontjából fontos kezeléseit ismerteti. Nagy karbontartalmú (vasúti sín alapanyagként is alkalmazott) szerkezeti acél folyamatos hűtésre vonatkozó átalakulási diagramja látható a 2. ábrán.



2. ábra 0,6% C-t tartalmazó acél folyamatos átalakulási diagramja [33]

A kis karbontartalmú szerkezeti acélok körében főként a hidegalakítás utáni lágyító, egyenmősítő hőkezelések, valamint a felületi keménységet idegen anyag bediffundáltatása (pl.: C, N stb.) útján megnövelő kezelések a legismertebbek.

Ha a karbontartalom kicsi, 0,08-0,15% körüli, akkor nincs lehetőség a martenzites, illetve bainites szövetszerkezet kialakulására vagy csak csekély mennyiségben.

Hidegen alakított fémek hevítésekor az alakításkor eltorzult szemcsék bizonyos hőmérsékleten átalakulnak. Újrakristályosodáson azt a folyamatot értjük, amelynek során az alakított fém deformált krisztallitjainak anyagából csírák képződése és fokozatos növekedése útján új krisztallitok fejlődnek. Újrakristályosodás során az alakítással bevitt energia egy része felszabadul, új alakítatlan krisztallitok megjelenésével [10].

A hidegalakítással járó káros jelenségek (ridegedés, szemcsetorzulás) újrakristályosítással megszüntethetőek. Újrakristályosításkor új szemcsék lépnek a kiindulási, hidegen alakított szemcsék helyébe. Az anyag viselkedését hőkezelés során a hidegalakítás mértéke is befolyásolja. Az újrakristályosodási hőmérséklet rohamosan csökken az alakítás mértékének növelésével. Adott mértékű hidegalakítás annál nagyobb újrakristályosodási hajlamot okoz, minél finomabb a szemcseméret és minél alacsonyabb hőmérsékleten ment végbe a hidegalakítás. A szemcseméret az újrakristályosodási hőmérséklettel növekszik. Minél magasabb hőmérsékleten izzítjuk a fémeket, annál durvább a kialakult szemcseszerkezet [10].

A szakirodalmak vizsgálata alapján megállapítható, hogy a kis karbontartalmú szerkezeti acélok szerkezetváltozáson alapuló logisztikai célú kódialakítására kevés utalás van. A lézersugaras jelkialakítás, valamint az elektromágneses tulajdonságok változásán alapuló jelkiolvasás hatásmechanizmusai vékony acéllemezekben nem kellően tisztázottak, ezért az anyagszerkezeti változások komplexebb vizsgálata és elemzése szükséges.

Az eddigi kutatások nem adtak választ a jeltávolság-, foltátmérő-, lézerteljesítmény-, sugármozgatási sebesség összefüggéseire a kis karbontartalmú vékony acéllemezek esetében.

2.9 Irodalmi áttekintés összefoglalása

A témához kapcsolódó tudományos közlemények áttekintése alapján megállapítható, hogy a lézeres hőkezelést, mint gyártástechnológiai eljárást szinte kizárólag az anyag mechanikai tulajdonságainak a megváltoztatására használják (pl. edzés, felületötvözés), a lokális hőkezeléssel kialakított, anyagszerkezeti változásokon alapuló, fedőréteg alól is kiolvasható jelölésrendszer vizsgálatával azonban még a korábbi tanszéki kutatásokon túl nem foglalkoztak. A lézersugárral, mint megmunkálóeszközzel kialakíthatnak ugyan különféle jelöléseket az anyagok (főként fémek és műanyagok) felületén, de ezeket a jelölésrendszereket a vizuális kiolvashatóság és gyakran a felület roncsolódása jellemzi. A BME JJT-en hasonló elven alapuló jelölésrendszert dolgoztak ki a vasúti sínek termikus feszültségeinek a meghatározására, ebben a rendszerben azonban a jelölendő anyag nagy karbontartalmú ($C \approx 0,6\%$) szerkezeti acél. Ebben az esetben a lézeres kezelés hatására martenzites (esetenként a gyors hűlés következtében üvegátalakulás) következik be. A kis karbontartalmú ($C < 0,01\%$) főként járműiparban használatos lemezanyagok lokális hőkezelése szintén nem tartozik a széleskörűen kutatott jelenségek körébe. Ezek a lemezek főként hideghengerléssel készülnek és a teljes tömegű újrakristályosító hőkezelést az előzetes megmunkálás okozta nem kívánatos szerkezeti változások

(felkeményedés, szemcsetorzulás) megszüntetésére használják. Tehát az irodalom csak a lézersugár-anyag (fém) kölcsönhatásokat, valamint az általános hőkezelési eljárásokat dolgozza fel részletesebben.

A roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárásokat szintén részletesen tárgyalja az irodalom, viszont alkalmazásuk főként az alkatrészek mechanikai, makró anyagszerkezeti hibáinak a feltárására korlátozódik. Mivel a jelkiolvasás az anyag szerkezeti jellemzőinek a lokális megváltozásán alapul, célszerűen azokat vizsgáltam részletesebben, amelyek alkalmasak a fémek mágneses, elektromos (pl. vezetőképesség) jellemzőiben bekövetkezett változások feltárására is.

A jelölési-kiolvasási rendszer széleskörű alkalmazásához szükséges tudni, hogy az alkalmazott lokális kezelés nem befolyásolja-e az anyag mechanikai tulajdonságait oly mértékben, hogy ez korlátozná az alkalmazhatóságát. Az irodalom alapján kiválaszthatóak azok az eljárások, melyek segítségével feltárhatóak akár az anyag mikro/nano feszültségei is.

A jelölési-kiolvasási rendszer akkor teljes, ha a kialakított vonalkódok segítségével alfanumerikus karaktereket tudunk kódolni. A kódolással szemben támasztott követelmények alapján (robosztusság, tömörség) a már megalkotott kódolási eljárások közül célszerű választani. Az irodalom ezen a területen is bőséges, de kizárólag itt is csak a vizuális kódkiolvasás területére fókuszálódik.

Ezek alapján a lokális lézeres hőkezeléssel kialakított jelölésrendszer alapjelenségeinek jobb megismerését, kutatását és az összefüggések feltárását tűztem ki célul. Az elmúlt évek kutatási tapasztalataiból kiindulva ezen új típusú jelölésrendszer alkalmazása iránt jelentős lehet az érdeklődés az ipar, főként a járműipar részéről.

Összességében megállapítható tehát, hogy a két nagy tudományterületet, a lézeres hőkezelést és a roncsolásmentes anyagvizsgálatot együttesen, mint jelkialakítási rendszert még alig vizsgálták, miközben az ipar részéről jelentős az érdeklődés egy ilyen jellegű jelölésrendszer iránt, a logisztikai, azonosítási folyamatok megbízhatóbbá tételének az érdekében.

3. A kutatás célkitűzései

A lézersugaras hőkezeléssel adott helyen és geometriával, lokálisan kialakított jelek kiolvasása a mágneses tulajdonságok helyi megváltozásán alapul. A lézersugaras hőkezeléssel létrehozott (pontosan meghatározott helyű és térbeli geometriájú) információtartalmat az anyag és a tárolt információ megváltozása nélkül kell kiolvasni.

Az optimális kódkiakítás során a jelkiolvasás megbízhatósága, egyértelmősége mellett, (a potenciális alkalmazásokra tekintettel) gazdaságossági szempontokat is szem előtt kell tartani, ezért az is cél, hogy a kódrendszer a lehető legkisebb helyet foglalja el.

Fontos követelmény a jelöléssel szemben, hogy a felület esztétikai minőségét ne rontsa, a lokális deformáció, valamint a nagyobb kiterjedésben okozott esztétikai hiba (hullámosság) sem engedhető meg.

Ezen kritériumoknak megfelelően kell optimalizálni a jeltávolság-foltátmérő-, lézerteljesítmény-, sugármozgatási sebesség értékeit.

Kutatásaim célja a technológiai adatok optimalizálása kis karbontartalmú szerkezeti acélokban a kiolvasás szempontjából egyértelmű és biztonságos lézersugaras jelkialakítást szem előtt tartva. A kutatásaim további célja a lokális hőkezelés hatására bekövetkező mágneses tulajdonságok vizsgálata, mivel a kiolvasás elektromágnes elven történik.

A tartós, egyértelmű jelkialakítás szempontjából fontos a jelölések hőstabilitásának biztosítása is, mivel a jelölt szerkezetet technológiai folyamatok során (pl. festékbeégetés) felhevíthetik, ami a szokásos karosszéria anyagoknál több száz °C. A jelölés környezetében kialakuló mechanikai feszültség mezők, illetve a makroszkopikus mechanikai tulajdonságok vizsgálata is szükséges, mivel ezek is károsan befolyásolhatják a jelölt alkatrészek rendeltetésszerű alkalmazhatóságát, amelyek kihathatnak a jelek stabilitására, tartós, biztonságos kiolvashatóságára. Ezen kérdések megválaszolása miatt szükséges a lézersugaras jelölés és a jelölés okozta helyi átalakulások természetének vizsgálata.

4. Kutatási módszerek, a kutatás során felhasznált eszközök

Kutatási céloknak megfelelően, a lézersugaras jelkialakítás optimalizálásához szükséges a mágneses tulajdonságok vizsgálata, a kis karbontartalmú vékony acéllemezeken, figyelemmel, a kiolvasás megbízhatóságára, biztonságára és a szerkezetek stabil rendeltetés szerinti működésének biztosítására.

Ezen feladatok sikeres megvalósítására a technológiai gyakorlatban alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások tekinthetők alkalmasnak. Ezeket, a vizsgálatokat eddig döntő mértékben hibák (pl.: repedések, inhomogenitások stb.) feltárására alkalmazták és fejlesztették. A lézersugaras besugárzással létrehozott szövetszerkezet változások, illetve a maradó feszültségek helyének kimutatására több eljárás is alkalmas lehet [11, 30], pl.:

- Ultrahangos szerkezetvizsgálat,
- Mágnesességen alapuló mérések:
 - Barkhausen-zaj,
 - Szórt fluxus,
 - Örvényáram mérése.

A jelölt szerkezetek azonban a jelölések hatásra sem válhatnak alkalmatlanná a szerkezetekkel szemben támasztott követelmények (pl.: szilárdság, esztétika stb.) teljes körű kielégítésére. Ezért az alkalmazhatóság szempontjából fontos a lemezekben a lézersugaras jelölés hatására kialakuló belső feszültségeinek ismerete. A kialakult feszültségek vizsgálatára a rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat [20,21], a rácsinterferencián alapuló Moiré [22,23] eljárás, valamint a röntgendiffrakciós [24] módszer is alkalmas lehet, a feszültségek nagyságától függően.

A vizsgálatokhoz kis karbontartalmú (<0,01%), mikroötvözött (Mn=0,7 %, Si=0,3%, Ti=0,06%), 0,01-0,02 mm cinkréteggel bevont vékony acéllemezeket (DX 53 D ZF) használtunk, mert az egyik legjelentősebb - tervezett - felhasználási terület, a járműipar, ezt használja.

A lézersugaras jelek kialakításához OPL 2000 típusú, maximálisan 1,8 kW fénytjelcsillapító kibocsátására alkalmas, gyors axiális áramlású, CO₂ lézert használtuk. A berendezés 300 Hz-es villamos kisülések által gerjesztett, folyamatos és impulzus üzemmódokban is használható. A kicsatolt, majd tükrrendszeren, illetve optikán átvezetett lézersugár körkörös polarizált és TEM₀₀-hoz közeli eloszlású. A munkadarabok és a lézersugár közötti relatív elmozdulást a lézerfej alatt elhelyezkedő –a kísérleteknél- 2 tengely mentén FRANKE SM 2000 vezérléssel mozgatott CNC munkaasztalok biztosították.

A jelek kiolvasására az MTA MFA által kifejlesztett, az örvényáramú mérési elv, és egy nagyérzékenységű mágneses térmérő szenzor kombinálásán alapuló

[12,13,14,15] eszközt (Fluxset mérőfej) használtunk, amely a hagyományos fluxgate magnetométerek egy speciális változatának tekinthető [16,17].

A vizsgálat során a mérendő minta felületéhez, a felületi normális irányában viszonylag közel elhelyezkedő térmérő szenzor segítségével mérjük a gerjesztés hatására az anyagban kialakuló örvényáramok mágneses terét, illetve ezen tér változását a lemezfelület egyik (a jelölés szempontjából jól meghatározott) koordináta irányában, a hely függvényében. A keletkező örvényáram nagyságát az anyag fizikai tulajdonságai és az esetleges folytonossági hiányok határozzák meg. Ezek a változások az anyagban lévő hibák (vagy szándékos változtatások) következményei [11].

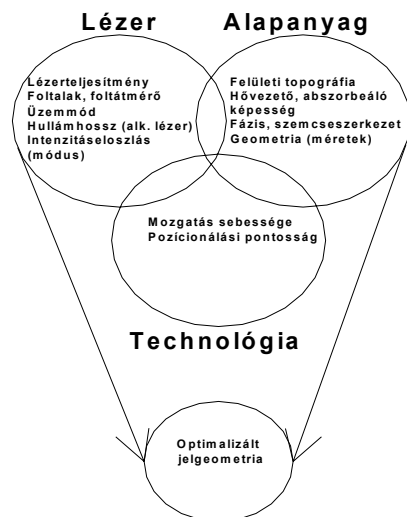
A metallográfiai vizsgálatokat Neophot fénymikroszkópon, illetve CSM gyártmányú, MCT (Micro Combi Tester) segítségével végeztük. A fázisok azonosítására Philips X' Pert type X-ray diffraktométert használtunk (ELTE TTK Anyagfizika Tanszék). A domén illetve a szemcseszerkezet vizsgálatára JEOL JSM 840 szkennelési elektron mikroszkópon (SEM) történt (az MTA SZFKI segítségével). Az anyag mágneses tulajdonságainak a vizsgálatára Kerr-effektuson alapuló mérőberendezést alkalmaztunk (Safarik University, Kassa). A topográfia vizsgálatát NANOSZURF optikai topográf segítségével végeztük (AC²T Ausztriai Tribológiai Kompetencia Központ, Wiener-neustadt). A mikrokeménység mérésére Hanemann mikrovickers keménységmérőt, a szilárdsági tulajdonságok vizsgálatára pedig INSTRON 1095 szakítógépet használtunk. A termovíziós vizsgálatok AGEMA LWB-880 termovíziós rendszerrel készültek. A termikus folyamatok modellezésére MARC végelelemes szoftvert alkalmaztunk.

A vizsgálatokhoz a mintákat a követelményeknek megfelelően készítettük elő, a lézersugaras technológiai adatok tartományait, a korábbi vizsgálatok és előkísérletek alapján határoztuk meg.

A vizsgálatokhoz a mintsámat a reprodukálhatósági, és kiértékelhetőségi követelményeknek megfelelően határoztuk meg.

5. A lézeres jelölés technológiai folyamatjellemezőinek összefoglalása és a technológiával optimálható jellemzők kiválasztása

A lokális lézersugaras hőkezeléssel kialakított jel optimalizálása érdekében, meghatároztam a lézeres jelölés tulajdonságait befolyásoló tényezőket és a tényezők közötti összefüggéseket. Kölcsönös egymásra hatások összefoglaló halmazábrája a 4. ábrán látható.

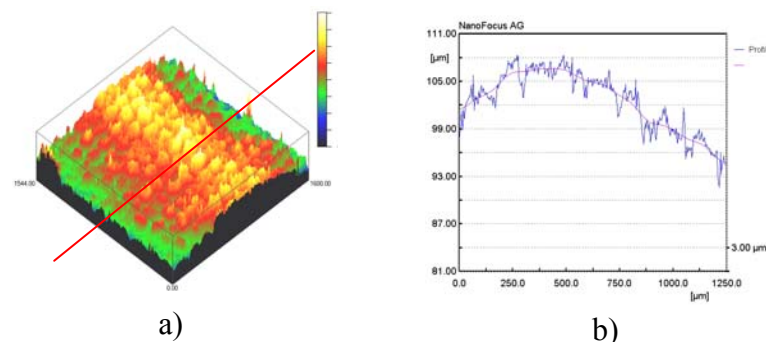


4. ábra Az optimális jelkialakulást befolyásoló tényezők

A felületi deformáció mentesség és a jelek keresztmetszeti alakja (mélység, szélesség) szempontjából nagy jelentősége van a jelölési teljesítménynek, foltátmérőnek és a pásztázási sebességnek. Ha túl kicsi fajlagos teljesítményt használunk a jelölésre, akkor nem alakul át az alapszövet olyan mértékben, hogy a szenzor érzékelné a szerkezetváltozást, vagy a jel termikus stabilitása nem megfelelő. A teljesítménysűrűség túlzott növelése viszont a felületi deformációk szempontjából hátrányos, így viszonylag behatárolt területen lehetett alkalmas technológiai adatokat választani.

6. A vizsgálatok eredményei

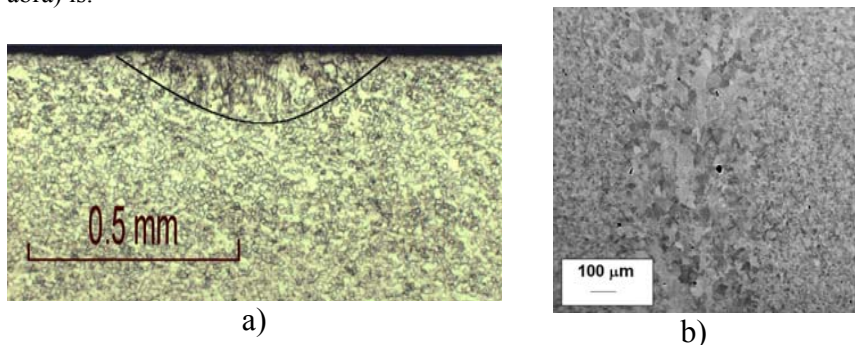
A vizsgálatok első fontos feladata az alkalmazott lézerteljesítmény-sugármozgatási sebesség-lézerteljesítmény meghatározása úgy, hogy a jelölés ne okozzon geometriai változást a lemez felületén. Az alkalmazott lézersugár teljesítmény 100; 150; 200; 300 W, a lézerteljesítmény 0,5; 1; 2 mm volt. A sugármozgatási sebességet a vasúti sínjelölésnél már sikeresen alkalmazott 1200 mm/perc értékre választottuk. Az alkalmazhatóság szempontjából a már előzőekben említett kritériumoknak megfelelően (kis helyigény, ezáltal keskeny jelszélesség, kis jeltávolság, gazdaságos kialakítás- kis lézerteljesítmény, nagy jelölési sebesség) határoztam meg azt a technológiai adathármaszt, melyek alkalmazásával egyértelműen és biztonságosan lehet a jeleket kiolvasni. A foltátmérőből kiindulva értékelhető eredmény 1 mm-es lézerteljesítmény esetén adódott, amelyhez 100 W CO₂ lézerteljesítmény és 1200 mm/sec sugármozgatási sebesség alkalmazása volt megfelelő. Kis (0,5 mm) lézerteljesítmény esetén a kiolvasás a meghatározott kiolvasóval és légréssel nem adott értékelhető eredményt. Az alkalmazott lézerteljesítménynek felső korlátot a lemezben okozott deformáció (esztétikai hiba) szab. Ez a teljesítmény 300 W. Ha a lézersugár elnyelés hatékonyságának növelésére abszorpciót növelő bevonó anyagot használunk (pl. grafit), akkor már a 100 W-os lézerteljesítmény esetén is felületi deformáció tapasztalható. Deformálódott lemezfelület 5.a), illetve a deformáció mértéke 5.b) látható az alábbi ábrákon.



5. ábra a) 100 W CO₂ lézerteljesítménnyel jelölt lemez 3D topográfiája deformációja. (grafitréteggel kezelt), b) keresztmetszeti képe

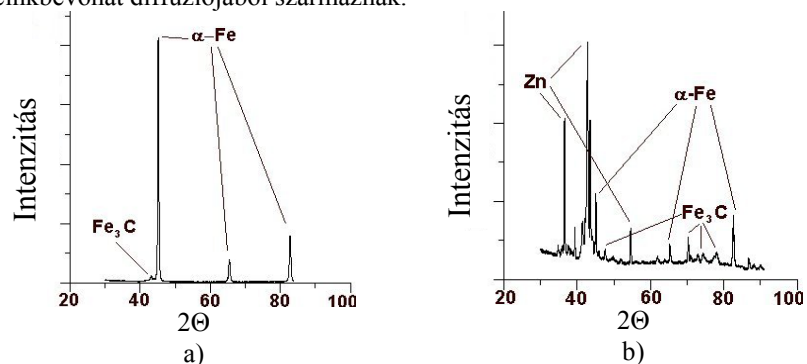
Az alkalmazott technológiai adatok (változatlan elnyelési körülmények között) meghatározzák a kialakítandó jel geometriai paramétereit (jelszélesség, jelmélység) is. A jelmélységnek fontos a szerepe az alkalmazott kiolvasási eljárásnál, a jelszélesség pedig hatással van a kialakítandó kódrendszer hosszára. A 6.a) ábrán a lokális lézersugaras kezelés hatására kialakult, szövetszerkezet változáson alapuló jel metallográfiai felvétele látható. A

lézersugaras kezelés hatására a hidegen hengerelt lemezben szemcsedurvulás tapasztalható, mely a hőkezelés hatására bekövetkező rekrisztallizációs folyamat eredménye. Ez a szemcsedurvulás jól látható a SEM felvételen (6.b ábra) is.



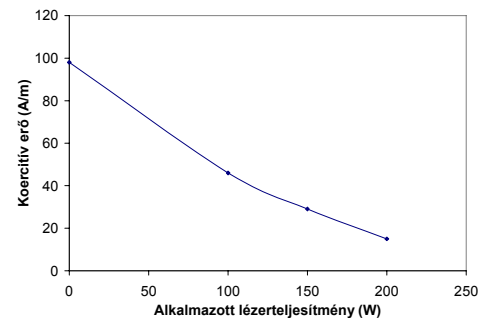
6. ábra a) A lézersugárral átalakított jelkeresztmetszet metallográfiai képe (maratás:nital), b) a lézersugárral kezelt felület képe (SEM)

Az 7. ábra a röntgendiffrakciós fázisanalízis eredményeit mutatja. Az a) ábra a jelöletlen, míg a b) ábra a lézersugárral kezelt térfogat fázisait mutatja. Az alaplemezben α -Fe és Fe_3C fázisok mutathatók ki, a jelölés hatására pedig Zn, $(\text{Mn,Fe})_{23}\text{C}_6$ és FeZn_{10} fázisok is megjelennek. Ez utóbbiak a felületen lévő cinkbevonat diffúziójából származnak.



7. ábra A röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálat eredménye a) alaplemez, b) lézersugárral felületkezelt lemez

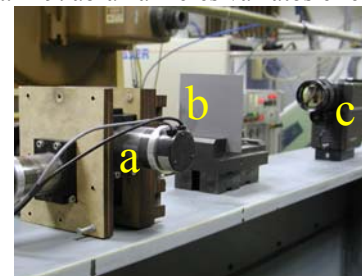
A mágneses tulajdonságok lézersugaras kezelés hatására bekövetkező helyi megváltozásának vizsgálata céljából elvégeztem az alapszövet, illetve a különböző lézerteljesítményekkel kialakított jelek Kerr-effektuson alapuló mágneses vizsgálatát [18,19]. A koercitív erő helyi változásának a tendenciáját az alkalmazott lézersugár teljesítmény függvényében a 8. ábra mutatja.



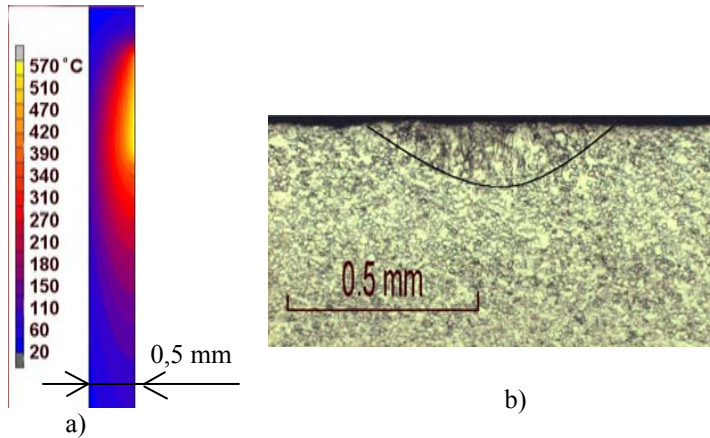
8. ábra A koercitív erő alakulása az alkalmazott lézerteljesítmény függvényében

Az eredményekből megállapítható, hogy a hőkezelések hatására a koercitív erő csökken, az eltérő szövetszerkezetű rész mágnesen lágyul.

A hőmérséklet térbeli és időbeli eloszlásának vizsgálata, a hőkezelési (jelölési) folyamat során lezajló és a jel geometriáját valamint az átalakulás minőségét befolyásoló hőmérsékletváltozás megfigyelésére termovíziós mérési eljárást dolgoztam ki. A hagyományos hőmérsékletmérő berendezések esetében közvetlen érintkezés szükséges a vizsgált felület és a mérőműszer között. Ez megváltoztathatja a felület hőcsere körülményeit és megváltozhatnak a vizsgált tárgy termikus viszonyai. Ezzel szemben a termovízió passzív vizsgálati módszer, amely nem avatkozik a test hőállapotába. Probléma még a lézersugár-alapanyag találkozási pontjában ébredő hőmérséklet mérése. Ennek közvetlen mérése nem lehetséges [32]. A hőmérséklet mérése közvetett módon történt. A hőmérséklet eloszlást a lemezek hátoldalán mértem a jelölési folyamat során. A sugármozgatásra a különleges mérési beállítás miatt a galvanotükrös rendszert használtam $f-\theta$ optikával. Az így kapott mérési eredményeket bemenő adatként használtam fel végeeselemes modellezéshez, mely segítségével meghatároztam a jelölési oldal felszíni hőmérsékletét. A 9. ábrán a mérés vázlatos elrendezése látható.



9. ábra A termovíziós mérőrendszer a felületi hőmérséklet méréséhez (a)-lézerforrás; b)-a vizsgált minta; c)-termokamera



10. ábra A 150 W lézerteljesítménnyel modellezett (a), valamint a valós jelölés (b) metszeti képe

A termovíziós mérési eredményeket a MARC végeeselemes szoftverrel meghatározott hőeloszlással vettem össze, úgy, hogy azok a metallográfiai képekkel egyező eredményt adtak.

Az alkalmazhatóság szempontjából fontos megvizsgálni, hogy a lézersugaras jelölés hatására hogyan változnak meg a lemez makroszkopikus mechanikai tulajdonságai. Ennek érdekében szakítóvizsgálatot végeztem. A szabványosan kialakított próbapálcá közepén alakítottam ki a lézeres jelet. A jelet 200 W, 1200 mm/sec, 1 mm foltátmérő paraméterekkel végeztem. A szakítás sebessége 5 mm/perc volt. Az elszakított próbadarabok képe a 11. ábrán található.



11. ábra A lézeresen kezelt lemezek képe szakítás után

Az alaplemezből és a lézeresen kezelt mintából is 3-3 darabot szakítottam el. A szakítási diagram alapján számolható anyagjellemzők értékei az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat Az alapanyag (R1-R3) és a lézeresen kezelt lemez (1-3) szilárdsági értékei

Minta	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	Fajlagos nyúlás (%)
R1	168,4	306,7	33,4
R2	155,2	304,4	32,4
R3	155,8	305,7	36,3
1 (200 W)	131,0	303,6	32,0
2 (200W)	155,4	304,9	30,5
3 (200W)	147,3	300,5	31,6

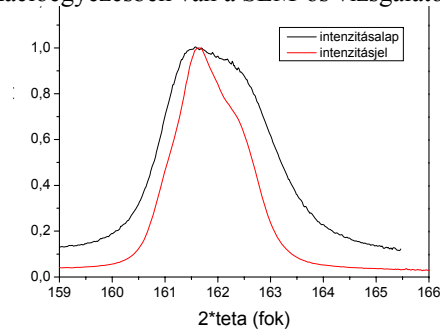
Az eredmények statisztikai értékelése alapján:

A szakítószilárdság alaplemez esetén: $R_m = 305,6 \pm 1,15 \text{ N/mm}^2$

A szakítószilárdság lézeresen kezelt lemez esetén: $R_m = 303 \pm 2,26 \text{ N/mm}^2$

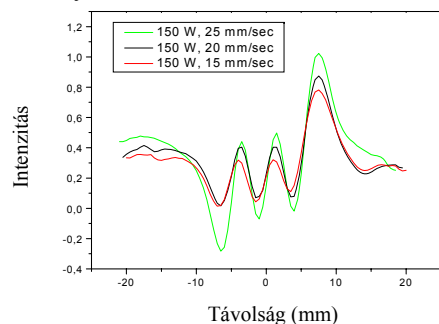
A mérési eredmények alapján kijelenthető, hogy az alkalmazott jelölés nem befolyásolja olyan mértékben a lemezt, hogy ez az alkalmazhatóságnak gátat szabjon.

A lézeres hőkezelés hatására kialakuló mechanikai feszültségek kimutatására optikai rétegbevonatos [31] röntgendifrakciós [24] módszert alkalmaztam. Kvalitatív következtetéseket az intenzitáscsúcsok félérték-szélességének elemzésével vonhatunk le (Félérték-szélesség: az intenzitásmaximum felénél a csúcs szélessége, FWHM-Full Width of High Maximum). A 12. ábrán látszik, hogy az alaplemez vonala szélesebb a lézeresen kezelt zóna vonalánál. A vonalszélesedést a szemcsehatás és diszlokációhatás (mikrofeszültség) okozza, ami azt mutatja, hogy lecsökkentek az anyagban a mikrofeszültségek és nőtt a kristallitméret. A kristallitméretre vonatkozó információegyezésben van a SEM-os vizsgálatok eredményivel is.



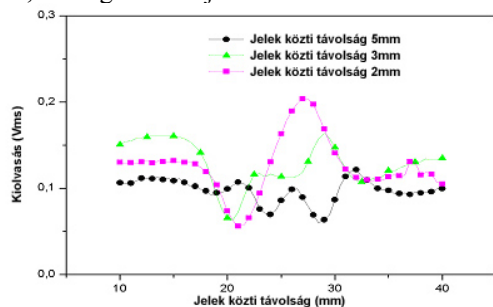
12. ábra: A θ szög függvényében felvett intenzitás-eloszlás integrális formában

Fontos technológia paraméter az állandó lézerteljesítmény esetén beállított pásztázási sebesség. A különböző sebességek esetén kapott kiolvashatósági eredményt a következő ábra szemlélteti.



13. ábra A különböző sugármozgatási sebességekkel végzett jelölés kiolvási eredménye

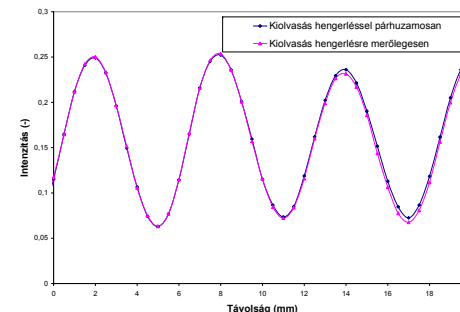
Az alkalmazott jelsűrűség szempontjából fontos volt annak a meghatározása, hogy a hőhatásövezetek átlapolódásának figyelembevételével mekkora az a legkisebb távolság, amelyet az alkalmazott szenzor egyértelműen megkülönböztet. 150 W lézer teljesítmény és 1 mm foltátmérő esetén a jeltávolságok függvényében a szenzor a 14. ábrán látható kiolvashatósági eredményt érzékelt. A kiolvási intenzitásdiagram a jelek egymás közötti távolságának minimális értékét is megadja intenzitásváltozáson alapuló jelkiolvás esetén, adott geometriájú kiolvásoszenzor alkalmazásakor.



14. ábra A különböző jeltávolságokkal végzett jelölés kiolvási eredménye

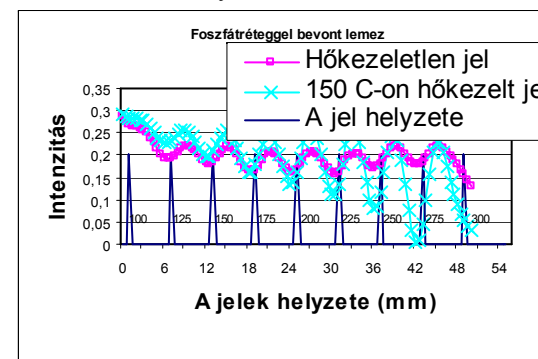
A vizsgált lemezeket hideghengerléssel készítik, amelyeket még a megmunkálás után tekercsben lágyító, újrakristályosító hőkezelésnek vetnek alá. A hidegalakítás során a lemezben texturált szemcsestruktúra alakul ki, amely a hőkezelés hatására eltűnik. A lemezben azonban maradnak nyomai az

anizotrópiának, amely befolyással lehet a kialakítandó jelölésrendszerre. A jelölésrendszer irányfüggőségének a feltárására úgy alakítottam ki mintadarabokat, hogy a feltételezett hengerlési iránnyal (mikroszkóppal kimutatható) párhuzamosan és merőlegesen is végeztem jelöléseket ($P=150W$, $v=1200$ mm/perc, $d=1$ mm, $L=6$ mm). A jelölést Fluxset szenzorral kiolvastam, a kiolvás eredménye a 15. ábrán látható. Az ábrából jól látható, hogy a hengerlési iránytól nem függ a jelkiolvás intenzitása, így a gyártás során a lemezekből különböző irányban kivágott munkadarabokon is alkalmazható a jelölésrendszer.



15. ábra A különböző hengerlési irányokban végzett jelölés kiolvási intenzitása

A jelölést követő technológiai folyamatok során különféle hőhatások léphetnek fel pl. festékbeégetés. A hatások jól modellezhetők izoterm hőkezelésekkel. A 16. ábra hőkezeletlen, valamint 150°C-on, 30 órán át hőtartott jelek kiolvási eredményeit mutatja be. Látható, hogy a tartós hőkezelés hatására a jelek kiolvási amplitúdója növekszik, így a jelkiolvás biztonsága a hőtartási körülmények között nem csökken.



11. ábra A jelkiolvás eredménye hőkezeletlen és 150 °C hőkezelt esetben különböző lézersugár teljesítmények esetén

Összefoglalás

Dolgozatom témája a lézeres jelölés és jelkiolvasás anyagtudományi háttérének kutatása kis karbontartalmú hidegen hengerelt vékony acéllemezek (BH karosszérialemez) esetén. A lokális lézeres hőkezelés hatására a lemez anyagának szemcséi eldurvulnak, ami a normál szerkezeti acélok hasonló kezelésénél nem szokványos. A BH acéloknál viszont -a szakirodalom szerint- a szemcsedurulás 950 °C körüli hőmérsékleten következik be és a méréseim szerint az anyag fel is hevül erre a hőmérsékletre a lézeres jelölés nyomán.

A szemcsedurult szövetrészen az anyag keménysége megnő, holott az anyag lágyulására számítottam. A lágyulás azért lett volna indokolt, mivel a lemez hideghengerléssel készült és a hőkezelés az alakítás hatására bekövetkezett felkeményedést csökkentené. A felkeményedés a hőkezelés hatására kialakuló új, kemény fázisok megjelenésével indokolható.

A mágneses tulajdonságok vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a hőkezelés hatására az anyagban a koercitív (H_c) erő csökken (mágnesesen lágyul az anyag). Ez az eredmény az előbb említett keménységnövekedéssel látszólag ellentétben van, mivel a mechanikai keménységnövekedés általában mágneses keménységnövekedést eredményez. Ez az eredmény azzal magyarázható, hogy a ferrit lágyul, ami a mágneses lágyulással összhangban van, a keménységnövekedést okozó fázisok mérete pedig annyira kicsi, hogy a mágneses változásra nincs hatással.

A hőkezelés hatására a diszlokációsűrűség csökken, ami az irodalom szerint is magyarázható jelenség a BH acélok körében.

Az előbb részletezett anyagszerkezeti változások alapján vizsgálatot végeztem az optimális jelölési teljesítménysűrűség, illetve az optimális jeltávolság meghatározására az örvényáramú jelkiolvasásnál alkalmazott Fluxset szenzor felbontóképességének a szempontjából. Kísérletben vizsgáltam a kialakult jelek termikus stabilitását, mely a lemezek festése során fellépő termikus hatások (festékebegetés) szempontjából fontos tényező. A mérések alapján a hőkezelés nem rontja a jelek kiolvashatóságát.

Mechanikai vizsgálatok segítségével megállapítottam, hogy az anyag szilárdsági tulajdonságai nem romlanak a jelölés hatására, ezáltal jelölés a lemezek alkalmazhatóságát nem befolyásolja.

Új tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

1.) Optimalizáltam a kis karbontartalmú ($C < 0,1\%$), (0,01...0,02)mm vastag cinkréteggel bevont vékony (~0,6mm), acéllemezek, (logisztikai célú, lokális szerkezet átalakuláson alapuló, vizuálisan nem feltétlenül látható) lézersugaras jelölési- és elektromágneses elvű kiolvasási rendszerének jellemzőit az alábbiak szerint: [S 8,9,10,13,14,17,18]

1.1. Meghatároztam az egyértelmű és biztonságos jelkiolvasáshoz tartozó legnagyobb jelsűrűséget - mint optimális jeltávolság - a teljesítménysűrűség (ezen belül: lézerteljesítmény, foltátmérő, pásztázási sebesség) mint jelölési paraméterek függvényében.

1.2. Meghatároztam a lézersugaras hőkezelés hatására kialakuló felületi információk termikus stabilitását, (esetleges technológiai folyamatok –pl. festés- során fellépő hőhatások esetére) a tartósan biztonságos jelkiolvasás érdekében.

1.3. Megállapítottam, hogy a lokális lézersugaras felületi hőkezeléssel kialakított információk kiolvashatósága a jelölt lemezek termo-mechanikus előéletére nem érzékeny.

2.) Meghatároztam a lézersugaras jelölés okozta helyi szerkezetváltozás hatását a jelkiolvasás alapjául szolgáló mágneses tulajdonságokra kis karbontartalmú, mikroötvözött, vékony, szerkezeti acél lemezanyagban. Megállapítottam, hogy CO_2 lézerrel, 1mm-es foltátmérővel, 1200mm/min sugármozgatási sebességgel végzett jelölés esetén (100...200)W teljesítmény tartományban a növekvő lézer teljesítmény a koercitív erő jelentős, az alapszövevethz képest mintegy 15 %-os csökkenéséhez vezet. [S5,7,15]

3.) A felületi lokális lézersugaras szerkezetátalakítás technológiai folyamatának végeselemes hőeloszlás modellezéséhez, termovíziós vizsgálati módszert dolgoztam ki a legfontosabb peremértékek meghatározására, amelyek segítségével a hőeloszlás időbeni és térbeni lefutása szimulálható. Kidolgoztam a technológia végeselemes szimulációs modelljét. A szimulációs eredmények jó egyezést mutattak a valós, mérhető eredményekkel. [S3,12]

4.) Meghatároztam a kis karbontartalmú vékony mikroötvözött szerkezeti acéllemezen az optimális lokális lézersugaras jelölés hatására bekövetkező minőségi és mennyiségi diszlokáció változásokat, valamint a feszültségváltozások tendenciáját. A diszlokációsűrűség a lézersugaras kezelés hatására mintegy felére csökken, valamint az alapanyagban domináns csavar-diszlokációk helyett többségbe kerülnek az él-diszlokációk. Ezek a változások a III. rendű maradó feszültség tartományba tartoznak. [S11,20]

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni munkatársaimnak, kollégáimnak, akik kutatómunkám során segítségemre voltak. Köszönetet mondok témavezetőmnek dr. Takács János professzor úrnak, aki a téma kutatási irányainak, módszereinek kiválasztásában segített. Külön köszönöm dr. Lovas Antalnak és dr. Borbás Lajosnak az eredmények kiértékelésében és dolgozat korrektúrájában nyújtott segítségét.

A vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségéért köszönetem fejezem ki a MTA MFA, MTA SZFKI, BME SZHVT, BME KGE, az ELTE TTK Általános Fizika Tanszék, az AC²T intézeteknek (Wiener-Neustadt), Safarik University Kassa, munkatársainak. (Dr. Vértesy Gábor, Gasparics Antal, Dr. Pogány Lajos, Varga István, Dr. Pávó József, Dr. Gyimóthy Szabolcs, Dr. Ungár Tamás, Dr. Cziráki Ágnes, Dr. Friedrich Franek, Sebestyén Tamás, Dr. Peter Kollár, Dr. Jozef Kovač, Dr. Dobránszky János, Dr. Mészáros István)

Továbbá köszönet a Metalelektronika kft.-nek és DDKKK-nak az ösztöndíj-támogatásért. A TÉT alapítványnak, amely a külföldi kutatómunkát segítette "Tribolasertechno" rövid címmel, valamint a NKTH-KPI GVOP 3.1.1. projekt támogatásért.

A téziszűzetben hivatkozott irodalom

- [1] Allaga Gy., Melis Z., Sárkány M., Viszkei Gy.: Vonalkódtechnika, Prim kiadó 1995 ISBN 963 04 5801 2 pp.11-12
- [2] J. Takács, R. Keszte, T. Markovits, G. Posgay, P. Molnár, J. Béli: Precision local laser heat treatments for producing information input, 3rd Laser Assisted Net Shape Engineering, Erlangen, Germany, 2001. pp.: 263-273, ISBN 3-87525-154-7
- [3] J. Takács, R. Keszte, T. Markovits, G. Posgay, P. Molnár, J. Béli: Precision local laser heat treatment for information input. Proc. of 18th Int. Colloquium, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Dresden 2001. pp.:59-64. ISSN 1433-4135
- [4] J. Takács, Gy. Posgay, P. Molnár, J. Béli, R. Keszte, T. Markovits: Diagnostics of thermal stress of rails, 10th International seminar of Track Maintenance Machines in Theory and Practice, Zilina, 2001 Oktober. pp.: 165-172, ISBN 80-7100-877-X
- [5] Béli J., Keszte R., Molnár P., Posgay Gy., Szamos A., Takács J.: Eljárás jelölés illetve jelölérendszer komplex kialakítására az anyagok szerkezetének, illetve belső feszültségeinek változtatásával és a jelek vagy jalsomagok roncsolásmentes kiolvasásával. (P97013123sz.), PCT/HU98/00073 sz. magyar szabadalmi bejelentés, USA Patent: Tracking Metallic Objects by Information Incorporated Threin, No. US 6,527,193 B1 Date: Mar. 4, 2003.
- [6] Szombathalvi Á.: A hőkezelés technológiája, Műszaki könyvkiadó Bp. 1985, pp:141, ISBN 963 10 6272 4
- [7] Takács J.(szerk.): Korszerű technológiák a felületei tulajdonságok alakításában, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004, pp: 346. ISBN 963 420 789 8
- [8] N. Rykalin, A. Uglov, I. Zuev, A. Kokora: Laser and electron beam material processing, Mir Publishers Moscow 1988, pp. 297-338 ISBN 5-03-0000-23-2
- [9] D. Schuöcker, Handbook of the Eurolaser Academy Vol. 2. Chapman and Hall 1998, pp. 314-349 ISBN 0 412 81920 1
- [10] Verő J., Káldor M.: Fémten, Tankönyvkiadó, Budapest 1977, ISBN 963 17 1798 4, pp. 254
- [11]Tóth F.: Örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálat, KFKI, Budapest, 1989, Kézirat
- [12] G. Vértesy, A. Gasparics, J. Szöllősy, "High sensitivity magnetic field sensor" Sensors and Actuators A, 85 (2000) 202
- [13] A. Gasparics, Cs.S. Daróczy, G. Vértesy, J. Pavo: Improvement of ECT probes based on Fluxset type magnetic field sensor", in "Electromagnetic

- Nondestructive Evaluation (II.)" pp. 146-151, R.. Albanese et al. (Eds.), IOS Press, 1998.
- [14] Vértesy G.: Mágneses szenzorok fejlesztése fémüveg szalagok alkalmazásával, Akadémiai doktori értekezés, MTA Budapest, 2001
- [15] J. Pávó, K. Miya, "Optimal design of eddy current testing probe using fluxset magnetic field sensors," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-32, No. 3, pp.1597-1600, May 1996
- [16] W. Bornhöfft, G. Trenkler, Magnetic Field Sensors : Fluxgate Sensors, Magnetic Sensors, Sensors Vol 5, Eds.: R. Boll and K.J. Overshott, VCH, Veiden, Germany, 1989
- [17] P. Ripka, Sensors and actuators A, 33 1992, 129
- [18] P. Kollár, Computer controlled magneto-optical hysteresisgraph, Proc. Of scientific conference , TU Kosice, 21-21 September 1999, 150-152
- [19] A. Hubert, R. Schäfer, Magnetic Domains, Springer 1998, pp. 26-31 ISBN 3-540-64108-4
- [20] Thamm-Ludvig-Huszár-Szántó: A szilárdságtan kísérleti módszerei, Műszaki könyvkiadó, Budapest 1968 pp 218-270
- [21] Borbás, L.: Fotoelasztikus rétegbevonatos mérési módszer használata gépalkatrészek vizsgálatánál és az eredmények értékelési lehetőségei. (*Investigation of machine elements using photoelastic coating technique, and the possibilities of the evaluation of the results.*) *Gép*, 37, 1986. nov. pp.: 359-363. (R. H.)
- [22] T. MARIN, G. NICOLETTO: Low-cost iron on grids applied to plastic strain analysis, 3rd YSESM Youth symposium on Experimental solid mechanics Poretta Terme (BO) Italy, 2004 pp. 5-6, ISBN 88-901080-8-8-44406
- [23] M. Stockmann, J. Naumann: Moiréinterferometry Technique and Application, 3rd YSESM Youth symposium on Experimental solid mechanics Poretta Terme (BO) Italy, 2004 pp. 1-2, ISBN 88-901080-8-8-44406
- [24] Szántó I.: Fémek rács szerkezeti változásainak mérése, mint a korszerű feszültséganalízis egyik módszere, Felsőoktatási jegyzetellátó vállalat, Budapest 1955,
- [25] Balogh L.: Nanokristályos réz termikus stabilitása, Diplomamunka ELTE TTK, Általános Fizika Tanszék, Budapest 2004
- [26] T. Ungár, J. Gubicza, G. Ribárik, A. Borbély: Crystallite size distribution and dislocation structure determined by diffraction profile analysis: principle and practical application to cubic and hexagonal crystals, *J. of Applied Crystallography* 34, 2001, pp.
- [27] G. Ribarik, T. Ungar and J. Gubicza, J.: MWP-fit: a program for multiple whole-profile fitting of diffraction peak profiles by ab initio theoretical functions, *Appl. Cryst.* (2001). 34, 669-676
- [28] T. Ungar: Microstructural parameters from X-ray diffraction peak broadening, *Scripta Materialia* 51 (2004) 777-781
- [29] W. M. Steen: Laser Material Processing; Springer-Verlag, Berlin, 1991 - p.: 266, ISBN 0-540-19670-6
- [30] Keszte Róbert: Lézeres felületkezelések egyes jellemzőinek meghatározása roncsolásmentes módszerekkel, Diplomamunka, 1995
- [31] Borbás, L., Ballon, I., Péntek, L.: Improvement of the measurement parameters of force transducers using photo elastic coating technique. *Österreichische Ingenieur und Architekten Zeitschrift. (ÖIAZ)* 1991. 136.évf. 7/8.szám. pp.:331-335. (R. L. H.)
- [32] Sklánitz Antal: A technológiai lézerek alkalmazásának vizsgálata, Doktori értekezés, BME, Közlekedésmérnöki Kar, 1996
- [33] Vladimír Kraus, Atlas diagramu, SNTL, Praha, 1964

A témával kapcsolatos publikációk a pályázó közreműködésével:

1. A. Lovas, **Z. Kalincsa**k, and R. Kohl b: Dilatometric study of structural relaxation and devitrification process in FeNbSiBCu glassy alloy, 17th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Zielona Gora 2000.
2. **Z. Kalincsa**k, A. Lovas: Diffusionless and diffusion controlled process during amorphous-nanocrystalline transformation of FeNbSiBCu precursor monitored by dilatometric measurements. Proc. of 18th Int. Colloquium, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Dresden 2001., pp.:41-46. ISSN 1433-4135
3. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, N. Bohuny: Analysis of laser marking on Fe-C steel using finite element method, 17th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Pardubice 2002, pp.70-75, ISBN 80-7194-449-1
4. **Z. Kalincsa**k, J. Takács: Mikrohardness and structural characterisation of laser irradiated surface layers in carbon steels before and after stress relaxation, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 2002, ISSN 0943-7207
5. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, L. Pog ny: The construction and development of a sample holder for the observation of ferromagnetic domain structure at elevated temperature, 20th International Colloquium, "Materials Technologies, Design, Maintenance- Application in the Field of Transportation", Zilina, 2003., ISBN 80-8070-074-5.
6. A. Lovas, B. Varga, L.F. Kiss, L. Nakonechna, **Z. Kalincsa**k: The evolution of soft magnetic properties and the related density change during amorphous-nanocrystalline transformation. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 254-255 (2003) *Imp.fakt.: 1,046*
7. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, G. Vértesy, A. Gasparics: Local domain structure on the surface of carbon-steels in the vicinity of laser markings, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54 (2004)
8. **Kalincsa**k Z., Takács J.: V d r teg alatt is  szlelhet  l zerrel  rt információk, G pgy rt s, XLIV.  vf. 2004. 1. sz m, HU ISSN 0016-8580, pp.: 8-12
9. **Kalincsa**k Z., Takács J.: L zerrel  rt információk, melyek fest kr teg alatt is  szlelhet k, Magyar M szaki Magazin, 2003 m jus, pp.: 71-72, ISSN: 1588-9300
10. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, G. Vértesy, A. Gasparics: The optimisation of laser marking signals for eddy current detecting of marks, Laser Assisted Net Shape Engineering 4, Erlangen, 2004. september 21-24., pp.:535-544 in Volume 1, ISBN 3-87525-202-0
11. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, L. Borbás: Local stress detection in low carbon steels by using fotostress analysys, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Balatonf red, 2004. may 17-19., pp.:174-178, ISBN 963 420 796 0
12. **Z. Kalincsa**k, A. Szil gyi, J. Takács,: Thermovision monitoring on laser marking process, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Czestochowa, 2005. may 18-20., pp.:61-66, ISBN 80-8070-393-0
13. P. Ozsv th, J. Takács, T. Markovits, **Z. Kalincsa**k, Analysis of laser marking caused microstructural transformation in steel, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Czestochowa, 2005. may 18-20., pp.:73-78, ISBN 80-8070-393-0
14. A. Szab  , **Z. Kalincsa**k, J. Takács,: Parameters optimisation of laser marking, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Czestochowa, 2005. may 18-20, pp.:85-90, ISBN 80-8070-393-0
15. **Z. Kalincsa**k, J. Takács, P. Kollár,  . Czir ki: Surface magnetization, grain and domain structure in laser scribed soft magnetic sheets, TO be published
16. A. SZAB , **Z. KALINCSA**K, J. TAKÁCS, F. FRANEK, L. TÓTH: The tribological study of degradation of laser marked rail surfaces, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Kollm, 2006. may 10-12., pp.:85-90, ISSN 80-8070-393-0
17. **Kalincsa**k Z., Takács J.: Egy  j módszer, a l zer jelölés a személyg pkocsi gy rt s logisztik jában, 33. Aut busz Szak rt i Tan cskoz s Nemzetk zi G pj rm biztons gi Konferencia, 2002. szeptember 02-05., CD-ROM, 5. szekci : Gy rt s, technológia, ISBN 963 9058 17 3
18. S. Gyimothy, A. Gaspalics, **Z. Kalincsa**k, J. Pavo, I. Sebestyen, G. Vertesy, J. Takacs, H. Tuboi, "Electromagnetic Reading of Laser Scribed Logistic Markers on Metallic Components," The 11th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE), 14-16 June, 2006, Iwate, Japan.
19. Takács J., **Kalincsa**k Z., Ozsv th P.: LÉZERSUGARAS JELÖLÉSEK ILAS 2006, okt.11., Budapest, ISSN
20. **Z. Kalincsa**k, L. Balogh, L. Borbás, J. Takács, STRESS ANALYSIS OF LASER MARKED LOW CARBON STEEL, ICEM13 Conference, Alexandroupolis, Greece, July 1-6, 2007, ISBN 978-1-4020-6238-4