

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR



A LÉZERES FELÜLETEDZÉS FOLYAMATIRÁNYÍTÁSA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:
ROWSHAN REZA
OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

GÉPÉSZMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK DOKTORI PROGRAM,
GYÁRTÁSI FOLYAMATOK ALPROGRAM,
MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁK RÉSZPROGRAM

DOKTORI PROGRAMVEZETŐ:
DR. PÁCZELT ISTVÁN
AZ MTA RENDES TAGJA
A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA

DOKTORI ALPROGRAM VEZETŐ:
DR. DUDÁS ILLÉS
A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA

DOKTORI RÉSZPROGRAM VEZETŐ:
DR. TISZA MIKLÓS
A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:
KOCSISNÉ DR. BAÁN MÁRIA
EGYETEMI DOCENS

MISKOLC
2007

Rowshan Reza

A lézeres felületedzés folyamatirányítása

PhD értekezés tézisei

Miskolc
2007

1. Bevezetés

Számos szerkezeti anyag tulajdonságait változtathatjuk meg előnyösen megfelelő hőkezelési eljárás alkalmazásával. A hőkezelési módszerek közül az elmúlt évtizedekben a felületkezelés került a figyelem középpontjába, mivel ez az eljárás lehetőséget kínál a stratégiaiilag fontos anyagokkal való takarékosagra, illetőleg differenciált, optimális felületi és térfogati tulajdonságokkal rendelkező alkatrészek létrehozására.

Edzhető ötvözetek, különösen a szénacélok, gyengén ötvözött acélok és öntöttvasak esetében a legvonzóbb lehetőségeknek a lokalizált edzési technikák alkalmazását tekinthetjük. Ebben az esetben a teljes alkatrész hevítése helyett (ahogy azt a teljes átedzés során tesszük), csak a felületi réteget ausztenitesítjük és eddük. Ezáltal a térfogati tulajdonságok, különösen a szilárdság és a szívósság, változatlanok maradnak, és az alkatrészek torzulásának lehetősége a minimálisra csökken.

A lézeres felületedzés, amely a lézersugarat hőforrásként használja - hasonlóan más lokalizált edzési eljárásokhoz, mint például a lángedzés, az indukciós edzés és az elektronsugaras edzés - az acél felületét célzottan hőkezeli egy bizonyos mélységben, amíg az eléri az ausztenitesítési hőmérsékletet, majd edző hatású hűtést alkalmaz a martenzites állapot elérése érdekében.

Bár a lézeres felületedzés egyike volt a lézer ipari alkalmazásaiban elsőként bevezetett anyagmegmunkálási módszereknek, az eljárásban rejlő lehetőségeket még nem aknázták ki kellőképpen. Az okokat elsősorban az eljárással kapcsolatos ismeretek hiányosságaiban kell keresnünk¹ köszönhetően az eljárás összetettségének, másrészt a sokkal ismertebb felületedzési eljárások elterjedtségének, amelyek kereskedelmi szempontból elérhetőbbek és természetesen nem elhanyagolhatóan hátráltatják a lézeres eljárások szélesebb körű alkalmazását az eszközök magas költségei sem. A nagy hevítési és hűlési sebesség teszi ezt az eljárást figyelemreméltóan komplex mérnöki feladattá. A lézerforrás, a lencsék és a szoftverek technológiájában napjainkban véghezvitt jelentős fejlesztések eredményeként az eljárást egyre előnyösebb színben láthatjuk más, versenytársnak számító eljárásokkal összehasonlítva.

A végeselemes módszer (VEM), mint numerikus módszer és hatékony matematikai eszköz, alkalmas az eljárás leglényegesebb folyamatainak leírására. Alkalmazásával lehetőség nyílik az optimális technológiai paraméterek meghatározására a méretükben és alakjukban rendkívül széles skálán változó alkatrészek kezeléséhez.

Jelen kutatómunka célja, hogy mélyebb bepillantást engedjen a lézeres felületedzési eljárás meghatározó mechanizmusaiiba, és hogy a SYSWELD VEM szoftver - a lézeres felületedzés folyamatirányítását támogató numerikus eszköz - segítségével új, hatékonyan alkalmazható modelleket fejlesszen ki.

¹ J. C. Ion, Laser Transformation Hardening, Surface Engineering 2002, Vol. 18 No.1, pp. 14-31.

2. A kutatás előzményei

Amikor egy anyag felületét egy mozgó lézerforrással gyorsan felhevítjük, az alkatrész belső tömege felé irányuló hővezetés által gyors hűlés következik be a lézersugár áthaladása után. Az eljárási paraméterek helyes megválasztásával a fázisátalakulásokat megfelelően lehet kontrollálni annak érdekében, hogy nagy szilárdságú martenzit jöjjön létre a felületi réteg adott mélységében.

Az eljárási paraméterek - amelyek együttesen az edzhető acél meghatározott hevítési és hűlési sebességét eredményezik – az alábbiak:

- a lézersugár teljesítménye,
- a lézerforrás és a munkadarab egymáshoz viszonyított sebessége (előtolási vagy letapogatási sebesség),
- a munkadarab azon területének alakja és mérete, amelyre a lézersugár hatást gyakorol (lézerfolt),
- teljesítményeloszlás a lézersugár keresztmetszetén.

A lézer-anyag kölcsönhatás eredményeképpen a fent említett eljárási paraméterek mellett számos tényező befolyásolja a hőmérsékleteloszlást a munkadarab felületi rétegében, beleértve az anyagok abszorpciós tényezőjét, a kezelt anyag tulajdonságait (mint például a hővezető képesség, a fajhő és az emissziós tényező), valamint a munkadarab alakját és méretét. A fenti paraméterek ismeretében a kezelt munkadarab hőtani viselkedését az irodalomban megtalálható analitikus összefüggések segítségével elemezhetjük. Ezek a kifejezések, kevés kivétellel, a hevítési folyamat idealizált modelljeiből erednek, a hőáramra és a munkadarab méretére vonatkozó korlátozásokkal. Ennek eredményeképpen nem alkalmasak a munkadarabon jelentkező él- és sarokhatás kiszámítására, ahol a hőáram koncentrálódik. További hiányosság, hogy az eddig kidolgozott, javasolt modellek többsége nem veszi figyelembe a fémek hőtani tulajdonságainak hőmérsékletfüggését.

A valóságban a hődiffúziót háromdimenziós jelenségnek kell tekinteni, a munkadarab méretei összevethetők lehetnek a lézerfolt méretével, emellett a fémek hőtani tulajdonságai, különösen a munkadarab hővezető képessége pedig hőmérsékletfüggő. Mindemellett a kifejlesztett modellek többsége a kvázi-statisztikus állapotban lejátszódó folyamatok tanulmányozására szolgál, míg a munkadarab hőtani viselkedésének valós körülmények közötti vizsgálatához egy teljességgel időfüggő modellt kell alkalmazni.

Mindezeken felül időnként szükségessé válhat komplex alakzatú lézerfolt alkalmazásának, vagy az edzési rétegek átlapolódásának, illetve a munkadarab geometriai egyenetlenségeinek figyelembevétele is.

3. A kutatás célkitűzései

Ezen kutatás keretein belül egy végeselemes szoftvert – a SYSWELD programcsomagot – használtam numerikus eszközként az alábbi célkitűzések elérése érdekében:

- a szimulációk hőtani eredményeinek segítségével megfelelő kapcsolat teremtésére a kimenő és a bemenő paraméterek között, továbbá a lézeres felületedzés optimális paramétertartományainak (operating regions - működési tartományok) meghatározására kvázi-statisztikus állapotok esetén,
- a lézeres felületedzési folyamatok során alkalmazható új optimális szabályozási stratégia bemutatására, amelynek lényege, hogy a bemenő lézer energiát szabályozzuk az előírt hőmérséklet intervallum elérése, vagy a munkadarab bármely pontján egy adott, állandó hőmérséklet elérése érdekében,
- a lézeres felületedzési eljárások átlapolódási jelenségeinek részletes vizsgálatára, figyelembe véve a lehetséges fázisátalakulási és megeresztési folyamatokat.

Az ipari alkalmazás szempontjából igen nagy jelentőséggel bírnak az imént felsorolt megoldások. A numerikus számításokra alapozott optimális működési paramétertartomány meghatározhatósága hozzájárulhat a lézeres felületedzési folyamatok sokkal hatékonyabb és szélesebb körű alkalmazásához. A hőmérsékletnek a teljes folyamat során történő szabályozása hatásos eszköze lehet annak, hogy elkerüljük a felület megolvadását, mialatt biztosítjuk az ausztenitesítési hőmérsékletet a munkadarabon egy kívánt mélységben. Tanulmányozhatjuk és szabályozhatjuk a lézersugarak átlapolódását, ami hengeres munkadarabok felületkezelése során a nyomvonal határán jelentkezhethet, vagy nagy méretű sík felületek kezelése során az átlapolódási zónában az egymást követő párhuzamos nyomvonalak között jelenik meg.

4. A kutatómunka során alkalmazott módszerek

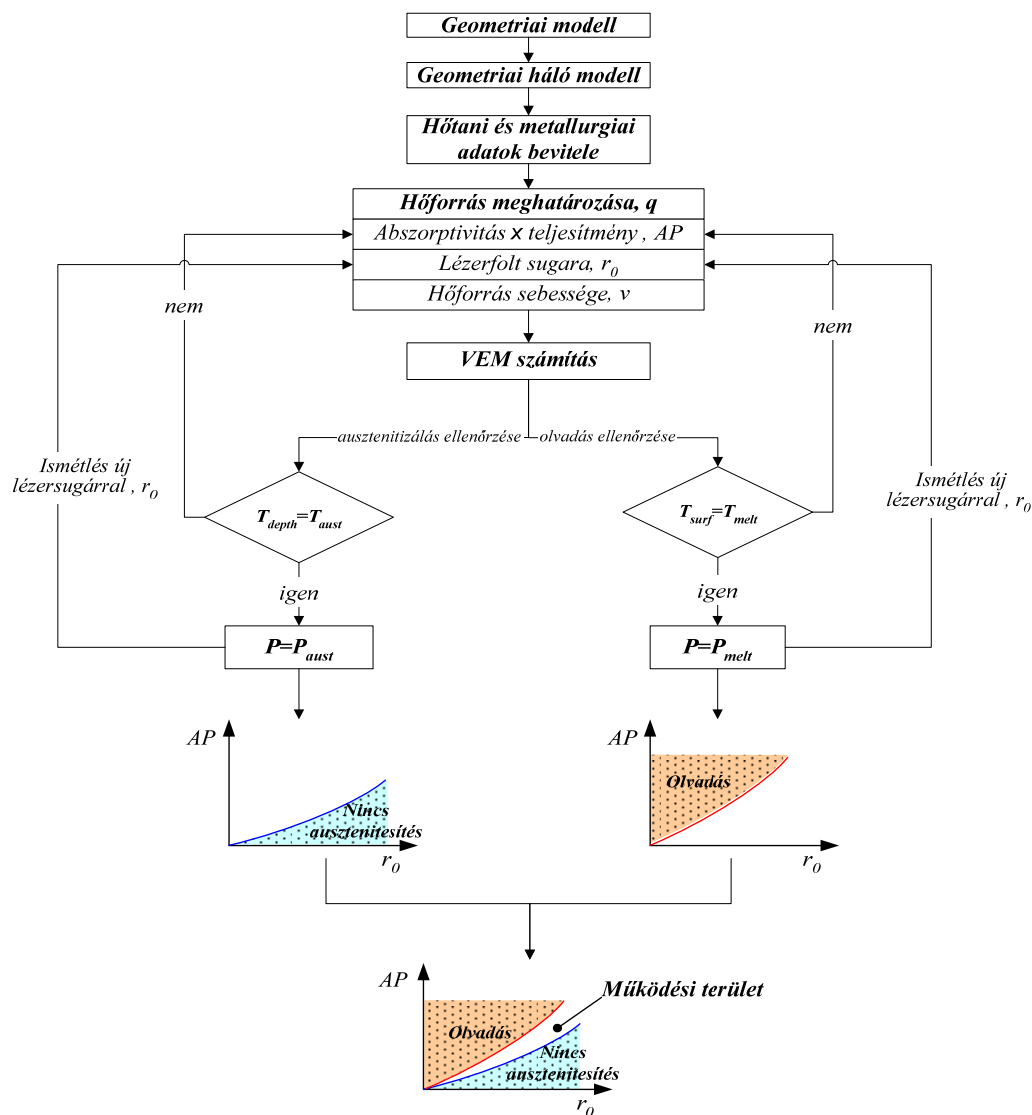
A kutatómunka során a SYSWELD VEM szoftvert alkalmaztam a lézeres felületedzési folyamatok numerikus modellezéséhez. Elegendő kísérletet végeztem el minden modellezési eljárásra vonatkozóan annak érdekében, hogy megbízható modellezési eredményekhez juthassak.

Háromdimenziós tranziens kapcsolt termo-metallurgiai elemzésekre építve egyedi nyomvonalak lézeres felületedzése során az eljárási paraméterek különböző változataival különböző modellek szimulációját végeztem el. A szabályozás két követelmény figyelembevételével történik, nevezetesen: el kell kerülnünk a felület megolvadását, mialatt biztosítanunk kell az ausztenitesítési hőmérséklet elérését a munkadarab felületi rétegének kívánt mélységében. A szimulációs eredményekre építve határoztam meg a biztonságos működési tartományokat (operating window) kvázi-statisztikus állapotokra, amelyekben a folyamat feltethetően állandósult állapotban zajlik a lézersugár mozgási iránya mentén (*1. tézis*).

Az anyagszerkezeti átalakulásokhoz kapcsolódó végeselemes hőtani elemzés általában a geometria és a háló előkészítésével kezdődik, amelyet a Grafikus Felhasználói Interfész segítségével végzünk, majd meghatározzuk a kezdeti- és peremfeltételeket és definiáljuk az anyag hőtani és fázisátalakulási tulajdonságait.

A hőforrást, amely egy meghatározott nyomvonalon halad, az idő- és térkoordináták függvényeként határozzuk meg, hőáramsűrűség bevitellel modellezzük, amit minden egyes felületi elem Gauss pontjához hozzárendelünk. Egy ilyen modell lehetővé teszi, hogy a

hőbevitel mértékét pontosan meghatározzuk a mozgásnak és ezáltal a hőforrás helyének megfelelően. Ebben a tanulmányban a hőforrást, amelyet egy leegyszerűsített FORTRAN rutin segítségével vezetünk be a rendszerbe, Gauss-féle eloszlásként modellezzük. A szimuláció folyamatábráját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra Szimulációs eljárások egyedi nyomvonalak esetén, az állandósult állapotú lézeres felületedzés optimális paramétertartományának meghatározására

Nem állandósult állapotú folyamatok esetén, a lézeres felületedzést tekintve nagyon fontos, hogy megoldást keressünk a következő nehézségekre:

- a folyamat kezdeti és végső pillanatai, más szóval a tranziens állapotok,
- geometriai problémák, amelyek abból adódhatnak, ha nagyon közel halad el a lézersugár a munkadarab széléhez vagy sarkaihoz,
- a komplex, bonyolult geometria kezelésére,
- a lézersugarak átlapolódásának szükségessége (korábbi hőtani hatások befolyásának figyelembe vétele).

Nyilvánvaló, hogy a hőmérséklet szabályozása a folyamat során hatásos eszköz lehet és alkalmazható különböző hőtani mezőkben. A 2. tézis új eredménye az optimális hőmérsékletszabályozási stratégia kifejlesztése a lézeres felületedzésre, a Rendszer Interfész Nyelv (SIL) használatával. A SIL egy kommunikációs interfész nyelv a felhasználó és a SYSWELD VEM szoftver között.

Mivel a lézeres felületedzés során a lézersugár mozgási sebességét (letapogatási sebesség) általában állandó értéken tartjuk, a legfontosabb szabályozható paraméter a bevitt lézerenergia. A módszer lényege, hogy a bevitt lézerenergia szabályozása révén egy állandó hőmérséklet intervallum elérését, vagy a munkadarab bármely pontján egy általunk meghatározott állandó hőmérséklet elérését garantáljuk. A szimuláció eredményeképpen egy állandó hőmérséklet intervallumot kapunk egy kiválasztott csomópont csoportra vonatkozóan. Egy szöveg fájl tartalmazza a változó maximális hőáramsűrűséget (q_0), az idő függvényében (2. tézis).

A hőmérsékletszabályozási stratégia lépései a geometriai modellel és a hálózással kezdődnek, amely után a hőtani és metallurgiai fázisátalakulások meghatározása kell következzen. A hőforrást Gauss-féle hőeloszlásként modellezzük. A SIL program indításához el kell végeznünk egy számítást a 0 időpontra vonatkozóan. A programban meghatározzuk az elvárt állandó hőmérsékletet ($T_{constant}$), amelytől a $\pm \Delta T$ -vel való eltérést elfogadható hőingadozásnak tekintjük. Ezt a hőmérséklet korlátozást alkalmazzuk bármely tetszőleges csomópont csoportra, amelyet a VEM kóddal már létrehoztunk. Ezen feltételrendszer meghatározása alapján a végeselemes analízis elindítja az első időbeli lépést és kiszámítja minden csomópont hőmérsékletét, amikor elindul a SIL program és a hozzá kapcsolódó fájlok. A következő szakaszban a program megkeresi a meghatározott csomópont csoport(ok)ra kiszámított maximális hőmérsékletet (T_{max}) és összeveti a $T_{constant}$ értékével. Amennyiben a maximális hőmérséklet egyenlő a $T_{constant}$ értékkel, vagy a $T_{constant} \pm \Delta T$ intervallumon belül található, a hőáramsűrűséget és a megfelelő időt a program kinyomtatja egy szövegfájlba és a számításokat folytatja a következő időbeli lépéssel egészen addig, amíg a folyamat utolsó lépéséhez nem ér.

Amennyiben a T_{max} nem egyenlő a $T_{constant}$ -tal vagy nem található a $T_{constant} \pm \Delta T$ intervallumban, két lehetőséget kell figyelembe venni: $T_{max} > T_{constant} + \Delta T$ és $T_{max} < T_{constant} - \Delta T$. Ha $T_{max} > T_{constant} + \Delta T$, a program automatikusan megváltoztatja a maximális hőáramsűrűség értékét (q_0), és a következő iteráció bemenő adataként ezt az új maximális hőáramsűrűség értéket alkalmazzuk q_{0new} , melyet az alábbi képlet szerint számítunk:

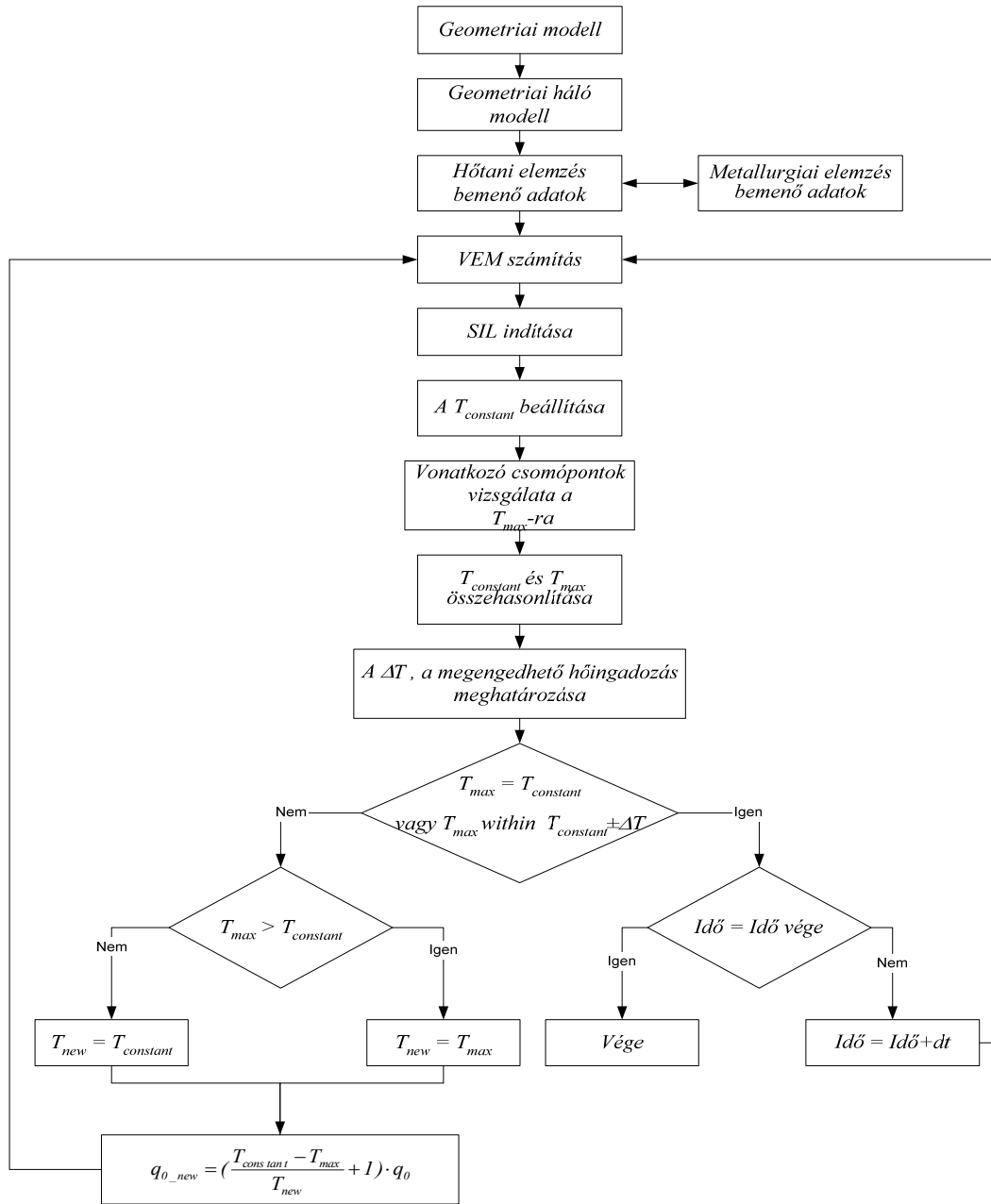
$$q_{0new} = \left(\frac{T_{constant} - T_{max}}{T_{max}} + 1 \right) \cdot q_0. \quad (1)$$

A másik esetre, azaz ha $T_{max} < T_{constant} - \Delta T$, a módosított q_{0new} értékét az alábbi képlettel számítjuk:

$$q_{0new} = \left(\frac{T_{constant} - T_{max}}{T_{constant}} + 1 \right) \cdot q_0. \quad (2)$$

A hőmérsékletszabályozási stratégia szimulációjának folyamatábráját a 2. ábra szemlélteti. Egy állandó hőmérsékleti intervallum figyelembevételéhez a számítást oly

módon kell elvégeznünk, hogy ne lépjük túl a $T_{constant}$ intervallum alsó és felső határát. Ezzel a módszerrel a munkadarab bármely pontjának hőmérsékletét szabályozhatjuk, tekintet nélkül a geometriára, az anyag- és folyamatparaméterekre.



2. ábra A hőmérsékletszabályozási stratégia folyamatábrája

A hőmérsékletszabályozási stratégiát alkalmazva szemléltettem az egyedi nyomvonalak lézeres felületedzésének olvadási és ausztenitesítési határgörbéit nem állandósult állapotokra, az eljárási paraméterek, úgymint a lézerfolt sugarának és a letapogatási sebességnek a függvényében.

A továbbiakban ezt a stratégiát a lézeres felületedzési folyamatok során felmerülő különleges nehézségek esetében is alkalmaztam. Erre a stratégiára épülő megoldásokat

mutatok be a tranziens állapotokra, a munkadarab éleinél jelentkező problémákra valamint a komplex geometriával rendelkező munkadarabok problémáira. Kimeneti eredményként a maximális hőáramsűrűség változását határozzuk meg az idő függvényében, ebből származtathatjuk a teljesítmény változtatásának idő vagy az elmozdulás függvényében meghatározott előírásait. Így a nem állandósult állapotok esetében is bevezethetjük az optimális paramétertartományra történő szabályozást (az optimális működési tartományt) annak érdekében, hogy elkerüljük a felület megolvadását és elérjük az ausztenitesítési hőmérsékletet a kívánt mélységben.

Amikor a lézeres felületedzésnél egymást követően több párhuzamos nyomvonalban folyik a kezelés, normál körülmények között, állandó értéken tartott eljárési paraméterek esetén is egyre magasabb lesz a felületi hőmérséklet az egymást követő nyomvonalakban, mivel a korábbi nyomvonalak lézeres kezelése során elnyelt hő fokozatosan előlegeíti a munkadarabot. Ennek következtében több lézeresen kezelt nyomvonal esetén a hőmérsékletingadozás inhomogén mikroszerkezet kialakulását és a felület megolvadását eredményezheti. A hőmérsékletszabályozási stratégia alkalmazásával bemutattam, hogy a felület hőmérséklete az olvadási hőmérséklet alatt tartható. Ezen túlmenően a többsávós lézeres felületedzés során végbemenő minden lehetséges fázisátalakulást modelleztem, beleértve a megeresztési hatást is, amely ebben az esetben nemkívánatos jelenségnek számít.

Annak érdekében, hogy numerikusan modellezzük az acélok megeresztését, feltételezzük, hogy a keménységet leíró kinetikus egyenlet a következő: $HV_t = f(p_g)$, ahol a HV_t a megeresztés utáni pillanatnyi keménység, f egy megfelelően kiválasztott függvény és p_g az úgynevezett megeresztési paraméter, amelyet a megeresztési folyamatok leírásánál szokásos alkalmazni. A legáltalánosabban használt Hollomon és Jaffe² féle formulát alkalmaztam megeresztési paraméterként. Egy meghatározott acélra az irodalomban megtalálható keménység és a Hollomon és Jaffe féle paraméter közötti összefüggést ábrázoló görbét matematikailag közelítettem. Ezek után számítottam a keménység görbéket az idő függvényében, különböző megeresztési hőmérsékletekre. A megeresztés mértékét az idő függvényében vezettem le az előző görbékből. Az alkalmazott módszer egyszerűsítő feltételként úgy tekinti az eltérő mértékben megeresztett szerkezeteket, mintha azok kétféle alkotórész eltérő arányú keverékei lennének: bizonyos hányaduk „teljesen megeresztett” mikroszerkezet, a fennmaradó rész pedig „változatlan” szövetszerkezetnek felel meg. Más szóval „fiktív fázisként” határoztam meg a megeresztett szerkezetet a SYSWELD VEM szoftverben, és különböző időkre t_i a megeresztett szerkezet arányát $p_{tempered}$ számítottam.

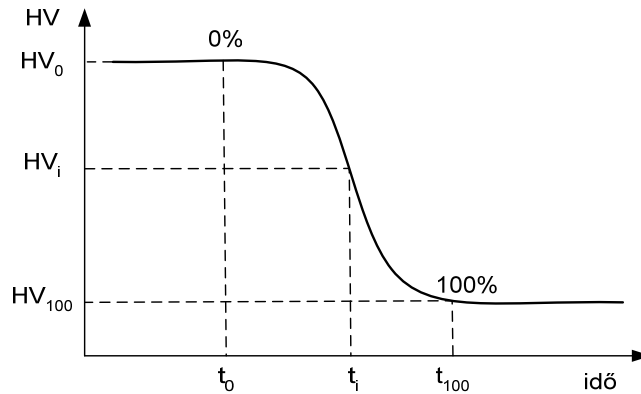
A $p_{tempered}$ arányt a keménységértékek arányából határozhatjuk meg, bevezetve a $\Delta HV = HV_0 - HV_{100}$ és $\Delta HV_i = HV_i - HV_{100}$ jelöléseket a következő egyenlettel:

$$p_{tempered} = \frac{\Delta HV - \Delta HV_i}{\Delta HV}, \quad (3)$$

ahol HV_0 a martenzit keménysége, HV_{100} a 100%-osan megeresztett martenzit keménysége és HV_i a t_i időben megeresztett szerkezet keménysége, amint azt a 3. ábra szemlélteti.

² J.H.Hollomon and L.D.Jaffe, Time-Temperature Relationships in Tempering Steel, Trans. AIME, Vol. 162, 1945, pp.223-249.

Végül, a megeresztési szerkezetek modellezésének bemenő adataiként használható, különböző hőmérsékletekre vonatkozó $p_{tempered} = f(time)$ görbéket határozhatjuk meg.



3. ábra Egy megeresztett szerkezet keménységének vázlata az idő függvényében

A megeresztett szerkezet vagy „fiktív fázis” arányát a gyakran használt Johnson Mehl Avrami formula egyszerűsített formájával számítjuk:

$$p_{tempered} = p_{eq} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad (4)$$

ahol p_{eq} a megeresztett szerkezet végtelen időhöz rendelhető aránya és τ az inkubációs idő, amely a diffúziós folyamat megindulásához szükséges.

A teljesen megeresztett szerkezeteknél indokolt figyelembe venni azt a tényt, hogy a keménység egyenértékű a szferoiditével, tehát a „keverék” keménységét a SYSWELD VEM szoftverbe beépített számítási módszerrel határozzuk meg.

5. Új tudományos eredmények - Tézisek

1. Az egyedi nyomvonalak lézeres felületedzésére vonatkozó hőtani, metallurgiai és keménység elemzések numerikus modellezése alapján a következő új eredményekre jutottam: [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]
 - 1.1. Meghatároztam egy stabil eljárási paramétertartományt (működési tartományt) a lézeres felületedzés állandósult állapotaira, amely megfelelő lézeres teljesítményként adható meg a lézersugár rádiuszának és az előtolási sebességnek a függvényében.
 - 1.2. Bebizonyítottam, hogy ez az eljárási paramétertartomány alkalmas arra, hogy meghatározzuk a lézerfolt rádiuszának változását (r_0) eltérő lézeres letapogatási sebességeknél (v), a lézersugár teljesítmény (P) és az anyag abszorptivitás (A) szorzatának függvényében, elkerülve a felület megolvadását, egyszersmind biztosítva az ausztenitesítési hőmérséklet elérését a munkadarab felületének kívánt mélységében.

2. Kifejlesztettem egy hőmérsékletszabályozási stratégiát a lézeres felületedzési folyamatokra a SYSWELD VEM szoftverhez kapcsolódó Rendszer Interfész Nyelv (SIL) használatával. A módszer révén a bevitt lézerenergia úgy szabályozható, hogy akár egy állandó hőmérséklet intervallum, vagy akár egy állandó hőmérséklet biztosítható a munkadarab bármely kijelölt pontján, tekintet nélkül a folyamat állapotára és a geometria komplexitására. [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]
- 2.1. Bebizonyítottam, hogy a hőmérsékletszabályozási stratégia alkalmazható a lézeres felületedzési folyamatokkal kapcsolatos számos nehézség megoldására, mint például a tranziens állapotok, a munkadarab éleinél jelentkező problémák és a komplex geometriák kezelése.
- 2.2. Bebizonyítottam, hogy a kifejlesztett hőmérsékletszabályozási stratégia alkalmazásával még a nem állandósult állapotok esetén is bevezethetők az eljárási paramétertartományok annak érdekében, hogy elkerüljük a felület megolvadását, mialatt bármely kívánt hőmérséklet, például az ausztenitesítési hőmérséklet elérését biztosíthatjuk a kívánt mélységben.
3. Az acélok átlapolódásos, többsávós lézeres felületedzése során jelentkező hőtani jelenségek és fázisátalakulások numerikus modellezése alapján; [12] [13] [14]
- 3.1. Bebizonyítottam, hogy a hőmérsékletszabályozási stratégia alkalmas a többsávós lézeres hőmérsékleteloszlás összetettségének kezelésére, így például az egymást követő nyomvonalak állandó csúcshőmérsékletének szabályozására, lézeresen edzett átlapolódó sávok esetén.
- 3.2. A többsávós lézeres felületedzés során jelentkező megeresztési jelenségre alkalmaztam egy numerikus modellt, amelyben a megeresztett szerkezetet egy „fiktív fázis” meghatározásával jellemeztem a SYSWELD VEM szoftverben, ennek arányát pedig a gyakran használt Johnson Mehl Avrami formula egyszerűsített formájával számítottam.
- 3.3. Bebizonyítottam, hogy a többsávós lézeres felületedzés esetében a keménység számszerű eredményei világosan demonstrálják a megeresztési hatásokat. Nyilvánvaló, hogy a keménység inhomogenitása, ami a megeresztési hatásnak köszönhető, minimalizálható a modellezési stratégia alkalmazásával.

6. Az új tudományos eredmények alkalmazása

Az eljárási paraméterek optimalizálásának módszere, tekintettel számos, az első tézisben bemutatott kritériumra, fontos eszköze lehet a biztonságos működési tartományok meghatározásának a lézeres felületedzési folyamatok során. A tapasztalati összefüggések és az analitikus megoldások összevetése révén megállapítható, hogy azok a numerikus számítások, amelyek az anyagtulajdonságok hőmérsékletfüggését is figyelembe veszik, sokkal reálisabbak. Kijelenthetjük, hogy ezek az eredmények megfelelő kapcsolatot

alapoznak meg a bemenő adatok, azaz a technológiai paraméterek és a kimenő adatok, azaz az edzett réteg tulajdonságai között, amelyek így előre becsülhetők, megbízhatók és reprodukálhatók. Ezek a tényezők hozzájárulhatnak a lézeres felületedzési eljárások még szélesebb körű ipari alkalmazásához.

A hőmérséklet szabályozási stratégia oly módon szabályozza a folyamat hőmérsékletét a munkadarab bármely pontján, hogy megadja a folyamat során szabályozandó hőáramsűrűség vagy bemeneti teljesítmény megfelelő értékeit. E stratégia kifejlesztése azt célozta, hogy elkerülhető legyen a felület megolvadása, ugyanakkor biztosítani lehessen az ausztenitesítést egy meghatározott mélységben, megoldást kínálva a lézeres felületedzést érintő kritikus ipari problémákra.

A lézeres felületedzés során jelentkező megeresztési jelenség és modellezésének vizsgálata jelentős előnyt biztosít a többsávós lézeres felületedzés szabályozásában, amelyet általában nagy sík felületeknél és hengeres daraboknál alkalmaznak.

Érdemes megemlíteni, hogy minden szimulációt C45 acélra vonatkozóan végeztem el, a Gauss-féle hőeloszlási modell alkalmazásával. Nyilvánvalóan ugyanez a módszer alkalmazható különböző anyagokra és más hőforrás modellekre is.

A tézisekhez kapcsolódó megjelent publikációk

1. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser transformation hardening of different steels and 3d modelling of their temperature distribution, IV. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonfüred, October 2003, pp.179.
2. Rowshan Reza, Kocsisné Dr. Baán Mária, Acélok edzése lézeres sugárral és elemzésük végeselem-módszerrel, Doktoranduszok Fóruma kari rendezvények, Miskolci Egyetem, 2003, pp. 219-224.
3. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser Transformation Hardening of Steels and Their FEM Modeling, Gépészet 2004, pp.175-180.
4. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Temperature Distribution and Phase Transformation of Laser Transformation Hardening of Steels, Lane 2004, vol.2, pp. 859-864, Erlangen, Germany.
5. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser Transformation Hardening of Different Steels and 3d Modelling of Their Temperature Distribution, Materials Science Forum Vols. 473-474 (2005) pp.399-406, Trans Tech Publication Ltd 2005.
6. R. Rowshan, M. K. Baán, Temperature Distribution and Phase Transformation Modelling in Laser Transformation Hardening of Steels, microCAD 2005, Miskolc, Hungary.
7. Bitay Enikő, Rowshan Reza, Lézeres felületkezelés technológiai paramétereinek folyamatos változtatásának szimulációja, microCAD 2005, Miskolc, Hungary.
8. R. Rowshan, M. K. Baán, Thermal and metallurgical modelling of laser transformation hardened steel parts, V. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonfüred 2005, Konferencia CD kiadvány.
9. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Laser Transformation Hardening of Steels, 3rd International Conference on Thermal Process Modelling and Simulation, IFHTSE Conference 2006, Budapest, Hungary, Konferencia CD kiadvány.
10. Reza Rowshan, Balázs Dobi, Process Control in Laser Transformation Hardening of Steels, 22nd Heat Treatment and Materials Science for Mechanical Engineering 2006, pp. 163-169, Balatonfüred, Hungary.
11. R. Rowshan, M. K. Baán, Thermal and metallurgical modelling of laser transformation hardened steel parts, Materials Science Forum Vols. 537-538 (2007) pp. 599-606, Trans Tech Publication Ltd 2007.
12. R. Rowshan, M. K. Baán, Optimal Process Control during Laser Transformation Hardening of Steels, microCAD 2007, Anyagtudomány és mechanikai technológiák, pp.103-108.
13. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Laser Transformation Hardening of Steels, International Journal of Microstructure and Material Properties (IJMMP), (Közlésre elfogadott teljes terjedelmű közlemény, 2007).
14. Rowshan Reza, Kocsisné Baán Mária, Az acélok lézeres felületedzésének végeselemes modellezése, A gépipari tudományos egyesület műszaki folyóirata (GÉP), (Közlésre elfogadott teljes terjedelmű közlemény, 2007).

UNIVERSITY OF MISKOLC
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



PROCESS CONTROL DURING LASER TRANSFORMATION HARDENING

Ph.D. THESIS SUMMARY

REZA ROWSHAN
MECHANICAL ENGINEER

MECHANICAL ENGINEERING SCIENCES PH.D. PROGRAM
PRODUCTION PROCESSES SUBPROGRAM
MECHANICAL TECHNOLOGY PART PROGRAM

HEAD OF PH.D. PROGRAM:
DR. ISTVÁN PÁCZELT
MEMBER OF HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCE
DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCE

HEAD OF PH.D. SUBPROGRAM:
DR. ILLÉS DUDÁS
DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCE

HEAD OF PH.D. PART PROGRAM:
DR. MIKLÓS TISZA
DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCE

PH.D. SCIENTIFIC ADVISOR:
DR. MÁRIA KOCSIS BAÁN
ASSOCIATE PROFESSOR

MISKOLC - HUNGARY
2007

Reza Rowshan

Process Control During Laser Transformation Hardening

Ph.D. Thesis Summary

Miskolc - Hungary
2007

1. Introduction

The properties of many engineering materials may be favourably modified by the application of a suitable heat treatment. Among heat treatment methods, surface treatment is a subject of consideration because it offers the chance to save strategic materials or to allow improved components with optimal surface and bulk properties.

When dealing with transformation hardenable alloys, in particular carbon steels, low alloy steels and cast irons, the option to harden using localised hardening techniques may be the most attractive. In this case, instead of heating the whole component (as in through hardening), only the surface is affected, so that the bulk properties, specifically the toughness, remain unaffected, and component distortion is minimised.

Laser Transformation Hardening (LTH) which involves the use of laser as a heat source, similarly to other localised hardening processes such as flame hardening, induction hardening and electron beam hardening, selectively heat treats the surface of the steel to a certain depth to reach austenitisation temperature and then to be quenched very rapidly to obtain martensite.

Although LTH was one of the first methods of laser based materials engineering to be industrialised, the process has never been exploited to its full potential. The reasons lie in the lack of knowledge concerning the process¹ due to its complexity, and the large number of more familiar surface hardening processes that are commercially available and the high instrument costs. Extreme heating and cooling rates make this process to be considered as a complex engineering task. Recent important developments in the technology of the laser source, optics and software enable the process to be viewed more favourably against competing processes.

Finite element method (FEM) as a numerical method and induced mathematical tool can describe the most essential parts of the process. This technique can be suitable for finding the optimal process parameters for treating components of widely varying size and shape.

The purpose of this research work is to enhance the insight in mechanisms that govern the LTH process and to develop models using the SYSWELD FEM code as a numerical tool for assisting process control during LTH.

2. Reasons of Research

When the surface of a material is rapidly heated by a moving laser source, rapid cooling will occur by heat conduction to the bulk of the material after that the beam has passed. By properly selecting the following process parameters:

- power of the laser beam,
- relative laser source - workpiece velocity (scanning rate),

¹ J. C. Ion, Laser Transformation Hardening, Surface Engineering 2002, Vol. 18 No.1, pp. 14-31

- shape and dimension of the workpiece area on which the laser beam impinges (laser spot),
- power distribution in cross section of the beam,

(all these results in a defined heating and cooling rate of the hardenable steel),

phase transformations may be suitably controlled in order to allow hard martensite on the surface and at a given depth as a consequence of the treatment.

A lot of factors, beside the just mentioned process parameters, influence the temperature distribution in the workpiece as a consequence of the laser material interaction including the absorption coefficient of the materials, the properties of the treated material (such as its thermal conductivity, specific heat and emissivity), the shape and dimensions of the workpiece itself. When all these parameters are known, the thermal behaviour of the treated workpiece maybe analysed by means of analytical expression available in the literature. Yet, these expressions, with few exceptions, come from idealised models of the heating process with restrictions in heat flow and workpiece dimension. As a consequence, they are not suitable for evaluation of edge and corner effects of the workpiece, which tends to concentrate the heat flow. In addition, most of the proposed models assume that the thermal properties of the metal do not vary with temperature.

In reality heat diffusion is a three dimensional phenomenon, the dimensions of the workpiece can be comparable with that of the laser spot and the thermal properties of the metals, especially its thermal conductivity, are temperature dependent. Moreover the majority of the developed models are devoted to study the process under quasi steady state conditions, while a fully time dependent model is necessary to investigate the thermal behaviour of the workpiece under realistic conditions.

In addition, sometimes it is necessary to implement complex patterns of laser spot, or to overlap hardening passes, or to take the presence of geometrical discontinuities of the workpiece into account.

3. Objectives of this Research

Within the framework of this research, a finite element code, SYSWELD is conducted as a numerical tool

- to use the thermal result of the simulations for establishing appropriate relationship between the output and the input parameters and to determine the LTH operating regions for quasi steady state conditions,
- to introduce a new optimal control strategy during LTH processes by controlling the input laser energy to achieve a constant temperature interval, or even a constant temperature at any point of the workpiece,
- to investigate the overlapping phenomenon of LTH processes in more details considering all the possible phase transformations and tempering effects.

Solutions of the listed tasks have a great importance from industrial aspects. The operating range, taken from numerical calculations, can assist a better and wider application of LTH processes. Controlling the temperature during the whole process can be regarded as

a powerful tool to avoid melting on the surface while assuring austenitisation temperature at a desired depth of the workpiece. The overlapping of the hardening passes, that may occur at the closure of a path around a cylindrical part or in the overlap zone between parallel paths on a large flat surface being processed sequentially, can be studied and controlled.

4. The Methods of the Research Work

Throughout this thesis the SYSWELD finite element analysis code is used to numerically simulate the laser transformation hardening processes. Sufficient amount of experiments for all modelling procedures were carried out to assure the reliability of the modelling results.

Three dimensional transient coupled thermo-metallurgical analyses were prepared to simulate different models with variations of process parameters for single track LTH. Considering two conditions, namely avoiding melting on the surface while assuring austenitisation temperature at a desired depth of the workpiece, the simulation results were taken to introduce the safe operating regions (operating windows) for quasi steady state conditions where the process is assumed to be steady along the travel direction of the laser beam (*Thesis 1*).

Generally, the procedure of a finite element thermal analysis associated with metallurgical transformations is performed with geometry and mesh preparation using Graphical User Interface (GUI), defining the initial and boundary conditions and introducing the thermal and phase transformation properties of the material.

The heat source, which moves along a defined path (trajectory line) and introduced as a function of time and space coordinates, is modelled by input of a heat flux density directly assigned to each Gauss point of surface elements. Such a model enables an accurate definition of the heat input quantity according to the motion and thus the location of the heat source. In this study the heat source, which is introduced to the system by means of a simplified FORTRAN routine, is modelled as a Gaussian distribution. The simulation procedures are shown in *Figure 1*.

In case of non steady state processes, considering the laser transformation hardening it is of a great importance to overcome critical difficulties such as

- starting and ending moments of a process, in other words the transient states,
- being close to the edge of the workpiece and corner problems,
- complex geometry,
- necessity to overlap the hardening passes (influence of prior thermal effects).

Obviously, controlling the temperature during a process can be an effective tool and is applicable in different thermal fields. The new contribution of *Thesis 2* is the development of the optimal temperature control strategy for laser transformation hardening using System Interface Language (SIL). SIL is the communication interface language between the user and SYSWELD code.

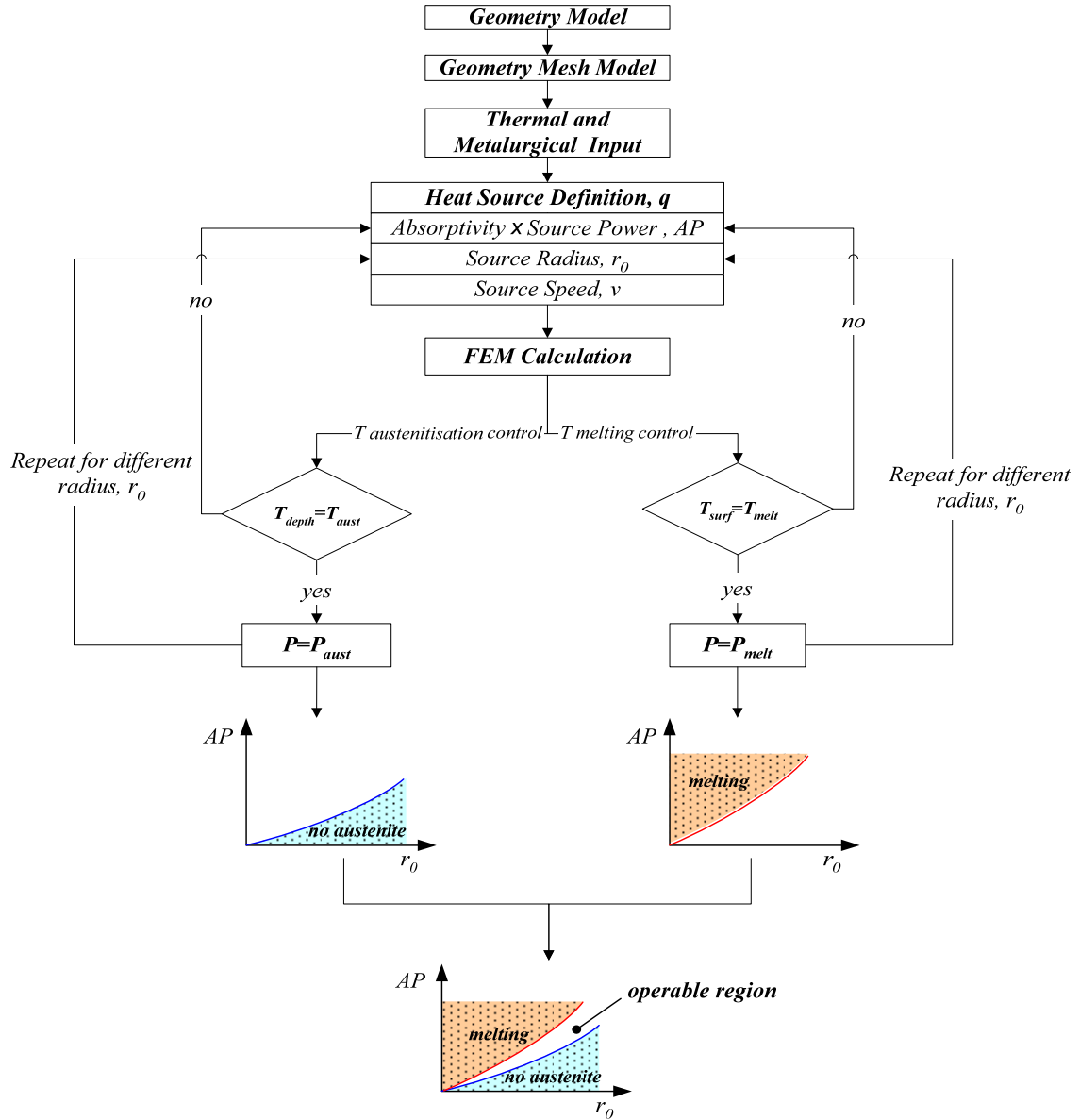


Figure 1 Simulation procedures to find operable regions for single track steady state LTH conditions

Since in LTH usually the moving velocity (scanning rate) of the laser beam is kept constant, the most important control parameter is the input laser energy. The method is to control the input laser energy to achieve a constant temperature interval, or even a constant temperature at any point of the workpiece. The simulation result is then a constant temperature interval for a selected group of nodes and a text file with changing maximum heat flux density, q_0 , as a function of time (*Thesis 2*).

The steps of the temperature control strategy starts with the geometry model and meshing after which the definition of the thermal and metallurgical phase transformation should be given. The heat source is modelled as a Gaussian heat distribution. To initiate the

SIL program, an initial calculation for time 0 should be done. A constant temperature ($T_{constant}$) with a ΔT , which can be accepted as the temperature deviation, is defined in the program. This temperature restriction will be applied to any arbitrary group or groups of nodes that are already created in the FEM code. By these definitions the finite element analysis will start the first time step and calculate the temperatures of all nodes when starting the SIL program and the related files. In the next stage the program will search for the maximum temperature (T_{max}) calculated for the defined group(s) of nodes and will compare it to $T_{constant}$. If the maximum temperature is equal to $T_{constant}$ or is within $T_{constant} \pm \Delta T$ interval, the heat flux density and corresponding time will be printed to a text file and the calculation will carry on with the next time step until the final time step of the process is reached.

If T_{max} is not equal to $T_{constant}$ or not within $T_{constant} \pm \Delta T$ interval, the two possibilities of $T_{max} > T_{constant}$ and $T_{max} < T_{constant}$ are considered. If $T_{max} > T_{constant}$, the program will automatically change the value of the maximum heat flux density (q_0) into a new maximum heat flux density (q_{0new}), which will be used as an input of the next iteration, using the following formula,

$$q_{0new} = \left(\frac{T_{constant} - T_{max}}{T_{max}} + 1 \right) \cdot q_0. \quad Eq. 1$$

For $T_{max} < T_{constant}$, q_{0new} is calculated as

$$q_{0new} = \left(\frac{T_{constant} - T_{max}}{T_{constant}} + 1 \right) \cdot q_0. \quad Eq. 2$$

The flowchart of the temperature control strategy simulation is shown in *Figure 2*. To consider a constant temperature interval, the calculation is done in a way that makes it possible not to exceed the upper and lower limits of the $T_{constant}$. By this method the temperature of any single point of a workpiece can be controlled regardless of the geometry, material and process parameters.

The temperature control strategy was used to demonstrate melting and austenitisation limit curves of single track LTH for non steady state conditions with variation of process parameters such as the laser spot radius and the scanning rate.

Moreover, this strategy was applied to overcome special difficulties in LTH processes. Examples of transient states, edge difficulties and complex geometries are among the problems that were solved using this strategy. The output results are maximum heat flux densities as a function of time that can be transformed into power as a function of time or displacement. Even in cases of non steady state conditions, the operating regions could be introduced to avoid surface melting and reaching the austenitisation temperature at any desired depth.

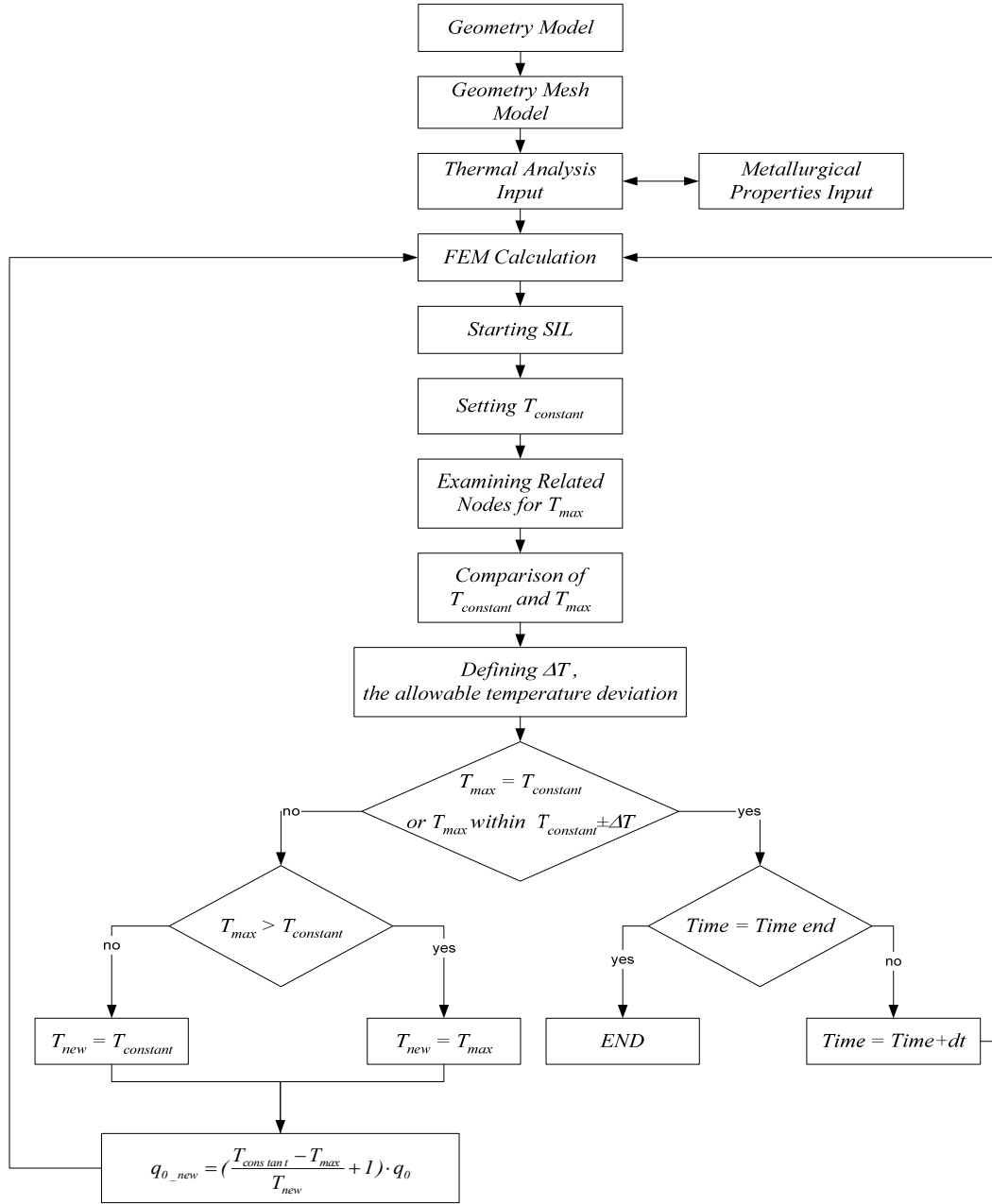


Figure 2 Temperature control simulation strategy flowchart

For parallel multi pass LTH in normal circumstances, when the process parameters are constant, the previous laser tracks preheat the workpiece and the surface temperature will achieve a higher value after irradiation of the subsequent laser tracks. In case of several laser tracks the deviation of the temperature may result in an inhomogeneous microstructure and may also result in melting of the surface. The temperature control strategy is used to keep the surface temperature below the melting temperature. Furthermore all the possible phase transformations during multi pass LTH are investigated and have been modelled including the tempering effect which is an undesired phenomenon in this case.

In order to numerically model the tempering of steels, it is assumed that the kinetic equation describing the hardness has the form $HV_t = f(p_g)$. Where HV_t stands for the instantaneous hardness after tempering, f is a suitably selected function and p_g is the so called generalised time temperature parameter, which is applicable to the description of tempering processes. The Hollomon and Jaffe² expression is used as the tempering parameter. For a defined steel I took the curve of hardness versus the Hollomon and Jaffe parameter from the literature and defined it mathematically. Then I calculated the curves of hardness as a function of time for different tempering temperatures. The proportion of a tempered structure as a function of time can be deduced from the previous curves. The method is used to simply assume the fact that for different time t_i the tempered structure proportion $p_{tempered}$, can be described as a mixture of a certain proportion of the microstructure as “fully tempered” and the rest of it as “unaffected” phases. In other words I have defined the tempered structure in SYSWELD code as a “fiction phase”.

The proportion $p_{tempered}$ is assessed as the ratio between hardness with $\Delta HV = HV_0 - HV_{100}$ and $\Delta HV_i = HV_i - HV_{100}$, so we obtain

$$p_{tempered} = \frac{\Delta HV - \Delta HV_i}{\Delta HV}, \quad Eq. 3$$

where HV_0 is the hardness of a quenched martensite, HV_{100} is the hardness of 100% tempered martensite and HV_i is the hardness of a tempered structure at time t_i as shown in Figure 3.

Finally, the needed curves $p_{tempered} = f(time)$ for different temperatures are obtained to be the input data for modelling of tempering structures.

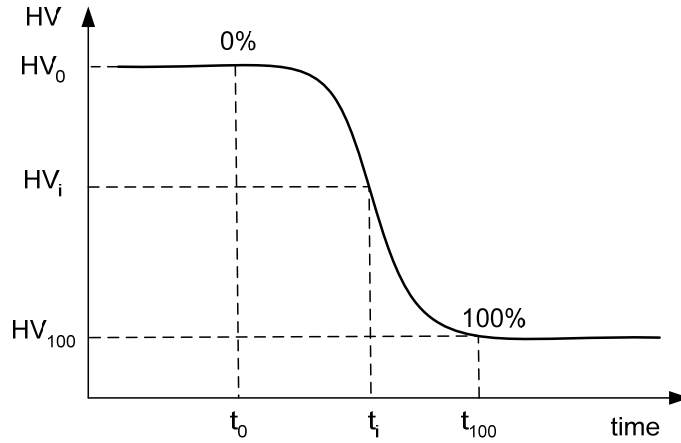


Figure 3 Schematic illustration of hardness of a tempered structure as a function of time

The proportion of the tempered structure or the “fiction phase” is adapted and calculated by a simplified form of the frequently used Johnson Mehl Avrami formula as

² J.H.Hollomon and L.D.Jaffe, Time-Temperature Relationships in Tempering Steel, Trans. AIME, Vol. 162, 1945, pp.223-249

$$p_{tempered} = p_{eq} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad Eq. 4$$

where p_{eq} is the tempered structure proportion obtained for an infinite time and τ is the time delay which is the incubation time needed for the start of the diffusion process.

For fully tempered structures it is reasonable to consider that the hardness is equivalent to that of spheroidite so the hardness of the mixture is computed in an incremental manner as embedded in the SYSWELD code.

5. The New Scientific Results – Theses

1. Based on the numerical modelling of thermal, metallurgical and hardness analysis of single track laser transformation hardening (LTH); [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]
 - 1.1. I have determined a stable process window for steady state LTH conditions presenting the appropriate laser power as a function of beam radius, and laser power as a function of scanning rate.
 - 1.2. I have proven that this process window can be used to determine the variation of the laser beam radius (r_0) with laser beam power (P) multiplied by the absorptivity (A) of the material for different laser scanning rates (v), avoiding melting on the surface while assuring the austenitisation temperature at a desired depth of the specimen.
2. I have developed a temperature control strategy for LTH processes using the System Interface Language (SIL) of SYSWELD FEM code. The method is to control the input laser energy to achieve a constant temperature interval, or even a constant temperature at any point of the workpiece regardless of the process state and the complexity of the geometry. [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]
 - 2.1. I have proven that the temperature control strategy can be applied to overcome several difficulties concerning LTH processes such as transient states, edge problems and complex geometries.
 - 2.2. I have proven that even in case of non steady state conditions, the operating regions could be introduced to avoid surface melting while reaching any required temperature, e.g. austenitisation temperature, at any desired depth using the developed temperature control strategy.
3. On the basis of the numerical modelling of the thermal phenomena and phase transformations during overlapped multi pass LTH of steels; [12] [13] [14]
 - 3.1. I have proven that the temperature control strategy is suitable for handling the complexity of multi pass laser temperature distributions, e.g. controlling the

constant peak temperature of subsequent tracks during multi pass laser applications.

- 3.2. I have adapted a numerical model for the tempering phenomena during multi pass LTH by defining the tempered structure in the SYSWELD code as a “fiction phase” where its proportion is calculated by the simplified form of the frequently used Johnson Mehl Avrami formula.
- 3.3. I have proven the fact that in case of multi pass LTH, numerical hardness results clearly demonstrate the tempering effects. Obviously the hardness inhomogeneity due to the tempering effect can be minimised by the application of this modelling strategy.

6. Applications of the New Scientific Results

The method for optimising process parameters with respect to various criteria that are presented in the first thesis is a powerful tool for finding safe operating regions in laser transformation hardening processes. Comparing numerical solutions to empirical relationships and analytical solutions, the numerical calculations that take the variations of material properties into account, are more realistic. We can state that these results establish an appropriate relationship between the input data which are the technological parameters and the output data which are characteristics of the hardened layer are predictable, reliable and reproducible. These factors can help LTH processes to be more widely applicable in industry.

The temperature control strategy, while controlling the process temperature at any point of the workpiece, gives the proper heat flux density or the input power of the process. This strategy was implemented to avoid surface melting and assuring austenitisation at a specific depth that can be a solution for critical industrial problems concerning LTH.

Investigation of the tempering phenomena and its modelling in LTH process gives significant advantages to control the multi pass LTH usually applied for large flat surfaces and cylindrical parts.

It is worth mentioning that all simulations were applied on C45 steel grade with the Gaussian heat distribution model. Obviously the same methods can be carried out on different materials and different heat source models.

Published Papers Related to Theses

1. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser transformation hardening of different steels and 3d modelling of their temperature distribution, IV. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonfüred, October 2003, pp. 179.
2. Rowshan Reza, Kocsisné Dr. Baán Mária, Acélok edzése lézeres sugárral és elemzésük végeselem-módszerrel, Doktoranduszok Fóruma kari rendezvények, Miskolci Egyetem, 2003, pp. 219-224.
3. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser Transformation Hardening of Steels and Their FEM Modeling, Gépészet 2004, pp.175-180.
4. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Temperature Distribution and Phase Transformation of Laser Transformation Hardening of Steels, Lane 2004, vol.2, pp. 859-864, Erlangen, Germany.
5. Reza Rowshan, Dr. Mária Kocsis Baán, Laser Transformation Hardening of Different Steels and 3d Modelling of Their Temperature Distribution, Materials Science Forum Vols. 473-474 (2005) pp.399-406, Trans Tech Publication Ltd 2005.
6. R. Rowshan, M. K. Baán, Temperature Distribution and Phase Transformation Modelling in Laser Transformation Hardening of Steels, microCAD 2005, Miskolc, Hungary.
7. Bitay Enikő, Rowshan Reza, Lézeres felületkezelés technológiai paramétereinek folyamatos változtatásának szimulációja, microCAD 2005, Miskolc, Hungary.
8. R. Rowshan, M. K. Baán, Thermal and metallurgical modelling of laser transformation hardened steel parts, V. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonfüred 2005, Conference CD proceeding.
9. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Laser Transformation Hardening of Steels, 3rd International Conference on Thermal Process Modelling and Simulation, IFHTSE Conference 2006, Budapest, Hungary, Conference CD proceeding.
10. Reza Rowshan, Balázs Dobi, Process Control in Laser Transformation Hardening of Steels, 22nd Heat Treatment and Materials Science for Mechanical Engineering 2006, pp. 163-169, Balatonfüred, Hungary.
11. R. Rowshan, M. K. Baán, Thermal and metallurgical modelling of laser transformation hardened steel parts, Materials Science Forum Vols. 537-538 (2007) pp. 599-606, Trans Tech Publication Ltd 2007.
12. R. Rowshan, M. K. Baán, Optimal Process Control during Laser Transformation Hardening of Steels, microCAD 2007, Material Science and Material Processing Technologies, pp.103-108.
13. R. Rowshan, M. K. Baán, Finite Element Modelling of Laser Transformation Hardening of Steels, International Journal of Microstructure and Material Properties (IJMMP), Accepted and to be published in 2007.
14. Rowshan Reza, Kocsisné Baán Mária, Az acélok lézeres felületedzésének végeselemes modellezése, A gápipari tudományos egyesület műszaki folyóirata (GÉP), Accepted and to be published in 2007.