

Új módszer acélok edzéséhez használatos hűtőközegek hűtőképességének minősítésére

(PhD értekezés tézisei)

Készítette:

Felde Imre

Miskolci egyetem

Fémteni Tanszék

2007.

Tudományos vezető:

Dr. Réti Tamás

1. A kutatási feladat és tudományos előzményei

A hipoeutektoidos szerkezeti acélok bemeztetéses (immerziós) edzési hőkezelése, mint ismeretes a munkadarab ausztenitesítéséből, valamint ezt követő lehűtéséből áll, és alapvető célja zömmel martenzites szövetszerkezet létrehozása lehetőség szerint a térfogat minél nagyobb hányadában. A hőkezelési folyamat kritikus részművelete az ausztenitesítési hőmérsékletről való hűtés, mely mintegy meghatározza a szövetszerkezetet és a mechanikai tulajdonságokat a munkadarab keresztmetszetében.

Az immerziós edzéshez alkalmazott hűtőfolyadékok „edzési teljesítménye” az alkatrész sajátosságain (alapanyaga, előállapota, geometriája, felületi érdessége, stb) kívül a közeg hőelvonási vagy hűtési képességének is függvénye. A hűtőközegek hőelvonási karakterisztikája sajátos vegyi összetételüktől és adott fizikai állapotuktól (hőmérséklet, áramlási viszonyok, koncentráció, stb) függően különböző. A gyártás tervezhetőségnek szempontjából nélkülözhetetlen az alkalmazott folyadék hűtő- vagy edzőképességének ismerete.

A hűtőközegek minősítése területén kifejtett kutató-fejlesztő tevékenység az elmúlt időszakban döntően két fő területre összpontosult. Az egyik súlyponti terület az edzőközegek hűtőképességének, vagy hűtési teljesítményének (cooling power) mérésére és értékelésére alkalmas berendezések és módszerek kidolgozása. A hűtési teljesítményt a szakirodalom a hűtőközeg „hőközlési reakció”-jaként, azaz az alkatrészből a hűtőközeg által elvont hő fajlagos mennyiségének jellemzőjeként definiálja. A másik területet a hűtőközegek „edzési teljesítményének” (hardening power) számszerű minősítésére alkalmas eljárások kifejlesztése képezi. Az edzési teljesítmény a munkadarab „fém-tani reakcióját” jellemzi, azaz az edző-közegnek azt a képességét, mely az adott alapanyagú és geometriájú alkatrész edzés utáni mechanikai tulajdonságait (első sorban keménység-eloszlását) minősíti, meghatározza. Az elmúlt években kifejlesztett és bevezetett minősítő módszerek eredendően szabványosított berendezésekkel rögzített lehűlési görbék elemzésén alapulnak. Ezek a eljárások első sorban a folyadékok hűtési képességének összehasonlítására, rangsorolására alkalmasak, a lehűlés során a munkadarab és a közeg interakciójából adódó, az alkatrészben létrejövő szövetszerkezeti, mechanikai tulajdonságokat figyelmen kívül hagyják. Ennek tulajdoníthatóan ezeknek a módszereknek a valós hőkezelési technológiában való alkalmazhatósága korlátozott.

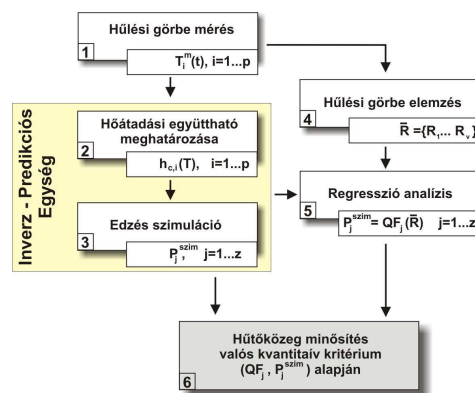
Az említett szempontokból kiindulva, a dolgozat célkitűzései alapvetően az edzési technológia során alkalmazott hűtőfolyadékok számszerű minősítésével kapcsolatos, alább részletezett feladatok megoldására irányultak:

1. A lehűlési görbe elemzése tárgyát képező mért hőmérsékletciklus zajszintjének redukálására és kódolására numerikus szűrő (jel-simító) eljárás kifejlesztése, valamint a mérnöki gyakorlatban leggyakrabban használt simító módszerekkel való kvantitatív összehasonlítás alapján a különféle algoritmusok hatékonyságának kritikai elemzése és értékelése.
2. A munkadarab és a hűtőközeg közötti hőátadást jellemző felületi hőátadási együttható becslésére hivatott nemlineáris inverz eljárás kidolgozása. A szimuláción alapuló kísérletek eredményeire támaszkodva a kidolgozott numerikus módszer alkalmazhatóságának vizsgálata és igazolása.
3. A dolgozatom fő célkitűzése olyan szimuláción és tulajdonságbecslésen alapuló, szekvenciális metodológia kidolgozása, mely a mért lehűlési görbék és a becsült hőátadási együttható adataira támaszkodva lehetőséget nyújt az acél munkadarabban edzést követően kialakuló szövetszerkezet és mechanikai tulajdonságok közötti összefüggések kvantitatív leírására, nevezetesen ún. „minőségfüggvények” definiálására és előállítására. Ennek gyakorlati

jelentősége abban van, hogy az egyes hűtőfolyadékok hűtőképességének, illetve edzési teljesítményének kvantitatív értékelése és összehasonlítása a minőségfüggvények segítségével valósítható meg.

2. A lefolytatott vizsgálatok

Acélok immerziós edzéséhez alkalmazott hűtőközegek hűtőképességének (edzési teljesítményének) jellemzésére új típusú, kvantitatív kritériumokon alapuló minősítő módszert fejlesztettem ki. A kidolgozott eljárással, amely az ISO 9950 szabvány előírásai szerint felvett lehűlési görbék elemzésén alapul, a hűtőképesség jellemzése közvetett módon valósítható meg az ún. minősítő tulajdonságok (szövetszerkezet, mechanikai jellemzők) becslésére támaszkodva (1. ábra).



1. ábra A kidolgozott minősítési módszer elve

A módszer alapját az a hipotézis képezi, hogy az immerziós edzés (hűtés) folyamán – azonos geometriájú és felületi minőségű munkadarabok esetén – a hűtőfolyadék és a munkadarab között végbemenő felületi hőátadás azonos $h_c(T)$ hőátadási függvénnyel jellemezhető, amely független az acél kémiai összetételétől és szövetszerkezetétől. Más szóval, feltételezésem azon alapul, hogy azonos alakú, felületi minőség és hűtési körülmények mellett a vizsgált edzőközeg hőelvonása az eltérő anyagminőségű acél munkadarabok esetén is megegyezik. E feltételezés folyamánya, hogy az ISO 9950 szabvány szerint minősítendő hűtőfolyadék felületi hőátadását leíró Fourier egyenlethez tartozó harmadfajú peremfeltétel azonosnak tekintendő a szabványosított hengeres próbatest anyagául szolgáló nikkel bázisú ötvözetre és a vizsgálataimban használt ötvözetlen C45 minőségű acélra nézve is.

A kidolgozott eljárás (algoritmus és szoftver) központi moduleleme un. Inverz-Predikciós Egység (IPE), mely a hőátadási együttható meghatározására hivatott modulból és a hűtés folyamán végbemenő átalakulásokat és tulajdonság-változásokat becselő „szimulációs” modulból áll. Az előbbi a hőátadási együttható meghatározását végzi, az utóbbi pedig az előzetesen származtatott $h_c(T)$ függvény alapján számítja az edzést követően létrejött szövetszerkezet és tulajdonságok hely-koordináta szerinti eloszlását. A hűtőfolyadék edzési teljesítménye tehát a hűtőközeg hőelvonását leíró $h_c(T)$ alapján, illetve a prognosztizált minősítő jellemzők ismeretében számszerűen minősítem.

A hőátadási együttható predikciója és a hűlési görbe elemzése során származtatott paraméterek becslési pontossága – a szakirodalmi források és az elvégzett elemzések tanúsága szerint –

döntően függ a mért lehülési görbe „zajosságának” mértékétől. A hülési görbe zajszerűsége újszerű, Fourier-analízisre épülő jelsimító és kódoló algoritmust dolgoztam ki. A javasolt eljárás sajátossága, hogy lehetőséget nyújt a görbék véges (célszerűen korlátozott) számú paraméterrel való leírására, a görbék archiválását megkönnyítő nagyfokú adattömörítésére. Mindezek következménye, hogy a mért jel mintavételi frekvenciájától és terjedelmétől független, egységes formában történő kezelésére (adatbázisban való tárolására).

A Fourier-analízisre alapozott új módszer hatékonyságát és alkalmazásával járó előnyöket – összehasonlítva a mérnöki gyakorlatban elterjedten használatos két másik simító eljárással – például, számítási eredményekkel is demonstráltam.

Végtelen hosszúságú, tengely szimmetrikus próbatestet és harmadfajú peremfeltétellel jellemzett radiális irányú hőközlést feltételezve, inverz algoritmusra alapozott szoftvert készítettem, mely kis számú iteráció után (gyakorlatilag 10-nél kisebb lépésszám eredményeként) becsli a hőátadási együtthatót a felületi hőmérséklet függvényében. Az inverz módszer számítási pontosságát különféle, hipotetikus (azaz mesterségesen generált) hőátadási együtthatók felhasználásával teszteltem, és a mért lehülési görbék közötti eltérést véve az összehasonlítás alapjául igazoltam a javasolt módszer megbízhatóságát, hatékonyságát.

A minősítő tulajdonságok (keménység és mikroszerkezet) számításához a hőkezelési folyamat matematikai modellezésén és szimulációján alapuló, korábban kifejlesztett szoftvert használtam. Ezzel a szimulációs eszközzel a munkadarab geometriájának, fizikai és metallurgiai tulajdonságainak ismeretében, valamint a hőátadást reprezentáló adatok birtokában a szövetszerkezet- és keménységeloszlás becsülhető.

Az IPE számítási pontosságának ellenőrzése céljából validációs kísérleteket végeztem. A kísérletek során egyrészt különböző hőmérsékletű, olaj és vízbázisú folyadékokban hülési görbéket vettem fel, másrészt ezzel párhuzamosan C45 minőségű, ötvözetlen acél próbatesteken végeztem edzési kísérleteket. Az edzés során kialakult tényleges, valamint a számított keménység-eloszlást összehasonlító elemzésnek vettem alá. A validációs kísérletek eredményei alátámasztották az IPE megbízható alkalmazhatóságát, és a hűtőképesség jellemzésére kidolgozott módszer elvi alapját képező hipotéziseket közvetett módon igazolták.

A fentebb részletezett koncepció alapján a hűtőközegek hűtési képességének minősítésére két lehetőséget kínálkozik: a becsült tulajdonságok felhasználásával (a), illetve a minőségfüggvények révén származtatott számszerű kritériumokra támaszkodva (b). A két módszer alkalmazásában rejlő lehetőségeket példákön keresztül demonstráltam. Mindkét esetben a C45 minőségű hengeres, edzett acél próbatestek keresztmetszetében kialakuló martenzit mennyiséget és keménységet tekintetem a minősítés kritériumának.

a) A becsült tulajdonságokra alapozott értékelési metodológia a hűtőközeg hűtési teljesítményét befolyásoló paraméterek (közeg hőmérséklete, áramlási viszonyai, koncentrációja) közötti „kompenzációs jelenségek” vizsgálatát is lehetővé teszi. A vizsgálatok alapján kitűnt, hogy bizonyos paraméter-kombinációk az edzés eredményként adódó tulajdonságok szempontjából „ekvivalensek”, nevezetesen azonos hűtési teljesítmény különböző paraméter-kombinációkkal is megvalósítható. Bebizonyosodott, hogy a kidolgozott minősítő módszer az edzőfolyadékok állapotát, a hűtőképességet és az edzési teljesítményt befolyásoló tényezők hatását valós fizikai mennyiségekkel számszerűen képes jellemezni, összhangban a szakirodalmi forrásokban közölt tapasztalatokkal.

b) A hűtőképesség minősítés másik koncepciója a mérési adatok matematikai statisztikai elemzésével származtatott empirikus formulák, azaz minőségfüggvények célszerű alkalmazásán alapul. A minőségfüggvény a mért hőmérsékletciklusból, vagy az inverz analízis eredményeként becsült $h_c(T)$ függvényből származtatott számszerű mennyiségek és a C45 acél alapanyagú munkadarab edzésénél kialakuló számított tulajdonságok közötti összefüggést írja le. A vizsgálatok során olyan minőségfüggvényeket állítottam elő, melyekkel a becsült martenzit hányad és a keménység közvetlenül a mért hűlési görbéből vagy a $h_c(T)$ függvényből egyszerű módon becsülhetőek. A minőségfüggvények alkalmazási lehetőségét gyakorlati példán keresztül is demonstráltam. Ennek során a két legelterjedtebb – a hűlési görbe-elemzésen alapuló – minősítő eljárással hasonlítottam össze. E vizsgálatok alapján arra következtettem, hogy a minőségfüggvények alkalmazásával a hűtőközegek hűtőképességének minősítése a hagyományos eljárásoknál pontosabban, megbízhatóbban végezhető.

3. Az értekezés új tudományos eredményei

1. Az új típusú Fourier analízisen alapuló numerikus módszer az ISO 9950 szerinti szabványosított eljárással mért lehűlési görbék zajszerűsége, simítására és kódolására alkalmas. E felsorolt igények szimultán módon kielégíthetők, nevezetesen a zajszerűségi, simítási, kódolási feladatok a gyakorlati elvárásoknak megfelelő pontossággal megvalósíthatók $M=16$ Fourier együttható pár, összesen $2 \cdot 16 + 5 = 37$ numerikus paraméter felhasználásával. A módszer további előnye, hogy egyúttal alkalmas – a hűtőképesség elemzéséhez fontos támpontul szolgáló hűlési sebességfüggvény (a hűlési görbe idő szerinti első deriváltjának) előállítására is.
2. Az acélok immerziós edzéséhez használatos hűtőközegek hűtési képességének minősítésére szolgáló eljárás – amely a hőmérséklettől függő hőátadási együttható inverz módszerrel való meghatározásán, valamint az edzési folyamat szimulációján (mikroszerkezet- és tulajdonság-becslésen) alapul – lehetővé teszi, hogy a hűtési teljesítményt közvetett, de kvantitatív módon jellemezzük. A minősítés alapját a C45 ötvözetlen acél alapanyagú hengeres próbatest középvonalában szimulációval számított martenzit hányad, illetve keménység képezi.
3. A kifejlesztett eljárás célszerűen felhasználható ún. minőségfüggvények definiálására és származtatására, és ezek révén a hűtőközegek hűtési teljesítménye – egyéni felhasználó igények és tapasztalatok figyelembe vételével – közvetlen módon is minősíthető. Az Inconel próbatesttel felvett hűlési görbe alapján származtatott 500 és 400 °C-ra való lehűlési idők különbsége ($t_{500-400}$) és a C45 minőségű próbatest tengelyvonalában számított keménység, illetve martenzithányad között lineáris összefüggés mutatható ki. A keménység és martenzit-hányad, valamint az 500 és 400 °C hőmérséklet-intervallumra vonatkozó átlagos lehűlési sebesség ($CR_{500-400}$) közötti összefüggést exponenciális függvénykapcsolat jellemzi. A hűtőközeg minősítésére bevezetett $I_{htc}_{600-400}$ paraméter, (amely az Inconel próbatest lehűlését jellemző hőátadási együtthatónak 600 és 400 °C közötti tartományra vonatkozó határozott integráljaként definiált), és a keménység, illetve martenzit-hányad közötti kapcsolat ugyancsak exponenciális jellegű függvénnyel írható le.
4. A kidolgozott minősítő eljárást felhasználva kimutatható, hogy a polimerbázisú hűtőközegek hűtési képességét befolyásoló három alapvető paraméter (a hűtőközeg hőmérséklete, áramoltatási sebessége és az adalék koncentráció mértéke) között létezik egyfajta kompenzációs effektus: nevezetesen e három paraméter célszerűen választott

kombinációjával – a közegre jellemző értelmezési tartományban – azonos (egyenértékű) hűtési teljesítmény valósítható meg.

4. Az eredmények hasznosítása

Az értekezés új tudományos eredményei elsősorban a hőkezelési gyakorlatban felmerülő problémák megoldásában, mindenek előtt acélok bemeztetési edzési technológiájának tervezésében, az edzési művelet ellenőrzött, megbízható módon történő kivitelezésében hasznosíthatók.

Az integrált rendszer alkalmazásával eldönthető, hogy egy hűtőközeg milyen mértékben használódott el (degradálódott), mikor szorul regenerálásra vagy cserére. A minősítő eljárással megvalósítható egy adott feladathoz, a kívánt tulajdonság-együttes kialakításához megfelelő hűtőközeg, illetve a hőelvonást befolyásoló paraméterek optimális variációinak kiválasztása. A dolgozatomban bemutatott numerikus eljárások és tudományos eredmények az *ivf SmartQuench* nevű mérőberendezés elemző szoftverének kifejlesztéséhez vezettek. Ez műszer 26 országban, több mint 70 helyen segíti a hőkezelési szakemberek munkáját.

A minősítő rendszer egyes moduljai külön-külön is sikeresen alkalmazhatóak a mérnöki gyakorlatban. A Fourier analízisen alapuló zajszűrő algoritmus a hűlési görbétől eltérő karakterű mért jelsorozat kódolására, simítására is felhasználható, természetesen a megfelelő együtthatószám kiválasztása mellett. A lehűlési görbék rögzített adathosszúsággal (Fourier együtthatókkal) történő leírása lehetőséget nyújt azok adatbázisban való célszerű tárolására, a görbék egységes kezelésére, adott kritérium szerinti szűrésére.

A hőátadási együttható meghatározására hivatott inverz algoritmus kiterjeszhető 2 és 3 dimenziós hőátadási viszonyokra. A kidolgozott numerikus iteratív módszer több, megfelelő helyen elhelyezett termoelem jelének felhasználásával komplex, a hőmérséklet és a helykoordinátától függő harmadfajú peremfeltétel becslésére is alkalmas.

5. Az értekezés témaköréből készült publikációk

5.1 Tudományos folyóirat cikkek

Réti T., Fried Z., Felde I.: Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model, *Computational Materials Science*, 22, , p. 261-278 (2001)

Segeberg S., Bodin J., Felde I.: A new advanced system for Safeguarding the performance of the quenching process, *Heat treatment of metals*, vol 2, p. 49-51 (2003)

Segeberg S., Bodin J., Felde I.: Hardware/software combo measures performance in quenching, *Heat Treating Progress*, 4, 3, p. 28-30 (2004)

Réti T, Felde I, Gür H.: Modeling of reversible gamma/alfa transformations of low carbon steels in the intercritical temperature range, *Trans. Mater. Heat Treat.* 25: (5) 702-705 (2004)

Felde I., Réti T., Segerberg S., Bodin J., Sarmiento S.: Numerical methods for safeguarding the performance of the quenching process, *Mater. Sci. Forum* 473-474: 335-339 (2005)

Smoljan B., Tomasic N., Iljkic D., Felde I., Réti T.: Application of JM-Test in 3D simulation of quenching, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 17: (1-2) 281-284 (2006)

Réti T., Czinege I., Felde I., Costa L., Colas R.: On the Temperature Rate Dependent Transformation Processes, *Mater. Sci. Forum* 537-538: 571-578 (2006)

Felde I., Réti T., Smoljan B., Colas R.: A novel approach of quenchant evaluation by applying quality functions, *Mater. Sci. Forum* 537-538: 513-518 (2006)

5.2 Konferencia kiadványok

Réti T., Felde I., Smoljan B., Colas R.: Modeling of non-isokinetic transformation processes in: Smoljan B, Jager H, Leskovsek V (ed.) *Proceeding of the 1st International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and Dies*, Zagreb, -:Croatian Society for Heat Treatment and Surface Engineering, 2005. pp. 367-373

Réti T., Felde I., Sarmiento S., Colas R.: Modelling of Polycrystalline Microstructures Represented by Space-filling Polyhedral Cellular Systems, In: & (ed.) *Proceedings of the Budapest Tech International Jubilee Conference*, Budapest: Budapest Polytechnic, 2004. pp. 119-129

Segerberg S., Bodin J., Felde I.: ivfSmartQuench - A new advanced system for Safeguarding the performance of the quenching process, 4th International Conference on Quenching and Control of Distorsion, Beijing, (2003)

Takács M., Verő B., Felde I., Pan J.: Role of Dilatometrical Measurements in the Development of Multiphase Steels, 14th Congress of IFHTSE, Shanghai, China, (2004), p. 41-44

Réti T, Felde I, Smoljan B, Colas R.: Modeling of non-isokinetic transformation processes, In: Smoljan B, Jager H, Leskovsek V (ed.) *Proceeding of the 1st International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and Dies*, Zagreb, Croatian Society for Heat Treatment and Surface Engineering, 2005. pp. 367-373

Canale L.; Sarmiento G. ; Totten G.; Felde I.; Penha R.: Effect of vegetable oil oxidation on the ability to harden AISI 1045 and 4140 steel. In: 60o. Congresso Anual Da Abm, 2005, Belo Horizonte, MG. *Anais Do 60o. Congresso Anual Da Abm*. São Paulo, SP : ABM, 2005. V. CD-rom. P. 3209-3217.

5.3 Konferencia előadások

Felde I., Réti T., Sarmiento S., Palandella M., Totten G.: Effect of Smoothing Methods on the Results of Different Inverse Modeling Techniques, *International symposium on Quenching & Control of Distortion in Honor of Professor's Bozidar Lišcic & Hans M. Tensi*, Indianapolis (2001), I., p. 65-73

Felde I., Réti T., Segerberg S., Bodin J., Totten G.: Characterization of Quenching Performance By Using Computerized Procedures And Data Base of Heat Treatment Processes, International symposium on Quenching & Control of Distortion in Honor of Professor's Bozidar Lišcic & Hans M. Tensi, Indianapolis (2001), I., p.82-86

Felde I., Réti T., Segerberg S., Bodin J., Totten G.: Quenchant Chracterization by Numerical Methods, 2nd International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation, Nancy, (2003)

Felde I., Réti T., Segerberg S., Bodin J., Totten G., Gu J., Methods for Safeguarding the Performance of the Quenchning Process, 14th Congress of IFHTSE, Shanghai, China, (2004), p. 519-521

Smoljan B, Tomasic N, Iljkic D, Felde I, Réti T: 3D simulation of quenching of steel specimen In: & (ed.) 3th International Conference on Thermal Process Modelling and Simulation, Budapest, GTE, 2006. pp. O-I/11-1-O-I/11-6

Simsir C, Gür CH, Réti T, Felde I.: Determination of the effect of phase transformation on residual stress distribution in the quenched steel components by finite element modelling In: & (ed.) 3th International Conference on Thermal Process Modelling and Simulation, Budapest, GTE, 2006. pp. O-V/15-O-V/15

Martinez-Delgado DI, Felde I, Réti T, Guerro-Mata MP, Colas R.: Experimental determination of heat flows in different cooling media In: & (ed.) 3th International Conference on Thermal Process Modelling and Simulation, Budapest, GTE, 2006. pp. O-IV/2-1-O-IV/2-5