

Felde Imre, Borsi Attila, Kovács Zsolt, Meizl Péter, Réti Tamás *

A Hőkezelési Döntéstámogató Rendszer bevezetése az ISD Dunafernrél

Az acélok edzési technológiájának tervezésére numerikus szimulációs rendszer kifejlesztésére és bevezetésére került sor az ISD Dunafernrél. A Hőkezelési Döntéstámogató Rendszer az edzett munkadarabok elvárt tulajdonságeggyüttesének kialakításához szükséges hőkezelési paraméterek kiválasztásához nyújt segítséget. A rendszer alkalmazhatóságát egy esettanulmányon keresztül mutatjuk be.

A numerical simulation system has been developed for computer aided design of steel quenching operations at ISD Dunafer. The Heat Treatment Decision Support System provides selection of the required heat treatment parameters needed to achieve the desired properties of the hardened work pieces. The reliability of the system developed is presented by a case study.

Bevezetés

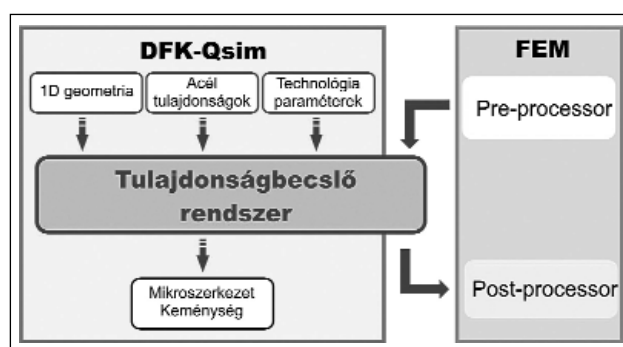
A szerkezeti acélok szokásos immerziós edzési hőkezelése, mint ismeretes, a munkadarab ausztenítéséből, valamint ezt követő lehűtéséből áll, és alapvető célja a kívánt szilárdságú és szívósságú szövet létrehozása, lehetőség szerint a térfogat minél nagyobb hányadában. A hőkezelési folyamat kritikus részművelete az ausztenítési hőmérsékletről való hűtés, mely mintegy meghatározza a szövetszerkezetet és a mechanikai tulajdonságokat a munkadarab keresztmetszetében. Az alkatrészben kialakuló tulajdonságeggyüttes a munkadarab sajátosságainak (anyag, előállapota, geometriája, felületi érdessége stb.), valamint a hűtőközeg hőelvonási képességének is függvénye. A technológia megfelelő szintű ismerete, azaz a hőkezelési berendezések valós hőátadását jellemző paraméterek pontossága a hőkezelési művelet egyes szakaszai közben lejátszódó hőátadási és átalakulási folyamatok tervezéséhez elengedhetetlenül fontosak.

A hőkezelési eljárás tervezhetősége és a technológia monitorozása céljából 2007-ben a Dunafer DFK Kft. (napjainkban ISD Dunafer Zrt., Karbantartási Igazgatóság, Gyártó Egység, Mechanika Üzem; a továbbiakban: Mechanika Üzem) és a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet együttműködésében került sor a Hőkezelési Döntéstámogató Rendszer kifejlesztésére és bevezetésére. Az alábbiakban a projekt keretein belül végzett teendők közül három súlyponti elem rövid ismertetésére térünk ki, a DFK-Qsim nevű szimulációs szoftver felépítéséről ejtünk szót, a hűtőközegek hűtőképességének elemzésére kidolgozott módszert mutatjuk be, valamint a kifejlesztett rendszer alkalmazhatóságát egy hőkezelési esettanulmány tapasztalatai alapján demonstráljuk.

A DFK-Qsim szimulációs szoftver

A Hőkezelési Döntéstámogató Rendszer a mechanika üzem hőkezelés műveleteinek matematikai modellezésére

* Dr. Felde Imre tudományos csoportvezető, Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet, Budapest • Borsi Attila üzemvezető, Kovács Zsolt üzemmérnök és Meizl Péter művezető, Mechanika Üzem, Gyártó Egység, Karbantartási Igazgatóság, ISD Dunafer Zrt., Dunaújváros • Prof. Réti Tamás egyetemi tanár, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék, Széchenyi Egyetem, Győr



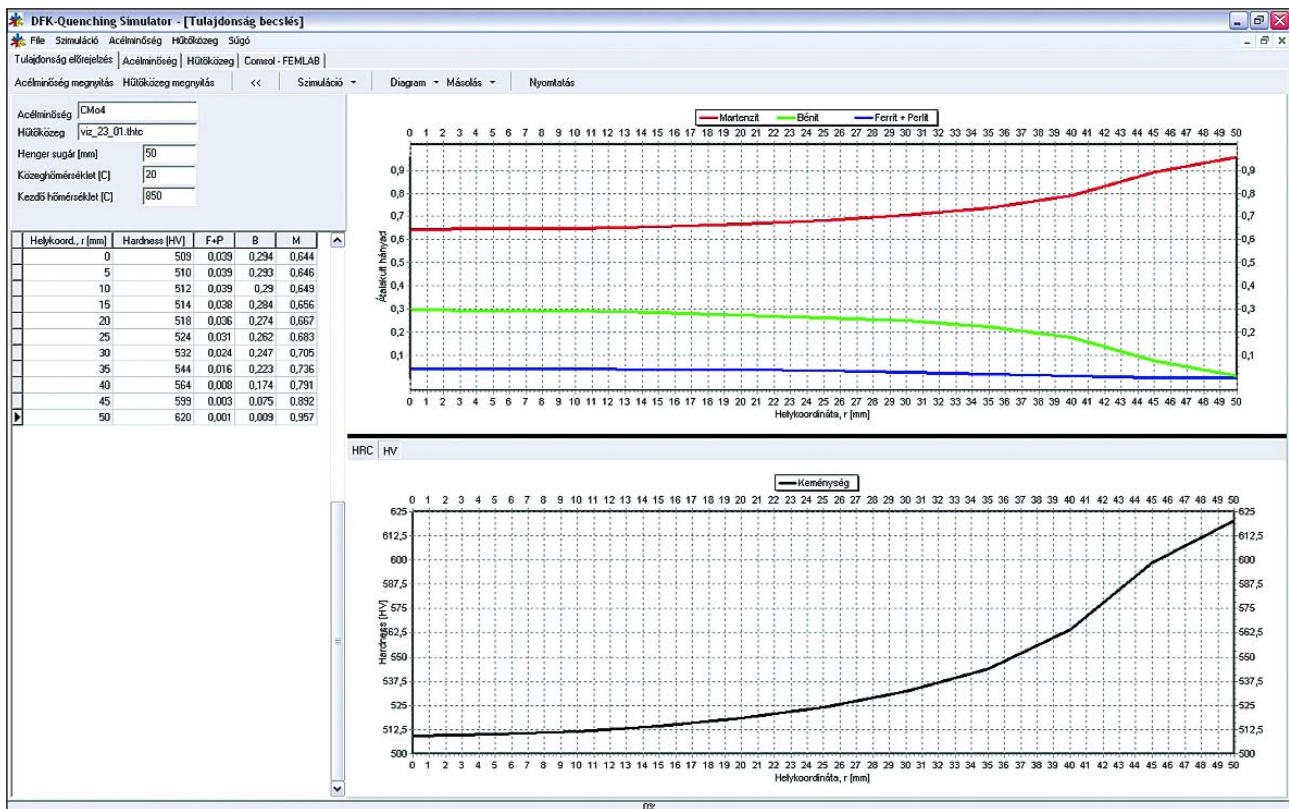
1. ábra: A DFK-Qsim szoftver felépítésének elve

és a gyártási folyamat monitorozására hivatott szoftvert, valamint a berendezések (kemencék és hűtőkádák) hőátadási paramétereinek adatbázisát foglalja magában. A DFK-Qsim elnevezésű szimulációs program a hőkezelés eredményeként az alkatrészben kialakuló szövetszerkezet és keménységeloszlás előrejelzésére alkalmas.

A szoftver magja az ún. Tulajdonsábecslő rendszer (1. ábra), melynek alap gondolata Gergely Márton és Réti Tamás nevéhez fűződik [1-4]. A fémtani-matematikai modellen alapuló számítási algoritmus lehetőséget nyújt az ausztenitbomlással kapcsolatos folyamatok nyomon követésére az ausztenítés követő hűtés során, továbbá az átalakulások eredményeként kialakuló mikroszerkezet és mechanikai tulajdonságok eloszlásának előrejelzésére egy alkatrész teljes keresztmetszetében.

A Tulajdonsábecslő rendszer input adatai a következők:

- A munkadarab geometriai adatai.
- Az acélminőségek adatbázisa, mely a kémiai összetételtől és a kiinduló mikroszerkezettől függő technológiai, hőtechnikai, anyagszerkezeti (kinetikai) paramétereket tartalmazza.
- A technológiai adatok, mint az ausztenítés hőmérséklete és az ausztenítés követő hűtésre vonatkozó adatok (a hőátadási együttható, mint a hőmérséklet függvénye).



2. ábra: A DFK-Qsim szoftver főképernyő képe

A mechanika üzemnél hőkezelt termékek döntő hányada tengelyszimmetrikus, hengeres alkatrész. E sajátosságból következően a szoftver a tranziens hőátadási folyamatot 1D hőátadási modell alapján számítja, így geometriai adatként csupán a hengeres test sugarát vesszük figyelembe. A számított output adatok, mint a hőmérsékletmező időbeli változása, valamint a szövetelemek és keménység eloszlása a hengeres test keresztmetszetében követhetőek nyomon (2. ábra).

A szoftver adatbázisa jelenleg 15 nemesíthető acélmínőség adatait tartalmazza (C35, C45, C60, Cr2, CrV3, CMo4, 41Cr4, 42CrMo4, 34Cr4, 34CrAlNi7, 16MnCr5, 100Cr6, X40Cr13, 30CrNiMo8, 60WCrV7), emellett természetesen bármilyen minőség adatai felvihetőek. Meg kívánjuk jegyezni, hogy a felsorolásban szereplő minőségek átalakulási-kinetikai, illetve kinetikai-mechanikai adatait a szakirodalomban fellelhető átlagos ötvöző tartalom mellett vettük figyelembe. Ebből következően, a szabványban rögzített középértéktől eltérő összetételű acélok szilárdsági tulajdonságai (pl. keménysége) eltérhetnek az elvárt, ismert értékektől.

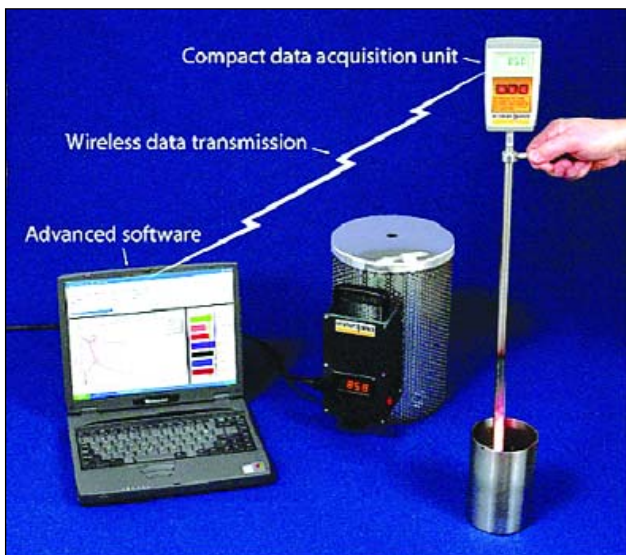
Az edzéskor (lehűtéskor) a munkadarabban végbemenő hőmérsékletváltozás a hőkezelő berendezések, azaz edzőfűzők hőátadási viszonyaitól függenek. A hőkezelési berendezések hőátadása a közeghőmérséklettől és az alkatrész felületi hőmérsékletétől függő hőátadási együtthatóval, $h(T)$ jellemezhető, adható meg. A hőátadási együttható az un. inverz numerikus hőátadási eljárással a szigorúan megtervezett és lefolytatott hőmérsékletmérések adatai alapján származtatható. A DFK-Qsim program az edzett alkatrészben végbemenő lehűlési folyamat számításához $h(T)$ függvényt használja fel.

A szimulációs szoftver további sajátossága, hogy a Tulajdonságbecslő rendszer modul más, külső alkalmazások számára is hozzáférhető. Amennyiben rendelkezésünkre áll, például egy kereskedelmi forgalomban beszerezhető Végeelem program (FEM), akkor az a Tulajdonságbecslő modul függvényeit — mint külső erőforrást — fel tudja használni minden iterációs lépésben. Ebben az esetben a tetszőleges geometriájú munkadarab lehűlésénél a FEM szoftver végzi a hőmérsékletmező számítását, és a lehűlés egyes fázisaiban a DFK-Qsim programmal együttműködve számítja a szövetszerkezet kialakulását. A számítási eredmények ugyancsak a Végeelem programcsomag megjelenítő moduljával (post-processor) elemezhetőek.

A hűtőközegek hőátadási képességének meghatározása

A hőkezelési berendezések hőátadása a közeghőmérséklettől és az alkatrész felületi hőmérsékletétől függő hőátadási együtthatóval, $h(T)$ jellemezhető. A hőátadási együttható az un. inverz numerikus hőátadási eljárással a szigorúan megtervezett és lefolytatott hőmérsékletmérések adatai alapján származtatható. A mechanika üzem telephelyén üzemelő olajos és vizes hűtőközegek hűtőképességének szám szerű analízisét két lépésben végeztük el, egyrészt egy célberendezés segítségével hűlési görbéket rögzítettünk a vizsgált edzőközegekben, majd a hűlési görbékből a hőátadási együtthatót, mint a felületi hőmérséklet függvényét számítottuk.

A lehűlési görbék felvételéhez az ivf SmartQuench márkájú mérőberendezést [5] alkalmaztuk (3. ábra), mellyel hazánkban egyedülállóan a Dunaújvárosi Főiskola

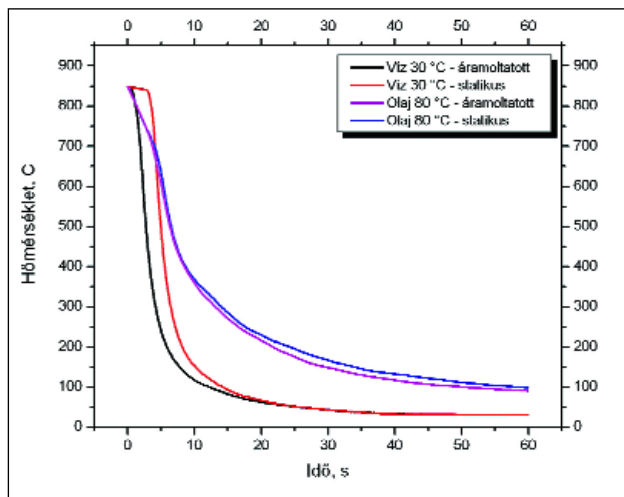


3. ábra: A hűtőközegek hűtési képességének minősítéséhez alkalmazott ivf SmartQuench nevű mérőberendezés

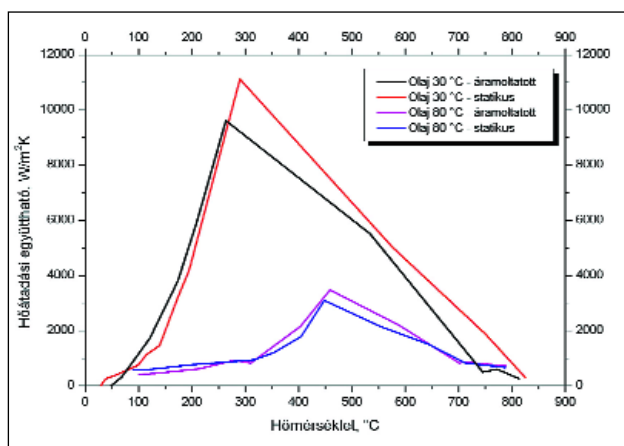
rendelkezik. A berendezés megfelel az ISO 9950 szabványban leírtaknak, azaz a méréshez egy nikkelbázisú ötvözetből készült (Inconel 600) $\varnothing 12.5 \times 60$ mm méretű hengeres próbatestet használtunk, melynek a szimmetria-tengelyében, a véglaptól 30 mm-re egy NiCr-NiAl típusú köpeny termoelem van. A próbatestet 850°C -ról a vizsgált folyadékokban hűtöttük le, miközben a hőmérsékletszenzor jelét a teljes lehülési folyamat során rögzítettük. Az edzőközegek minősítése a teljes lehülési folyamatot reprezentáló hűlési görbe többlépcsős feldolgozásán, elemzésén alapul. Választási döntésünket a következő megfontolások indokolták:

- A próbatestet anyaga olyan ötvözet (Inconel 600), melyben a $0\text{--}1000^\circ\text{C}$ tartományban nem megy végbe látens hőképződéssel együtt járó átalakulás, s a lehetséges kiválások során képződő hő mennyisége elhanyagolható. A mért jel tehát valóban csak a hűtőközeg hőelvonása (és a nikkelbázisú ötvözet hővezetése) nyomán kialakult hőmérsékletet tükrözi.
- A mérés körülményei jól definiáltak, kiterjednek a hűtőfolyadék pontos mennyiségére, a próbatestet helyzetére, felületi érdességére, kezdeti hőmérsékletére, és a vizsgált hőmérsékleti tartományra.
- A berendezés által rögzített jel jól reprodukálható, az azonos körülmények mellett felvett hőmérsékletciklusok közötti különbség csekély mértékű, gyakorlatilag elhanyagolható.

A hűtőközegek hőátadásának számszerű jellemzését a rögzített hőmérsékletciklusok célszerű feldolgozásával, nevezetesen inverz hőátadási módszerrel határoztuk meg. Az inverz számításokat az ivf SQIntegra szoftverrel végeztük [6, 7]. A számos mérés és elemzés közül két példán keresztül mutatjuk be a hűtőközegek hűtőképességének kvantitatív elemzése céljából bevezetett módszer előnyeit [8]. A **4. ábrán** a vizes és az olajos kádban rögzített, áramoltatott és statikus (azaz mesterséges közegkeverés nélkül felvett) lehülési görbéket szemlélve szembevetendő, hogy a víz alapú közeg az olajhoz képest szignifikánsan gyorsabb hűtést biztosít. Ezt a megfigyelést mintegy számszerűen támasztják alá a hűlési görbékből származtatott hőátadási együtt-



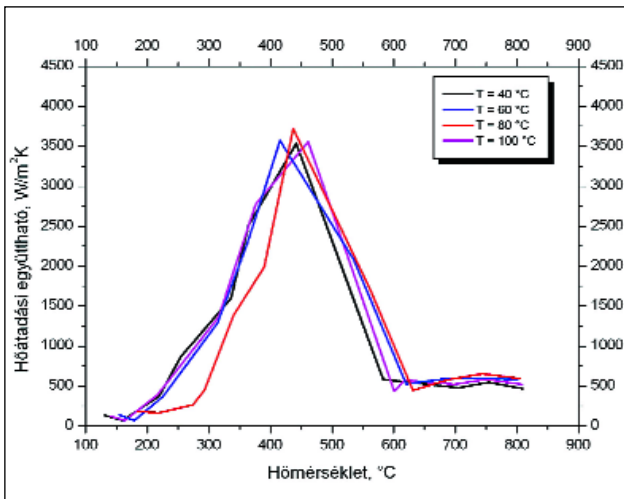
4. ábra: Az olajos és a vizes hűtőkádban mért lehülési görbék áramoltatott és statikus közeg mellett



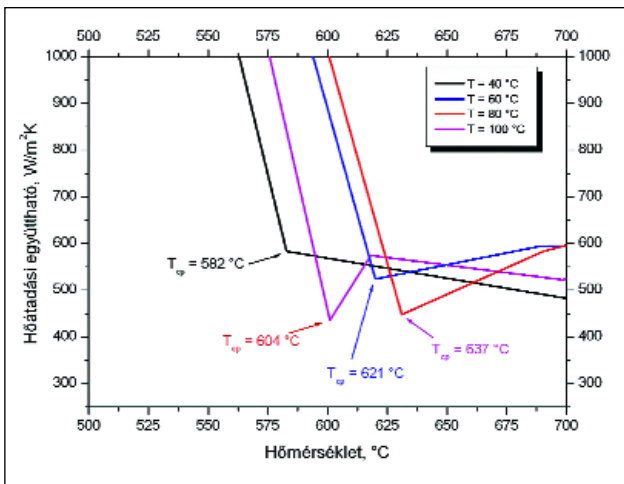
5. ábra: Az olajos és a vizes hűtőkádban mért lehülési görbék alapján származtatott hőátadási együttható függvények, $h(T)$

ható függvények is (**5. ábra**), az olaj hőátadása a teljes vizsgált hőmérsékleti tartományban jelentősen kisebb, mint a víznél mérhetőnél. A hűtőközeg mesterséges áramoltatása mindkét edzőfolyadék hőátadására hasonló hatást gyakorol: egyrészt a közegre jellemző ún. forrási szakaszban nagyobb hőelvonást biztosít, másrészt a hőátadás legnagyobb értékét a nagyobb hőmérsékletek irányába tolja el. Mindkét effektus a statikus közeghez képest a forrási szakaszban nagyobb hőáram kialakulásával jár együtt, mely a várható szilárdsági tulajdonságok javulásához járul hozzá.

Második példaként a különböző hőmérsékletű ($40, 60, 80, 100^\circ\text{C}$) edzőolaj közegben kialakuló hőátadási együtthatókat emeljük ki, melyeket a **6. ábra** szemléltet. A hőátadási görbék karakterüket szemlélve csaknem azonosnak tekinthetők. Az edzett munkadarabban kialakuló tulajdonságok szempontjából azonban a folyadékra jellemző, a gőz és a forrási fázist elválasztó átmeneti hőmérséklet (T_{cp}) vagy más néven a Leidenfrost hőmérséklet mértéke szembevetően függ a közeg hőmérsékletétől (**7. ábra**). A folyadékba merített forró alkatrész felületén kialakuló gőzhártya az említett hőmérsékleten szakad le, ekkor veszi kezdetét a forrási fázis, mely erőteljes, a gőzfázisnál nagyságrendekkel nagyobb hőelvonással jár együtt. Minél nagyobb hőmérsékleten tűnik el a gőzfátyol az alkatrész



6. ábra Az olaj alapú közegre jellemző hőátadási együttható a közeg hőmérsékletének függvényében



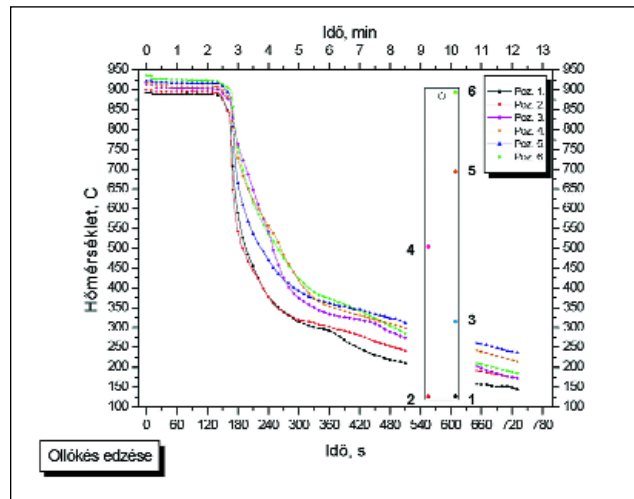
7. ábra: Az olaj alapú közegre jellemző Leidenfrost hőmérsékletek a közeg hőmérsékletének függvényében

felületéről, annál nagyobb hűlési sebesség alakulhat ki az alkatrész térfogatában, mely a kedvező szilárdsági tulajdonságok kialakulásához vezet. A vizsgált edzőolaj T_{cp} átmeneti hőmérséklete 60–80 °C-os közeghőmérsékletnél a legnagyobb, az edzési teljesítmény maximalizálásához ebben a hőmérséklet-tartományban kívánatos tartani a közegét.

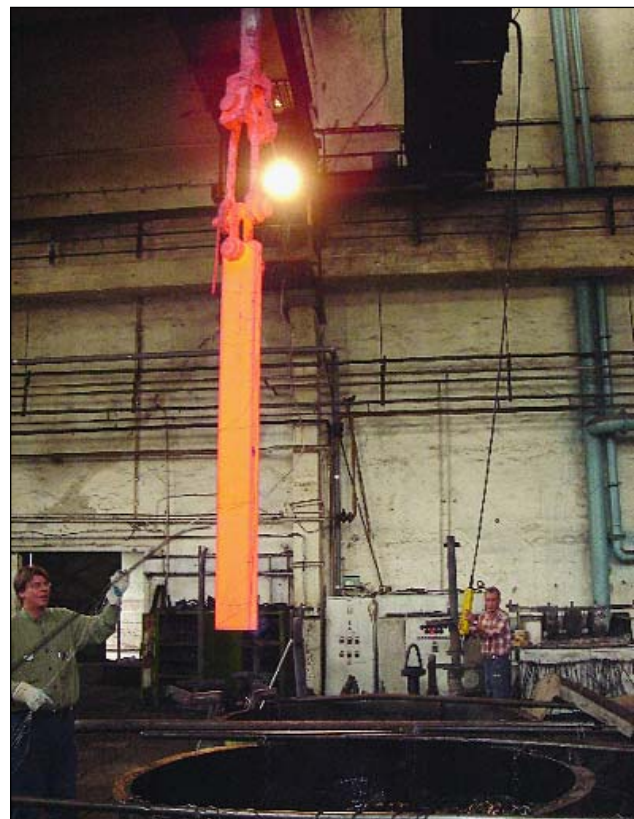
Validációs vizsgálatok

A kifejlesztett Döntéstámogató Rendszer alkalmazhatóságának ellenőrzése céljából összehasonlító, validációs vizsgálatokat végeztünk. Vizsgálatunk tárgyául a Lőrinci Hengerműben alkalmazott ollókést választottuk, nevezetesen a bemeztéses edzés során a szerszámban kialakuló keménységet hasonlítottuk össze a hőkezelési művelet szimulációjánál számítottal.

A hengerelt szalagok vágásához használt ollókés alapanyaga 60WCrV7 minőség (1. táblázat), befoglaló méretei 1800×200×60 mm. A hőátadási paraméterek meghatározásához 6 db termoelemet helyeztünk el az ollókés előre meghatározott pontjában. Az 1.8 mm átmérőjű furatok-



8. ábra: Az ollókésben elhelyezett termoelemek helye és a hőkezelés során rögzített lehülési görbék



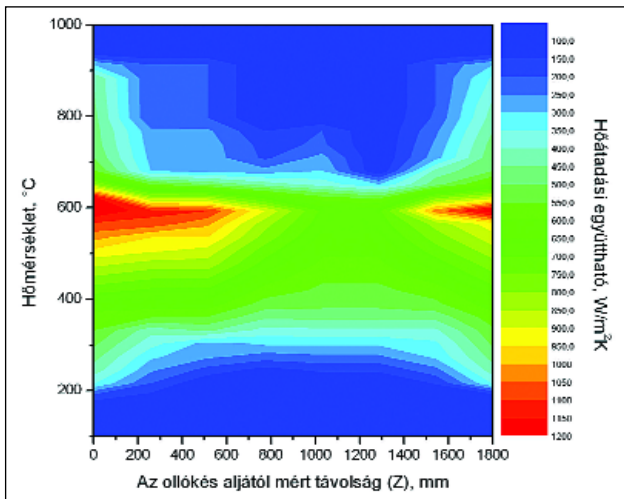
9. ábra: Az ollókés edzése

ba szillesztett termoelemeket speciális fémdugókkal rögzítettük. A termoelemek elhelyezésének terve a 8. ábrán látható. A hőkezelési műveletet az előírt technológia szerint végeztük, azaz a 910 °C-ra való hevítést követően 80 °C-os keringtetett olajban hűtöttük le (9. ábra).

1. táblázat: A 60WCrV7 minőség kémiai összetétele

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
0,55	0,94	0,015	0,00	0,012	1,270	0,05	0,18	0,12

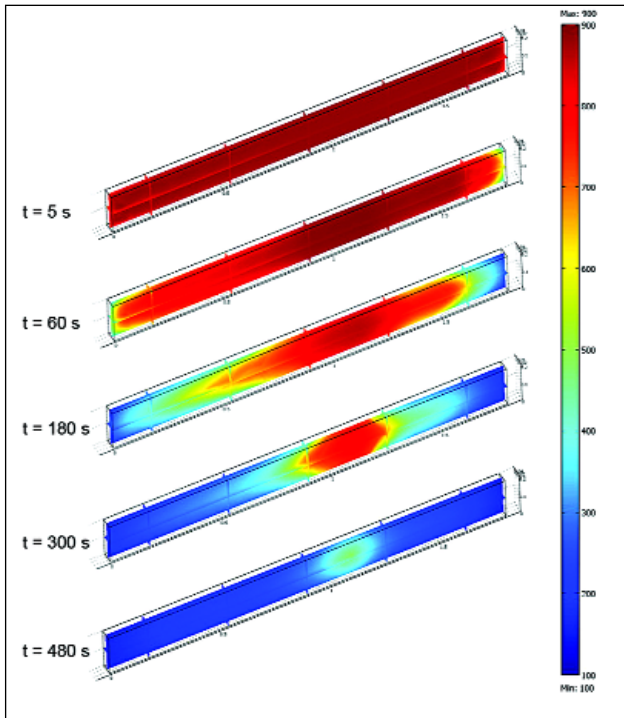
A lehülési görbék szemlélve (8. ábra) szembevetendő, hogy az ollókés hosszanti tengelye mentén az aljához (azaz ah-



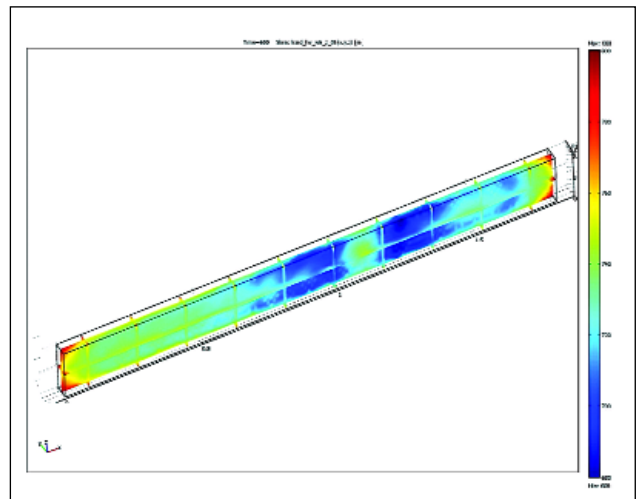
10. ábra: A hőátadási együttható az ollókés aljától mért távolság és a hőmérséklet függvényében

hoz a felülethez, mely a hűtőkádban a legmélyebbre került) és tetejéhez közeli pontok gyorsabban hűltek, mint az alkatrész közepe. Más szóval, a hőelvonás a hely szempontjából heterogénnek tekinthető. Ebből következően az edzési folyamat szimulációjához a hűtőközeg hőátadását a hőmérséklet és a helykoordináta függvényeként vettük figyelembe. A hőmérsékletmérések adatai alapján az ivt SQIntegra szoftverrel határoztuk meg a hőátadási együtthatót (10. ábra), mely az ollókés hossza mentén az aljától mért távolság és a felület hőmérsékletének függvénye.

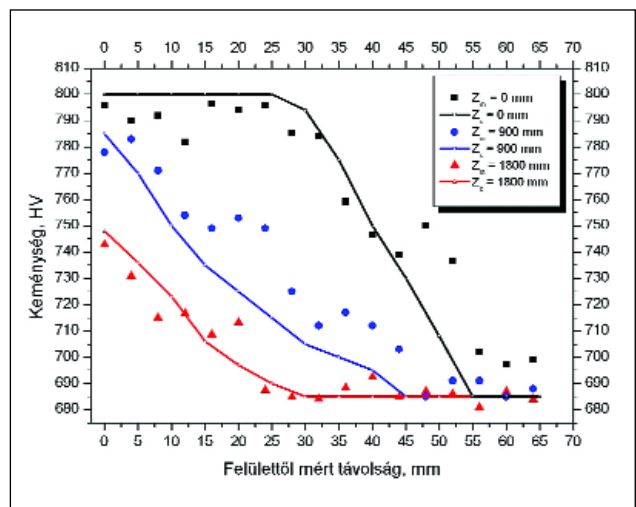
A lehűlés közben az ollókés térfogatában kialakuló hőmérsékletmező változása a 11. ábrán követhető nyomon. Az alkatrész számított keménységeloszlását a 12. ábra szemlélteti. A hőkezelt alkatrészből három mintát vágunk ki és készítettünk elő, az ollókés aljából ($Z_m = 0$ mm), tetejéből ($Z_m = 1800$ mm) és közepéből ($Z_m = 900$ mm). A kivett mintákból köszörülés után a BayATI-ban kifejlesztett,



11. ábra: Az ollókés hőmérséklet-eloszlása az idő függvényében



12. ábra: A számított keménység eloszlása az ollókés térfogatában



13. ábra: Az ollókés keskenyoldali középvonalában mért (Z_m) és számított (Z_c) keménység a felülettől mért távolság függvényében (az ollókés aljától $Z_m = Z_c = 0,900$ és 1800 mm távolságban)

tett, léptetőmotoros asztallal ellátott, ultrahangos elven működő keménységmérővel vettük fel a keménységeloszlást. A 13. ábra a három mintánál a keskenyoldali középvonalában mért (Z_m) és a szimuláció során előre jelzett (Z_c) keménységeloszlást szemlélteti. A keménységmérések adatai a hőmérsékletmérések során szerzett tapasztalatokat támasztják alá, hiszen nagyobb keménység a gyorsan hűlő tartományban, azaz a szerszám aljához és tetejéhez közeli helyeken adódott, míg ennél alacsonyabb szilárdságú a viszonylag lassan hűlő középső rész. A mért és a becsült keménység legnagyobb eltérése kb. 5%, a számított értékek a mértékekhez hasonló trendet követnek. Ezek az eredmények, úgy véljük, kielégítik a tulajdonságbecslés pontosságával, illetve a Döntéstámogató Rendszer alkalmazhatóságával szemben támasztott szokásos elvárásokat.

Összefoglalás

A mechanika üzennél kifejlesztett és bevezetett Hőkezelési Döntéstámogató Rendszer a hőkezelési műveletek, első sorban az edzési eljárások tervezésének és a technológia

monitorozásának hatékony eszköze. A rendszer részét képező DFK-Qsim elnevezésű tulajdonságbecslő szoftver az edzés során lejátszódó hőtani és fémtani folyamatok számítását teszi lehetővé. A szimulációs program a lehűlés közben végbemenő hőciklust, valamint az ausztenitbomlás eredményeként kialakuló szövetszerkezetet és keménységet becslő 1D-os, hengerszimmetrikus alkatrészek esetében. A hűtőközegek hűtőképességének számszerű minősítésére bevezetett eljárás az edzett munkadarab elvárt tulajdonság-együttesének kialakításához szükséges hőkezelési paraméterek kiválasztásához nyújt segítséget. A hőkezelési esettanulmányok tapasztalatai és eredményei a kifejlesztett szoftverek és módszerek ipari alkalmazhatóságát támasztották alá, melyek hozzájárultak ahhoz, hogy a mechanika üzem munkatársainak mindennapi munkáját segítő eszközökké váljanak.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani a Dunaújvárosi Főiskola Anyagtudományi és Kohászati Intézete munkatársainak, azaz dr. Zsámbók Dénesnek, dr. Csepeli Zsoltnak és Szalai Ibolyának a projekt során nyújtott segítségükért.

Irodalom

1. Réti T. et al : ASM Handbook, 4. Heat Treating, 1981, p. 638-656
2. Gergely M., Konkoly T.: Számítástechnika alkalmazása szerkezeti acélok és hőkezelési technológiák kiválasztásához OMIKK, 1987
3. Réti T. , Gergely M., Heat Treatment of Metals, 1991, 18, p. 117-119
4. T. Réti, Z. Fried, I. Felde: Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model, Computational Materials Science, 2001, 22, p. 261-278
5. S. Segerberg, J. Bodin, I. Felde: A new advanced system for Safeguarding the performance of the quenching process, Heat treatment of metals, 2003, 2, p. 49-51
6. S. Segerberg, J. Bodin, I. Felde: Hardware/software combo measures performance in quenching, Heat Treating Progress, 4, 2004, 3, p. 28-30
7. I. Felde, I. Czinege, T. Réti, B. Smoljan, R. Colas, Quenchant evaluation by using quality functions, 3rd International conference on Thermal Process Modelling and Simulation, 2006, O-I/8
8. Felde I.: Új módszer acélok edzéséhez használatos hűtőközegek hűtőképességének minősítésére, PhD értekezés, 2007, <http://kvt99.lib.uni-miskolc.hu:8080/eleMEK/1v.jsp?id=246>