

**Acélok edzéséhez használatos hűtőközegek  
hűtőképességének minősítése kvantitatív  
kritérium alapján**

(PhD értekezés)

Készítette:

**Felde Imre**

**Miskolci egyetem**

**Fémtni Tanszék**

**2006.**

**Tudományos vezető:**

**Dr. Réti Tamás**

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés, célkitűzések .....</b>	<b>1</b>
<b>2. A lehűlés közben végbemenő hőátadási folyamat .....</b>	<b>2</b>
<b>3. A hűtőközegek típusai</b>	<b>6</b>
3.1 A víz, mint edzőközeg.....	6
3.2 Az ásványi olajok .....	8
3.3 A polimer adalékos hűtőközegek .....	10
<b>4. A hűtőközegek minősítése területén alkalmazott eljárások .....</b>	<b>14</b>
4.1 A hűtési teljesítmény mérésére kifejlesztett módszerek és eszközök.....	14
4.2 Az edzési teljesítmény minősítésére kidolgozott eljárások .....	19
<b>5. A kifejlesztett minősítő módszer.....</b>	<b>25</b>
5.1. Lehűlési görbe kódolás és zajszűrés Fourier analízis alkalmazásával .....	32
5.1.1 Szűrő és kódoló algoritmus .....	33
5.1.2 A Fourier analízis zaj szűrés teljesítményének tesztelése és az optimális együttható szám meghatározása.....	35
5.2. Hőátadási együttható meghatározása inverz módszerrel .....	40
5.2.1 Az inverz számítási módszer elve .....	41
5.2.2 Szimulációs vizsgálatok a hőátadási együttható meghatározására.....	45
5.3 A tulajdonság-becslő rendszer .....	51
5.3.1. A modell felépítése (modul elemek leírása) .....	51
5.4 Az Inverz-Predikciós Egység validációja.....	59
<b>6. Hűtőközegek hűtőképességének elemzése a kidolgozott módszer alapján .</b>	<b>65</b>
6.1 Hűtőközegek minősítése becsült tulajdonságok alapján .....	65
6.2 Hűtőközegek minősítése minőségfüggvények alkalmazásával.....	71
<b>7. Összefoglalás.....</b>	<b>78</b>
<b>Irodalomjegyzék .....</b>	<b>81</b>

## Jelölések jegyzéke

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
$\Psi$	db	A mért hőmérsékletgörbét reprezentáló adatárok száma
$\Omega$	$m^3$	A vizsgált test térfogata
$\Gamma$	$m^2$	A vizsgált test felszíne
$C_p$	$J/kg^\circ C$	Fajhő
$\rho$	$kg/m^3$	Sűrűség
$Q$	$J/m^3$	Látens hő
$\tau$		Az hőtadási együttható meghatározásához alkalmazott ismeretlen paraméterek vektora
<b>A</b>		A nemlineáris egyenletrendszer együtthatóinak mátrixa
<b>b</b>		A nemlineáris egyenletrendszer együtthatóinak vektora
$I_i$		Az „i” felülethez tartozó a kezdeti beállítás (initial guess) függvény
$D_a$	m	Az ausztenit szemcsemérete
y	%	Az ausztenitből átalakult termékek relatív hányada
$Y_A(t)$		Mért, zajos függvény
$Y_{F,M}(t)$		A zajszűrésre alkalmazott, M db Fourier együtthatókkal közelített függvény
<b>M</b>	db	Fourier együtthatók száma
$E_{Fa}$		Teljes átlagos eltérés mérőszáma
$E_{Fr}$		Teljes relatív eltérés mérőszáma
<b>r</b>		Hely-koordináta vektor
<b>D</b>	m	Henger átmérője
$h_c(T)$	$W/m^2K$	Hely-koordinátától független (hőmérséklettől függő) hőtadási együttható
<b>h</b>	$W/m^2K$	Felületi hőtadási együttható
<b>t</b>	s	Idő
<b>T</b>	$^\circ C$	Hőmérséklet
$T^m(t)$	$^\circ C$	Mért hőmérséklet az idő függvényében
$T^s$	$^\circ C$	Felületi hőmérséklet
$T^{am}$	$^\circ C$	A testet körülvevő környezet (hűtőközeg) hőmérséklete
$T_{vp}$	$^\circ C$	A gőzképződési és forrási szakasz átmeneti hőmérséklete (Leidenfrost hőmérséklet)
$T_{cp}$	$^\circ C$	A forrási és konvekciós szakasz átmeneti hőmérséklete
$T_{vp}^v$	$^\circ C$	A gőzképződési és forrási szakasz látszólagos átmeneti hőmérséklete
$T_{cp}^v$	$^\circ C$	A forrási és konvekciós szakasz látszólagos átmeneti hőmérséklete
<b>k</b>	$W/mK$	Hővezetési tényező
<b>H</b>	$1/m$	Grossmann féle „edzhetőségi konstans”
$HP_{olaj}$		Olajok edzési teljesítményét jellemző, tapasztalati képlettel számított jellemző (4.2)
$HP_{polimer}$		Polimer adalékos közegek edzési teljesítményét jellemző, tapasztalati képlettel számított jellemző (4.3)
$HP_{Castrol}$		Olajok edzési teljesítményét jellemző, tapasztalati képlettel számított jellemző (4.4)
$CR_T$	$K/s$	„T” hőmérsékleten kialakuló hűlési sebesség,
$P_j^{mért}$		A hőkezelés kimenetelét jellemző „i” mért tulajdonság
$P_j^{sim}$		A hőkezelés kimenetelét jellemző „i” becsült tulajdonság
<b>R</b>		A mért hőciklusok karakterisztikáját jellemző mennyiségek vektora
$QF_j^T$		A $P_j^{sim}$ tulajdonságot jellemző primer minőségfüggvény
$QF_j^h$		A $P_j^{sim}$ tulajdonságot jellemző szekunder minőségfüggvény

## 1. Bevezetés, célkitűzések

A dolgozat az acélok hőkezelése területén az egyik legfontosabb hőkezelési eljárás, a bemeztetés (immerziós) edzési technológiához alkalmazott hűtőközegek hűtőképességének, valamint a szerkezeti acélokban kialakuló tulajdonságokra való hatásának, azaz edzési teljesítményének kvantitatív vizsgálatával foglalkozik.

A hipoeutektoidos szerkezeti acélok szokásos immerziós edzési hőkezelése, mint ismeretes a munkadarab ausztenitesítéséből, 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 ausztenitesítési hőmérsékletre való hűtés, mely mintegy meghatározza a szövetszerkezetet és a mechanikai tulajdonságokat a munkadarab keresztmetszetében. A bemeztetéshez alkalmazott hűtőfolyadékok edzési teljesítménye az alkatrész sajátosságain (alapanyaga, előállapota, geometriája, felületi érdessége, stb) kívül a közeg hőelvonási vagy hűtési képességének is függvénye. A közeg hőelvonásának karakterisztikáját a közeg típusa (olaj, víz), hőmérséklete, áramlási viszonyai, koncentrációja, szennyezettsége határozza meg.

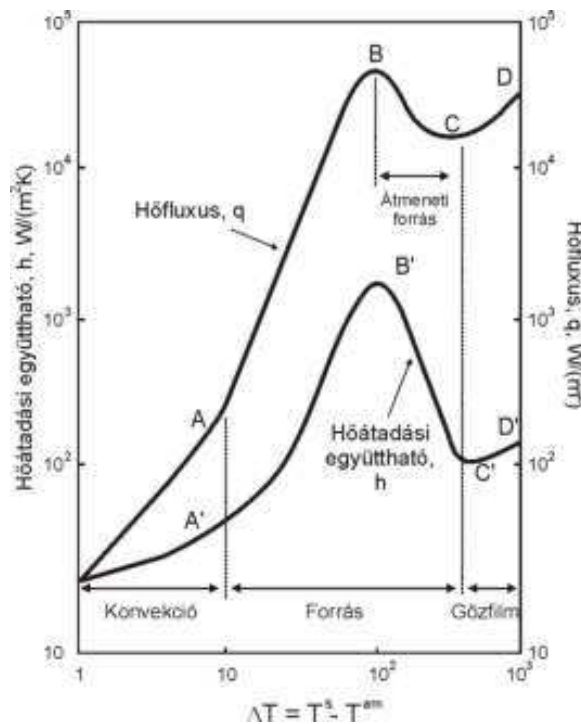
Az elmúlt években kifejlesztett és bevezetett minősítő módszerek eredendően standard berendezésekkel rögzített lehűlési görbék elemzésén alapulnak. Ezek a technikák első sorban a folyadékok hűtési képességének összehasonlítására, rangsorolására alkalmasak, a lehűlés során a munkadarab és a közeg interakciójából 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 problémák, illetve gyakorlati jelentőségű feladatok megoldására irányultak:

1. Céлом volt 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 az algoritmus kritikai vizsgálata.
2. Célul tűztem ki a felületi hőátadási együttható, mint a munkadarab és a hűtőközeg közötti hőátadást jellemző határfeltétel meghatározására nemlineáris inverz eljárás kidolgozását. A becslés pontosságának ellenőrzése céljából végzett numerikus kísérletek eredményeinek tükrében szándékoztam alátámasztani a kidolgozott numerikus módszer hatékonyságát.
3. A dolgozat fő célkitűzése olyan szimuláción és tulajdonságbecslésen alapuló, szekvenciális metodológia kidolgozására irányult, mely a mért lehűlési görbék és a becsült hőátadási együttható adatai alapján a hőkezelt munkadarabban kialakuló szövetszerkezeti és mechanikai tulajdonságok közötti reláció leírását, azaz minőségfüggvények előállítását teszi lehetővé. Az egyes hűtőfolyadékok hűtőképességének, illetve edzési teljesítményének kvantitatív értékelése a minőségfüggvények alapján valósítható meg.

## 2. A lehűlés közben végbemenő hűtadási folyamat

A megfigyelések szerint [1], ha a munkadarab felületi hőmérséklete ( $T^s$ ) jóval a hűtőközeg hőmérséklete ( $T^{am}$ ) felett van, akkor a hűtadási folyamatokat – a hűtési mechanizmust tekintve – négy különböző szakaszra lehet bontani. Ezek rendre a gőzképződési vagy gőzfilm (vapour blanket), átmeneti forrás (transition boiling), forrás (nucleate boiling), illetve a konvekciós (convection) szakaszok. A négy szakasz a hűlés közben kialakuló hőáram sűrűség és hűtadási együttható szignifikáns tartományait képezik, melyek az un. Nukiyama diagramon (2.1 ábra) figyelhetők meg.

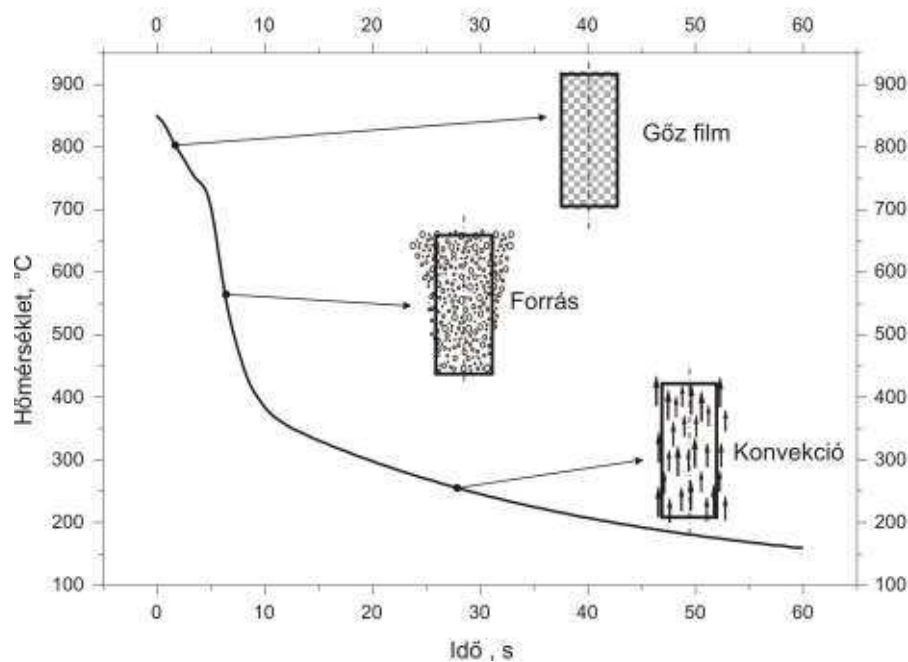


2.1. ábra A forrás szakaszai a közeg és a munkadarab felületi hőmérséklet különbségének függvényében (Nukiyama diagram [1])

Röviddel a munkadarab edzőközegbe való helyezése után gőzfázisú film képződik az alkatrész felszínén (D-C szakasz), mely gyakorlatilag hőszigetelő réteggént viselkedik, s a viszonylag nagy „hőellenállásának” köszönhetően lassítja a hűtadást. A hő ekkor sugárzás, valamint a filmrétegen keresztül történő konvekció útján távozik. A felület hűlése során a gőzfilm réteg elvékonyodik, majd az úgynevezett Leidenfrost hőmérsékleten (C), mely a gőzfilm képződési és az átmeneti forrás szakaszt választja el egymástól, a gőzfilm felszakad és a közeg forrása veszi kezdetét. Miután a munkadarab felületi hőmérséklete a Leidenfrost hőmérséklet alá süllyed, a közeg forrása következtében a gőzfilm az un. DNB (Departure of Nucleate Boiling, a forrási szakasz kezdete) hőmérsékleten teljesen eltűnik. Az átmeneti forrási szakaszban folyamatosan növekvő hőfluxus értéke ezen a hőmérsékleten éri el a maximumát (B) és ekkor kezdődik a tisztán forrási szakasz. Ezt követően a hőmérséklet csökkenésével a hőáramsűrűség is fokozatosan csökken, egészen az edzőközeg

forráspontjáiig (A). Ekkor kezdődik a konvekciós szakasz, amely a forráspont alatti hőmérsékleten jellemzi a felületi hőátadást [2, 3, 4].

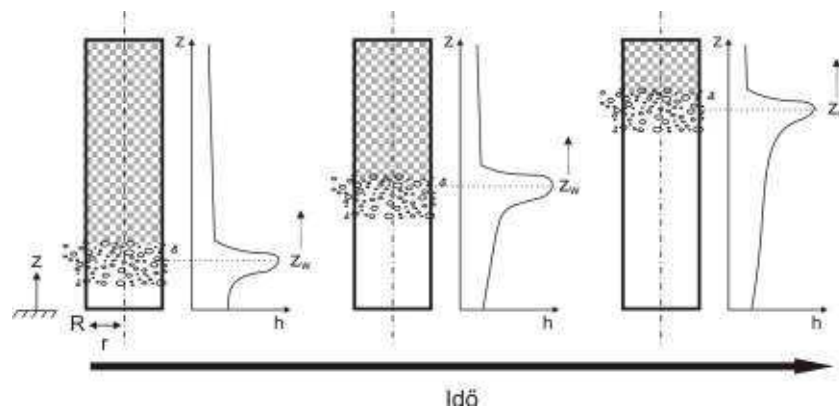
A hűlés mechanizmusának e négy jellegzetes szakasza élesen nem határolható el egymástól. Olyan folyamatok ezek, melyek keletkeznek, kialakulnak és befejeződnek. Ennek következtében egyes szakaszok között kisebb-nagyobb mértékű átfedések lehetségesek. Az „átmeneti forrás” szakasza a gyors lehűlési folyamatoknál ( $>10$  K/s) általában nehezen detektálható és emiatt annak kezdete és vége csak igen körülményesen határozható meg. A gyakorlatban ezért csupán a gőzfilm, a forrási és a konvekciós szakaszt veszik figyelembe (2.2 ábra).



2.2 ábra A folyadék hőelvonási szakaszai hengeres test palástja mentén

Az előzőekből következik, hogy az ausztenítés hőmérsékletéről az edző közegbe helyezett test felszínén a hűtési folyamat "dinamikájára" jellemző gőzfilm képződési, forrási, valamint konvekciós szakasz időben egymás utáni sorrendben jelenik meg (2.2 ábra). A hűtési körülményektől függően az egymást váltó szakaszok kezdeti időpontja és terjedelme igen eltérő lehet, még egyazon próbatest eltérő felszíni pontjaiban is. Ez a jelenség különösképpen jól észlelhető, például a hengerpaláston, amelynek felszíni pontjait a "z" hely-koordináta reprezentálja (2.3 ábra). A megfigyelések és mérések szerint a felhevített próbatest hűtőközegbe merítésekor - ennek kezdeti pillanatában - a teljes felületen gőzfilm alakul ki, amely a hűtés első szakaszával azonosítható. Ez a szakasz azonban csakhamar véget ér, és kezdetét veszi a forrási szakasz, mégpedig legkorábban a hengerpalást alján, azaz a  $z = 0$ ,  $r = R$  koordinátájú körvonal mentén. A gőzfilm felszakadása az idő múlásával fokozatosan kiterjed a palástfelület egyre nagyobb részére, mégpedig oly módon, hogy a "felszakadási front" alulról megindul felfelé a palást mentén. Nyilván, ott ahol a gőzfilm felszakadt, azonnal megkezdődik a hűtőközeg forrása, ami a buborékok képződésével jár együtt és így jól detektálható. A felszakadási front helyzete, akárcsak a forrási jelenségből

adódó tranziens hőátadási együttható alakulása ( $h$ ) a  $z_w$  koordinátával egyértelműen jellemezhető a palást mentén (2.3 ábra). A  $z_w$  pont alatti palást felületen a hűtőközeg forrásban van, következésképp nedvesíti ezt a felületet. A  $z_w$  pont felett, mivel itt még létezik a gőzfilm a palástfelület mentén, a közeget a felületet nem nedvesíti. A szakirodalomban gyakran a nedvesítési front (wetting front) megnevezést használják a gőzfilm képződési szakasz és a forrási szakasz közötti átmenet hely-koordinátájának megnevezésére, míg a front mozgását nedvesítési kinetika (wetting kinetics) néven említik [2]. Amikor a munkadarab felületének hőmérséklete a hűtőközeg forráspontja alá csökken, a forrási szakasz megszűnik és ezt követően már a konvekciós szakasz veszi kezdetét, tekintettel arra, hogy a felületről csak konvekció útján távozik a hő.



2.3 ábra A nedvesítési front ( $z_w$ ) helyzete és mozgása

Az imént részletezett példa arra mutat rá, hogy a forrási jelenség során a front mozgása az általa determinált hőátadás következtében a henger alkotója mentén (a felülettől mért távolság függvényében) inhomogén hőmérsékletciklus és ezáltal inhomogén tulajdonságok kialakulásához vezet. A nedvesítési front sajátos mozgása szélső esetekben a munkadarab deformációját [5], károsodását okozhatja (2.4 ábra). A fentebb részletezett gondolatmenetből kitűnik, hogy az edzés folyamán végbemenő felületi hőátadás olyan bonyolult dinamikus folyamat, amelynek a komplex szemléletű, matematikai leírása napjainkban is az anyagtudományi kutatások élvonalába tartozik.



2.4 ábra Edző hőkezelés során deformálódott alkatrész [5]

A folyadék nedvesítési kinetikája a felületi hőátadási együttható függvényével jellemezhető, melynek karakterisztikáját alapvetően az említett három hőmérséklet és a hozzájuk tartozó  $h$ [W/m<sup>2</sup>K] érték determinál. Azt, hogy az A, B, és C értékek pontosan milyen hőmérsékleti tartományban helyezkednek el, illetve, hogy milyen hőátadást határoznak meg a következő tényezők befolyásolják: a munkadarab felületi hőmérséklete és felületi minősége, a hűtőközeg hőmérséklete, az áramlási viszonyok, valamint hogy az edzőközeg bázisát milyen folyadék alkotja. Gyakorlati szempontból, azaz a hőkezelés eredményeként kialakuló tulajdonságok szempontjából azonban az acél edzésének eredményességét nagyrészt eldönti a célszerűen megválasztott hűtőközeg. A következő fejezetben a bemeztetéses edzéshez alkalmazott hűtőfolyadékok típusairól ejtünk szót.



### 3. A hűtőközegek típusai

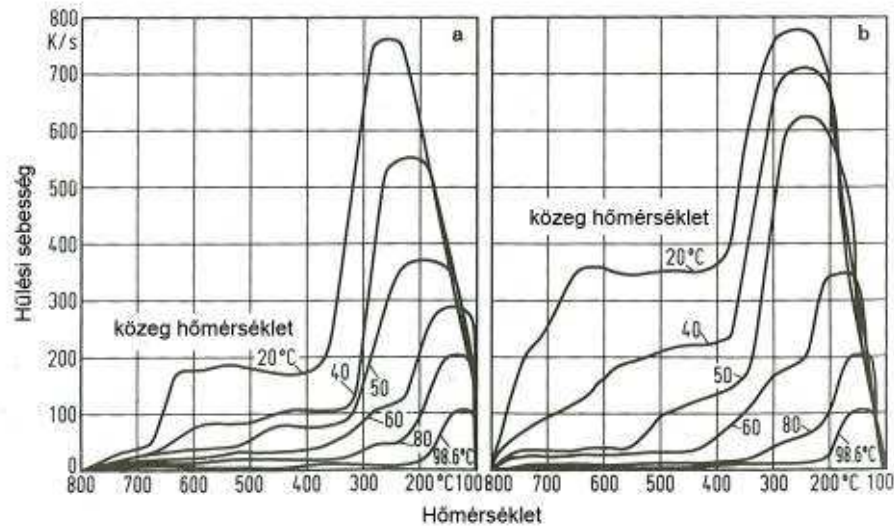
Az edzési technológiához használatos hűtőközegek többféle szempont szerint is csoportosíthatók. Egy elfogadott felosztási elvből kiindulva szokás megkülönböztetni: gáz, folyadék és szilárd halmazállapotú médiumokat. Ezt a besorolást követve a gyors és szabályozott hűtést biztosító vízpermet hűtés, mely cseppfolyós és gáz közeg elegye (vízsugár hűtés, water-jet) vegyes halmazállapotúnak tekinthető. Az ipari gyakorlatban alkalmazott közegek túlnyomó része folyadék, melyek további három osztályba sorolhatóak, úgy mint víz-, olaj-, és fém, vagy folyékony só alapú közegek.

Egy másik koncepció szerint a közegek az alapján is csoportosíthatóak, hogy a hűtés közben kialakul-e forrási jelenség, ekkor párolgó (gőzfázist alkotó), vagy nem-párolgó médiumok különböztethetőek meg. Az utóbbi csoportba a só és fémoldatok, valamint a gázok tartoznak. Ez a besorolás fizikailag is megalapozottabb, mert a két típust az eltérő hőelvonási mechanizmusuk, azaz a lehűlési kinetikájuk és az acél ötvözetben végbemenő fázisátalakulásra kifejtett hatásuk alapján különbözteti meg [6]. A különbség arra utal, hogy a forrási folyamat azáltal, hogy számottevő hőmennyiséget emészt fel (abszorvál), részben abban a hőmérséklet tartományban gyorsítja fel a hűlési folyamatot, melyben a túlhűtött ausztenit instabil. Minél nagyobb hőmérséklet tartományban alakul ki a forrási jelenség, annál jelentősebb a hőelvonás, és nagyobb a lehűlési sebesség, mely az edzés kimenetelét kedvezően befolyásolja. A bemelegítési edzési folyamathoz alkalmazott hűtőközegek folyadék halmazállapotúak, döntő többségükben víz és olaj-bázisúak.

#### 3.1 A víz, mint edzőközeg

Az edzési technológiához legrégebb óta használt hűtőközeg a víz. Előnye, hogy olcsó, nem ártalmas az egészségre, nem gyúlékony és szűrés, ülepítése után is környezetbarát marad. Mindezen előnyök mellett alkalmazásának legszembetűnőbb hátránya, hogy hőelvonási képessége a hűtött felület 380 – 100 °C tartományában a legnagyobb, ebben a hő-intervallumban figyelhető meg forrása, mely megegyezik a legtöbb acél martenzites átalakulási tartományával. A martenzites átalakulás, mint ismeretes belső feszültségek kialakulását, a munkadarab geometriájának torzulását, szélsőséges esetekben repedését eredményezheti. A víz forráspontja feletti hőmérsékleten kialakuló gőzfilm instabil, melynek következtében, jóllehet a hőmérséklet csökkenésével az alkatrész jelentős részén a film felszakad, addig furatokban, hornyokban a gőzfátyol nem tűnik el. A lehűlési sebesség ezeknek a helyeknek a közelében oszcillál, mely hő-feszültség termelődéséhez, alakváltozáshoz, és a mechanikai tulajdonságok heterogén eloszlásához vezet. A víz széleskörű alkalmazásának korlátait jelenti, hogy hőelvonási képességét hőmérséklete [7], az áramlási, áramoltatási viszonyai mellett szennyeződésének mértéke is jelentősen befolyásolja. Ezt a jelenséget támasztják alá a 3.1 ábra diagramjai. Az „a” diagram görbéi a különböző hőmérsékletű vízben lehűtött 20 mm átmérőjű ezüst golyó középpontjában mért hűlési sebességet szemléltetik. A forrási szakasz 20 °C hőmérsékletű hűtővíz esetén 380 °C körül, míg 60 °C hőmérsékletű hűtővíz esetén 240 °C körül veszi kezdetét. A forrási

szakaszban a lehülési sebesség maximuma a hűtővíz hőmérsékletét emelve szignifikánsan csökken.



3.1 ábra A vízben lehűtött 20 mm átmérőjű ezüst golyó középpontjában mért hűlési sebesség víz hőmérsékletének függvényében nyugvó közegben (a) és 0.25 m/s áramoltatási sebesség mellett

A keringtetés, azaz a víz mesterséges áramoltatása kedvezően hat hőelvonási képességére. A „b” diagramon a 0.25 m/s keringtetési sebesség mellett kialakult hűlési sebességet a próbatest és a közeg hőmérsékletének függvényében követhetjük nyomon. Az azonos közeghőmérsékletre tartozó nyugvó és áramoltatott közegben felvett görbéket összehasonlítva megállapítható, hogy a keringtetés a teljes hűlési tartományban növeli a hűtési sebességet, melynek következtében a hűlési folyamat egyenletesebben, kiegyenlítettebben megy végbe. Ez a jelenség a gőzfázis kondenzáció sebességének növekedésével magyarázható, mely végső soron vékonyabb gőzfátyol kialakulását, ezáltal nagyobb hővezetést eredményez a gőzfázisban. A keringtetés kedvező hatását ipari tapasztalatok támasztják alá, nevezetesen a mesterséges áramoltatás mellett tapasztalható keménységeloszlás homogenitásának javulásáról, valamint deformáció és repedés valószínűségének csökkenéséről számolnak be [8].

Az edzéshez alkalmazott víz (általában csapvíz) hűtőképességére vonatkozó irodalmi források számszerű adatai meglehetősen eltérnek. Ennek az az oka, hogy a vízben jelenlevő oldott vagy oldatlan anyagok különbözőképpen változtatják meg a hűlés mechanizmusát. Ezek a szennyező elemek a gőzfilm képződésére gyakorolt hatásuk függvényében két kategóriába sorolhatóak [7] aszerint, hogy a film folytonosságát, perzisztenciáját elősegítik vagy gátolják.

Az első csoportba azok a szilárd, folyadék, vagy gáz halmazállapotú anyagok tartoznak, melyek gyengén vagy egyáltalán nem oldódnak vízben. A szilárd (pl. kerámia korom szemcsék) és a folyadék (zsírok, olajok) elemek olyan felületi reakciókra hajlamos szuszpenziót, vagy emulziót képeznek, melyek elősegítik a stabil gőzfátyol fejlődését és gátolják annak kondenzációját. Mindez a gőzfázis tartományának kiterjesztését, az alacsony

hőmérsékleten is stabil film jelenlétét eredményezi. Ezeknek az adalékoknak a hatása a keresztmetszetben nagy hőmérsékleti gradienst előidéző, azaz egyenetlen hűlés kialakulásához vezet, mely az edzés kimenetelét kedvezőtlenül befolyásolja. A gázok hatása hasonló, de nem ennyire erőteljes. A CO<sub>2</sub> jelenléte például ugyancsak növeli a gőzfázis nagyságát, ezáltal csökkenti a hűlési sebességet [7].

A vízben oldódó sók, savak és alkáliák alkotják második kategóriát, melyek a gőzképződési szakasz redukálásával a hűtési teljesítmény növeléséhez járulnak hozzá. Az ilyen típusú a hűtőfolyadékot a szakirodalomban sóoldat (brine) néven említik. A második csoportba sorolt adalékok megfelelően magas koncentrációja mellett egyáltalán a nem figyelhető meg gőzfázis. A konyhasó (NaCl) hatására a víz gőzképződési hajlama csökken, a gőzfázis ideje kisebb lesz, ezáltal nagyobb lehűlési sebesség érhető el. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a sós vízbe mártott izzó darab felületén apró sókristályok válnak ki, melyek a hűlés során kristályvizük hatására szétrobbannak, mechanikusan roncsolják a gőzhártyát, vagy annak képződését gátolják és így elősegítik a hűtőközeggel való közvetlenebb érintkezést. A sóoldatok alkalmazásánál azonban figyelembe kell venni a berendezésekre gyakorolt erős korrodáló hatását, illetve, hogy a hűtőközegek párája mérgező.

### 3.2 Az ásványi olajok

A vízen (és a polimer adalékos vízen, melyről később ejtünk szót) kívül leggyakoribb edzőközegek az ásványi olajok, melyek hűtőhatása azoknál jóval enyhébb. Az edzőolajok valójában különböző szerves vegyületek, az un. alapolajnak és adalékainak keverékei. Egyedi összetételükből adódóan forrásuk egy bizonyos hőmérsékleti tartományban (boiling range) megy végbe, szemben az egykomponensű folyadékokkal, melyek forrása a forráspont által determinált. E tartomány határozza meg a közeg termo-kinetikai tulajdonságait, végső soron a hőelvonási képességét. A forrási tartománynak a hőmérsékletskálán való kiterjedését és helyzetét az alapolaj és az adalékok arányán kívül az alapolaj a viszkozitása, lobbanáspontja, hővezetési tényezője is befolyásolja. Igen fontosak az olajoknak az edzés közben kialakuló átmeneti hőmérsékletei, azaz a gőzképződési szakaszt a forrási szakasztól ( $T_{vp}$ , vagy a 2. Fejezetben „C” ponttal jelölt un. Leidenfrost hőmérséklet), valamint a forrási szakaszt a konvekciós szakasztól ( $T_{cp}$ , vagy „A” hőmérséklet) elválasztó hőmérsékletek. Egy edzőolaj  $T_{vp}$  és  $T_{cp}$  hőmérséklete az alapolaj és adalékok aránya és minősége mellett az edzőfürdő hőmérsékletének és a fürdő áramlási viszonyainak is függvénye.

Alapolajként használatosak a parafin-, naftén- és aromás olajok. A parafin- és nafténolajok termo-kinetikus tulajdonságai azonosak, hőmérsékletük csak kevésbé hat a gőzképződési és forrási szakasz átmeneti hőmérsékletére, mely alapvetően különbözik a vizes oldatokban való hűtéstől. Az olajra jellemző viszkozitásuk változásával viszont változik a gőzképződési szakasz időtartama. Forrási szakaszuk hőmérséklet-tartománya ritkán lépi túl a 200 °C-ot, konvekciós szakaszuk kb. 500 °C -nál kezdődik. Az aromás olajok hátránya, hogy használatkor nagyon gyorsan bomlanak. Különböző adalékok hatására a forrási szakasz kezdeti hőmérséklete több mint 100 °C-val csökkenthető, vagy növelhető, így a forrási szakasz szükség szerint tágítható, vagy szűkíthető.

Tulajdonságaik és alkalmazási területük alapján az edző olajok különféle szempontok alapján csoportosíthatók [9] (3.1 táblázat). A közeg üzemi hőmérsékletétől függően két kategóriát különböztetünk meg: az alacsony és a magas hőmérsékletű olajokat (low and high temperature oils). Az edzési teljesítmény szempontjából tekintve az ásványi olajok három, lassú, gyors alacsony hőmérsékletű és gyors magas hőmérsékletű típusba sorolhatók. Ez utóbbi a felosztást követve az olajok további alcsoportokba sorolhatóak kémiai összetételük szerint.

Üzemeltetési közeghőmérséklet alapján	Edzési teljesítmény és az alkalmazás típusa szerint	A kémiai összetétel alapján
Alacsony hőmérsékletű olajok ( $T_{am} < 90C$ )	Hagyományos (lassú) olajok	Hagyományos olajok Növényi, vagy állati eredetű zsíradékok keveréke
	Gyors és nagy teljesítményű olajok	Nagy teljesítményű olajok Nagy teljesítményű kompaundált olajok
Magas hőmérsékletű olajok ( $T_{am} > 90C$ )	Magas hőmérsékletű olajok	Hagyományos olajok Nagy teljesítményű olajok

3.1 táblázat Az edzőolajok típusai különböző kritériumok alapján

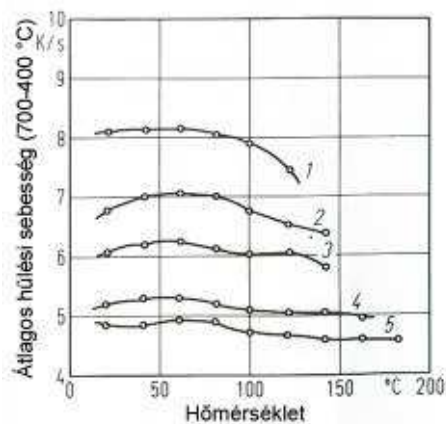
A hagyományos vagy fényesen edző olajtípuson korábban azokat az edző olajokat értették, melyekben az edzett darabok fényes felületűek maradtak. Ma már minden olyan olajt fényesen edző olajnak neveznek, melynek hűtőhatását adalékkal nem javítják. Hűtőhatásukat viszkozitásuk és forrási tartományuk határozza meg. Viskozitásuk  $1,45-6,5 E^{\circ}/50^{\circ}C$  között van. Alkalmazási hőmérsékletük viszkozitásuktól függően:  $40-110^{\circ}C$ .

A gyors olajok kis viszkozitású desztillált alapolaj és felületnedvesítési képességet növelő adalékból állnak. Az adalékok jelenléte miatt a munkadarab felülete mattul, sötétül. A híg, kisebb viszkozitású olajok hűtőképessége kedvezőbb a sűrű olajokénál, egyes esetekben megközelíti a vizét (a hagyományos olajokénál lényegesen nagyobb). A híg olajban kialakuló termoszifon hatás következtében erős folyadékáramlás indul meg, ami a test által leadott hőt jó hatásokkal átadja az egész olajfürdőnek. Ezzel szemben, sűrű olaj esetén a hűtött darab felszínén stabil gőzburok alakul ki, az olaj ennek hatására erősen felmelegszik és gőzei a fürdő felületére feljutva begyulladhatnak. A híg olajok alkalmazási hőmérséklete  $40-60^{\circ}C$ , viszkozitásuk  $1,6-166 E^{\circ}/50^{\circ}C$ . A nagy viszkozitású olajok kis gőzölgési hajlamuk miatt védő- és cementgáz-atmoszférában való edzésre is alkalmasak, üzemi hőmérsékletük viszkozitásuktól ( $2,2-4,5 E^{\circ}/50^{\circ}C$ ) függően  $40-140^{\circ}C$ .

A magas hőmérsékletű, vagy más néven melegedző olajok alkalmazása az 1950-es évektől terjedt el első sorban az ún. marquenching technológiában. Az eljárás lényege, hogy a munkadarabot az ausztenitesítési hőmérsékletről a diffúziós átalakulást elkerülve az  $M_s$  hőmérséklet közelébe hűtik, majd miután a hőmérséklet az alkatrész a teljes keresztmetszetében kiegyenlítődik, a darabot lassan, általában levegőn hűtik szobahőmérsékletűre. Ezzel a három lépéssel a martenzites átalakulást kísérő kedvezőtlen jelenségek, pl. maradó alakváltozás előfordulása csökkenthető hatékonyan. A hagyományos olajok azonban ezen a nagy hőmérsékleten ( $200 - 250^{\circ}C$ ) gyorsan oxidálódnak, megnő

viszkozitásuk, s hamar tönkremennek. A magas hőmérsékletű olajok ezzel szemben oxidációt gátló inhibitorokat tartalmaznak, így alkalmazási hőmérsékletük 120-250 °C.

Az olajok hűtőképessége a hőmérsékletüktől és áramoltatási viszonyaiktól is függ. A 3.2 ábra a különböző típusú olajokban mért átlagos hűtési sebességet (700 – 400 °C közt) szemlélteti a fürdőhőmérséklet függvényében. A hagyományos olajok (3, 4 és 5 jelű görbe) hőátadását csekély mértékben, míg a gyors olajoknál (1 és 2 jelű görbe) kialakuló hűlési sebességet szignifikánsan befolyásolja a közeg hőmérséklete [10]. Az olajfürdő mesterséges áramoltatása, akár csak más típusú közegeknél megváltoztatja a hűlés kinetikáját és előnyös hatása az edzés eredménye szempontjából. A közeg keringtetésével homogén hűtés, ezáltal egyenletes mechanikai tulajdonságok biztosíthatóak, valamint elkerülhető a felszínnel érintkező olaj túlhevülése, mely annak élettartam növeléséhez járul hozzá [11].



3.2 ábra A 700-400 °C tartományban kialakuló átlagos lehülési sebesség a hűtőközegek hőmérsékletének függvényében [4]

### 3.3 A polimer adalékos hűtőközegek

A bemeztéses edzéshez használt hűtőfolyadékok harmadik csoportját a polimer adalékos vizes oldatok, röviden a polimer hűtőközegek képviselik. Összetételük alapján a polimer közegek négy típusát szokás megkülönböztetni (3.2 táblázat), nevezetesen PVA, PAG, PVP és ACR közegeket [12].

A vízben oldott polimer vegyületek szignifikánsan determinálják a folyadék hőelvonási mechanizmusát és kinetikáját amellet, hogy a három ismert hőátadási szakasz továbbra is megfigyelhető. A gőzfilm szakasz mindegyik polimer közegnél azonos módon alakul ki, a bemeztés után polimerben dús filmréteg képződik az alkatrész felszínén, mely hőszigetelő réteggént viselkedik és stabilizálja a gőzfázist. A PVA, PVP és ACR közegek esetén a filmet gélszerű anyag alkotja, míg PAG típusnál polimer hártya jön létre, mely a közeg koncentrációjára jellemző hőmérsékleten (63-85 °C) feloldódik. A film kialakulása azzal függ össze, hogy a nedvesített felület környezetében a víz elpárolgásának következtében megnő az oldat sűrűsége. A sűrűség növekedésével polimerizációs folyamat megy végbe, mely a bemeztett test felszínén vékony film kialakulását eredményezi. A gőzfátyol

felszakadásával – akár a többi közeg esetén is – a forrási szakasz veszi kezdetét. Amint azonban az oldat viszkozitása megnő és ennek következtében annak mozgása lelassul, a forrási folyamat intenzitása csökken. Amikor a hűtött felület hőmérséklete a közeg forráspontja alá süllyed, a hő konvekció útján távozik [4].

		<b>PVA</b>	<b>PAG</b>	<b>PVP</b>	<b>ACR</b>
Polimer típus		Poli(vinil alkohol)	Poli-oxialkilene glikol	Poli(vinil-pirrolidone)	Alkáli-poliakrillát
Polimer koncentráció (súly), %		16	40-60	10	10
Viszkozitás 37.8 °C-on, mm <sup>2</sup> /s (adalék)		10	300-500	10.6	555
Viszkozitás mm <sup>2</sup> /s (vizes oldat)	5%	25.5	8.7-11.5	2.6	51
	10%	8.4	4.4-5.3	1.7	31
	20%	2.4	1.9-2.2	1.1	16
	30%	1.3	1.1-1.3	0.9	9

3.2 táblázat A polimer hűtőközegek típusai napjainkig [4]

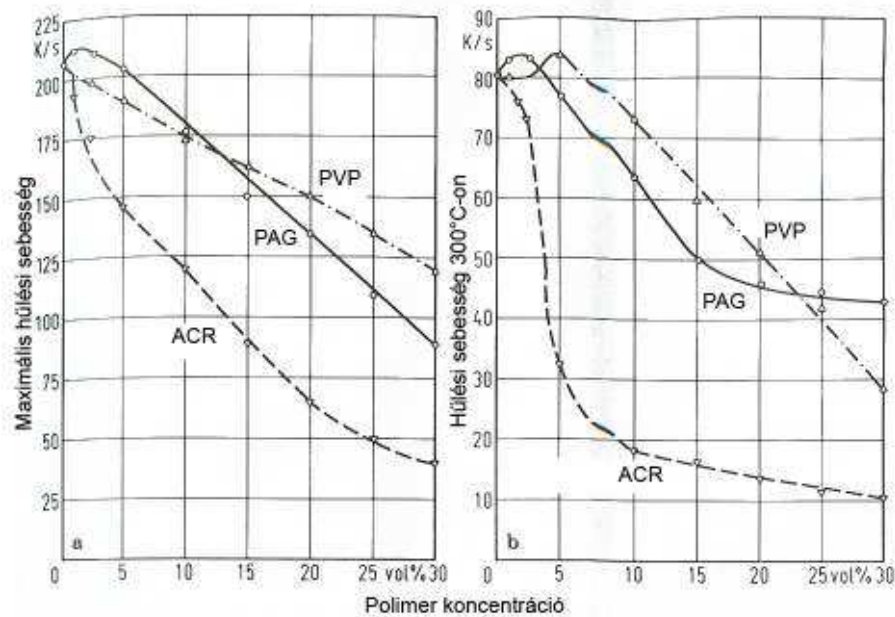
Az 1950-es években kidolgozott PVA típusú közegek népszerűsége (a kereskedelmi forgalomban „Aquaplast” és „Aquaquench A” néven ismertek) annak tulajdonítható, hogy alacsony térfogati koncentráció (2-4%) alkalmazása mellett a 800-300 °C tartományban kialakuló átlagos hűlési sebesség alacsonyabb a víznél, és magasabb az olajokénál mérhetőnél. Használatukat azonban korlátozza, hogy körülményesen eltávolítható gumiszerű réteg képződik az alkatrész és az edző berendezés felszínén az edzés során. Ugyancsak az alkalmazásukat hátráltatja, hogy a közegek hőbomlása következtében ecetes sav képződik, mely korróziós hatású [13].

Az elmúlt 20 évben világon a polimer közegek közül az „Aquaquench 251”, „Osmanil E2” vagy „Ucon” néven is ismert PAG típusú edzőfolyadékokat használták a leggyakrabban. Legjellemzőbb tulajdonságuk, mely ezeket az oldatokat megkülönbözteti a többi polimeres közegtől az ún. vízben való „inverz oldhatóságuk”. Ez az elnevezés arra utal, hogy a poliglikol adalék csak a 63-85 °C tartományban oldódik és ennek a jelenségnek tulajdonítható a gőzfilm szakaszban a munkadarab felületén a polimer film megjelenése.

A PVP oldatokat, melyek túlnyomó részben poli(vinil-pirrolidone) összetevőt tartalmaznak az USA-ban fejlesztették ki a 70-es évek közepén. A PAG közegekkel összehasonlítva ezekkel a hűtőfolyadékokkal magasabb hőmérsékleten nagyobb hűtési sebesség érhető el, míg alacsonyabb hőmérsékleti tartományban lassabb hűlést biztosítanak. A PVP oldatok az edzéssel kialakítható tulajdonságok szempontjából a víz és olaj közegek előnyös tulajdonságait egyesítik, és így használatukkal a megfelelő szilárdsági jellemzők érhetőek el gyengén ötvözött acélból készített alkatrészekben is [14].

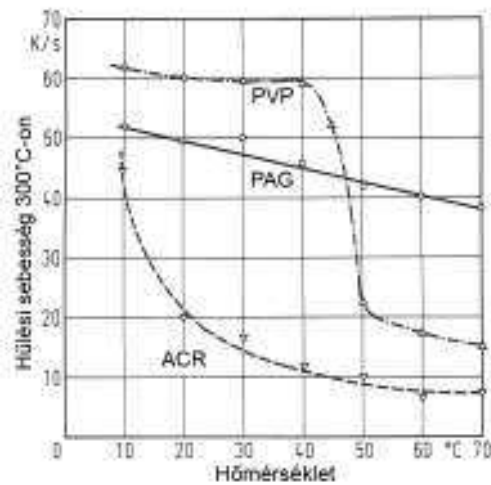
A polimer adalékos oldatok legmodernebb képviselői az alkáli-poliakrillátot tartalmazó hűtőközegek. Az ACR típusú folyadékok viszkozitása jellemzően nagyobb a más típusú polimer közegeknél, sőt az ásványi olajokénál is, amennyiben az oldatnak 10%-nál nagyobb koncentrációja. A magas viszkozitásból adódóan a gőzfázis megfelelően stabil marad, az adalék mennyiségével pontosan beállítható a forrási szakasz kezdőhőmérséklete, a

hűtőközeg ezáltal az adott célnak megfelelően „hangolható” [12]. A gőzfilm szakasz meghatározásának lehetőségéből következően az ACR oldatokat olyan hőkezelési technológiához használják, melynek célja a finom szemcsés perlités vagy bénites szerkezet létrehozása (rugó lemezek, nagy méretű csapágyak, stb).



3.3 ábra A hűlési sebesség maximuma és a 300 °C-on mért hűlési sebesség a polimer adalék koncentrációjának függvényében [15]

A polimer közegekkel elérhető hűlési sebességet az adalék típusán kívül három paraméter befolyásolja, nevezetesen az adalék koncentrációja, a közeg hőmérséklete és áramlási viszonyai. Hilder az ISO 9950 szabvány szerint mérési módszerrel vizsgálta (melynek bemutatására a 4. fejezetben kerítünk sort) a hűlési sebesség maximumának és a 300 °C-on mért hűlési sebességnek alakulását e három paraméter függvényében (3.3 ábra) [15]. A mérések eredményiből arra következtetésre jutott, hogy az egyes polimer közegek hűtési intenzitása erősen függ az adalék koncentrációjától, és annak növelésével csökken a hűlési sebesség. Ehhez hasonló kapcsolat figyelhető meg közeg hőmérséklete és a hűlési sebesség között (3.4 ábra), azaz a magasabb edzőfürdő hőmérséklet azonos körülmények esetén kisebb hűlési sebességet eredményez, nyilvánvalóan a hűtadási folyamat hajtóerejét jelentő, az edzett munkadarab felszíne és folyadék közötti hőmérsékletkülönbség csökkenéséből adódóan. Az áramoltatás minősége és nagysága a hűlési kinetika mindhárom szakaszára hatással van, a gőzfátyol „roncsolásával” növeli a forrási tartományt, és közeg mozgatásával nagyobb hűlési sebességet idéz elő a konvekciós szakaszban is. A kialakuló tulajdonságok tekintetében a forrási szakasz kezdeti hőmérsékletének van kulcsszerepe, mely az adalék típusától függő, a bemeztetés után kialakuló polimer film felszakadását jelzi. Az áramoltatási sebesség egyenes arányban, de a közegben lévő polimer tulajdonságai által determinált mértékben befolyásolja a hűlési sebességet [15].



3.4 ábra A 300 °C-on mért hűlési sebesség a polimer közegek hőmérsékletének függvényében (5 % koncentráció mellett) [15]

A bemerítéses edzési technológiához használatos, a fentiekben röviden bemutatott hűtőközegek hőelvonási karakterisztikája sajátos vegyi összetételűkből és adott fizikai állapotukból eredően különböző. A folyadékok hőátadási jellege a hőkezelés eredményét egyértelműen befolyásolja, más szóval az egyes közegek alkalmazása ugyanannál az alkatrésznél más és más tulajdonság-együttest eredményez. A gyártás tervezhetőségnek szempontjából nélkülözhetetlen az alkalmazott folyadék hűtő- vagy edzőképességének ismerete. A következő fejezetben a hűtőközegek minősítésére az elmúlt éveken kifejlesztett és bevezetett módszereket tekintjük át.



## 4. A hűtőközegek minősítése területén alkalmazott eljárások

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 [6] a hűtőközeg „hőtani reakció”-jaként (thermal response), azaz az alkatrészről a hűtőközeg által elvont hő mennyiségének jellemzőjeként definiálja.
- A másik terület a hűtőközegek „edzési teljesítményének” vagy „keményítési teljesítményének” (hardening power) számszerű minősítésére alkalmas eljárások kifejlesztése. Az edzési teljesítmény [6] a munkadarab „fémteni reakcióját” (metallurgical response) jellemzi, azaz az edző közegnek azt a képességét, mely az adott alapanyagú és geometriájú alkatrész edzés utáni mechanikai tulajdonságait (első sorban keménységét) minősíti.

Az alábbiakban e két területen elért tudományos és gyakorlati eredményeket részletezzük.

### 4.1 A hűtési teljesítmény mérésére kifejlesztett módszerek és eszközök

A hűtési intenzitás értékelése Grossmann [16] úttörő munkájához fűződik. Az általa bevezetett „H” mennyiség (4.1) a hozzá kapcsolódó nomogramok nyomán – melyet első sorban az ipari hőkezelési technológiák bevezetésénél alkalmaztak sikeresen – vált népszerűvé. A Grossmann féle „edzhetőségi konstans”-t (hardenability constant) az alábbiak szerint definiálta:

$$H = h / (2k) \quad (4.1)$$

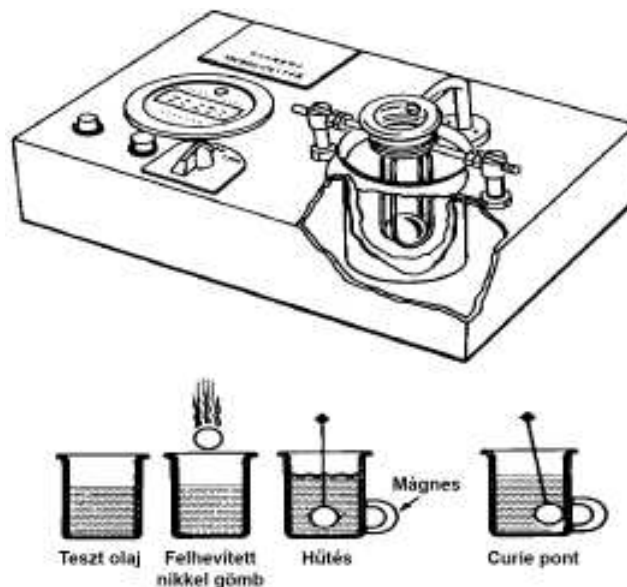
ahol

h a teljes lehűtési hőmérséklet tartományban figyelembe vett hőátadási együttható középértéke (átlaga),  $W/(m^2K)$   
k a hővezetési tényező  $W/(mK)$

A H értéke szobahőmérsékletű statikus állapotú vízre  $1.0 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ , míg az ennél gyengébb hőelvonási tulajdonsággal rendelkező közegek (pl. olaj) 1-nél kisebb. Egy hűtőközeg H értékét összehasonlító vizsgálat során állapítják meg adott hőmérséklet tartományban (pl.  $700\text{-}550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mért lehűlési időnek, vagy adott hőmérsékleten mért hűlési sebességeknek a nyugvó víz esetén mért hasonló értékeinek összevetése alapján. A H mennyiség csupán egy kinevezett értéktől való eltérést jelöl, és figyelmen kívül hagyja mind a hőátadási együttható, mind pedig a hővezetési tényező hőmérsékletfüggéséből adódó hatásokat. Ebből következően a magasabb H értéket képviselő közeg nem minden esetben eredményez kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat adott anyagminőség esetén. A hetvenes évek

közepétől számos értekezés mutatott rá alkalmazásának korlátira [17,18], ennek ellenére a Grossmann szám egészen a kilencvenes évek közepéig, mint hivatkozási alap szerepelt a hőkezelési gyártástechnológia tervezésénél.

A közeget jellemző átlagos hűlési sebesség mérését teszi lehetővé az 1970-es években kifejlesztett, GM Quenchometer (4.1 ábra). A műszer a sebesség meghatározásához a mágnesezhető fémötvözeteknek azt a tulajdonságát használja fel, hogy a Curie hőmérséklet felett elveszítik a mágneses tulajdonságukat. A nikkelötvözetű, gömb alakú próbatestet 835 °C-ról hűtik le a vizsgált közegbe merítve, így az az idő intervallum,  $t_{GM}$  állapítható meg, amely alatt a próbatest 355 °C-ra hűl (ezen a hőmérsékleten nyeri vissza mágneses tulajdonságát az ötvözet). A 835-355 °C hőmérséklet-tartományban kialakuló átlagos hűlési sebesség tehát  $t_{GM}/480$  (K/s) hányadosaként definiált [19].



4.1 ábra A GM Quenchometer és a mérés elvi vázlata

Ugyancsak két hőmérséklet közötti átlagos lehűlési sebesség mérésére alkalmas a Meinhardt rendszer vagy Houghton quench test néven ismert [20] eljárás. A próbatest hengeres geometriájú, ausztenites vagy ötvözetlen acélból készített, melynek középvonalába termoelem illesztettek. A méréssel a teljes hőmérsékleti ciklusnak két pontja, egy adott hőmérsékleti tartomány maximuma és minimuma (általában 700 – 500 °C tartomány) közt eltelt idő határozható meg.

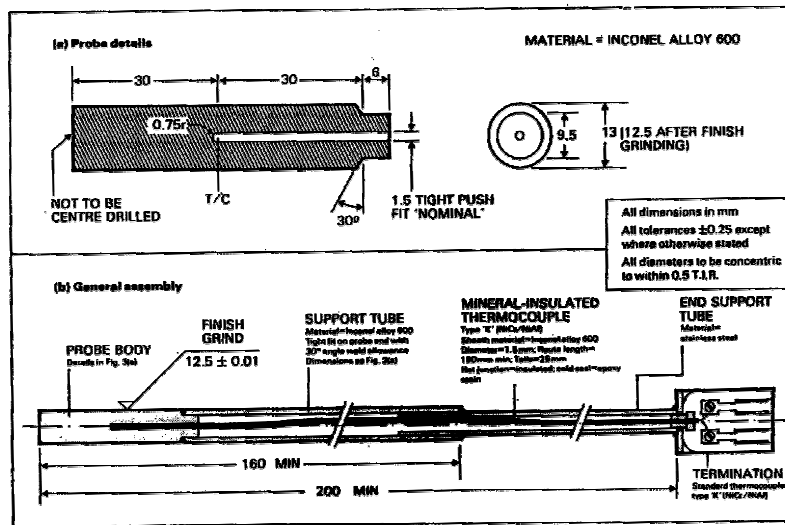
Kutatók közleményei [21,22] arra mutattak rá, hogy az átlagos hűlési sebesség a közeg hőelvonásának jellegéről keveset árul el és hőmérséklet mérések alapján csak akkor lehet az edzési folyamat eredményére következtetni, amennyiben a hőkezelés teljes hőmérsékleti tartományában rögzített hűlési görbe rendelkezésre áll. A hűtési teljesítmény elemzésével kapcsolatos kutatásokat az elektronika robbanásszerű fejlődése, így az elektromos jelfeldolgozásra és adatgyűjtésre alkalmas hardver eszközök elterjedése is motiválta. A

nyolcvanas évek közepétől több kutatóhelyen hűlési görbe felvételére és tárolására alkalmas mérő berendezést fejlesztettek ki.

A mérés a hőkezelési eljárás közben lejátszódó hőátadási folyamat fizikai szimulációján alapul. A próbatestet – melynek bizonyos pontjaiban termoelemeket helyeznek – adott hőmérsékletre hevítenek, majd a vizsgált hűtőközegben lehűtik. A hevítési, valamint a hűtő médium hőmérsékletét célszerűen a vizsgált hőkezelési folyamatra jellemző értéknek megfelelően, acél hőkezelése esetén az ausztenitesítési és a hűtéshez alkalmazott közeg hőmérséklete szerint határozzák meg. A próbatest melegítését konvekciós kemencében végzik, a felületi oxidáció elkerülése végett redukáló atmoszférában. A próbatest geometriáját tekintve a legtöbb berendezés esetében henger, jóllehet több éven keresztül gömb alakú próbákkal is kísérleteztek, ám a gömbpalást előállításának nehézségei miatt továbbra is a hengeres alakú próbatest a legelterjedtebb. A próbatestek felületi minőségét az egyes módszerek szigorúan rögzítik, hiszen a közeg hőelvonási képességére a munkadarab felületi érdessége is hatással van. A próba anyaga olyan ötvözetet, melyben az említett hőmérsékleti tartományban nem játszódik le átalakulás, a leginkább kedvelt anyagok az ausztenites acél, nikkell és annak ötvözetei vagy ezüst.

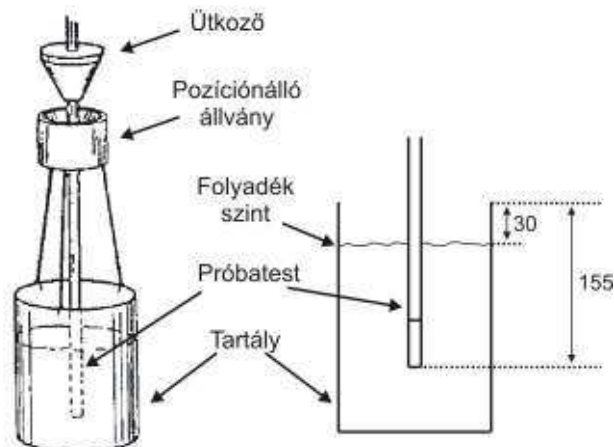
A termoelemeket a próbatest geometriai középpontjába, a felületére, vagy a felület közelébe helyezik. A lehűtés közben rögzítik a termoelemek jeleit, azaz a lehűlési görbéket. A hűtési teljesítmény elemzés koncepciója azon a feltételezésen alapul, hogy mivel az egyes méréseknél ugyanazt az eszközt és módszert alkalmazzák, a hőátadást befolyásoló körülmények (a próbatest geometriai, fizikai tulajdonságai, hevítés körülményei, stb) a hűtőközeget kivéve azonosak. Ebből kiindulva, a mért lehűlési görbék a hőkezelés során lejátszódó hőelvonást, azaz a hűtőközeget és annak tulajdonságait (hőmérséklet, koncentráció, keverési sebesség, stb) jellemzik. A hűtési teljesítmény analízise valójában a mért hőmérséklet ciklus, a lehűlési görbe elemzését, célszerű feldolgozását (Cooling Curve Test, CCT) jelenti.

A kilencvenes évek elejéig kifejlesztett legfontosabb minősítő módszerek az alábbiakban összegezhetőek. Franciaországban olaj és polimer alapú hűtőközegek minősítéséhez a NFT 60178 szabvány [23] szerinti  $\varnothing 16 \times 48$  mm méretű ezüsből készített hengeres próbatestet használnak, melyet  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról hűtenek le (700 ml folyadékban). A próbatest közepében 0.5 mm átmérőjű termoelemet helyeznek el. A kínai szabványban (GB9449-88) [24] ismertetett eljárás gyakorlatilag megegyezik a francia módszerrel, csupán a termoelem mérete eltérő ( $\varnothing 1.5$  mm). Japánban [25] a hűlési görbe elemzéshez a  $\varnothing 10 \times 30$  mm méretű ezüst alapanyagú hengeres próbatest palástjára telepített termoelem jelét veszik alapul. A próbatestet  $810\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról 250 ml folyadékban hűtik le. A teszt eredménye azok karakterisztikus adatok, melyek a hűlési görbe meghatározott pontjait, szakaszait írják le. Ilyen jellemző érték a gőz és forrási fázis közötti, illetve a gőz és konvekciós hűlési szakasz „átmeneti hőmérsékletei”, valamint a  $800 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  közötti lehűlés ideje.

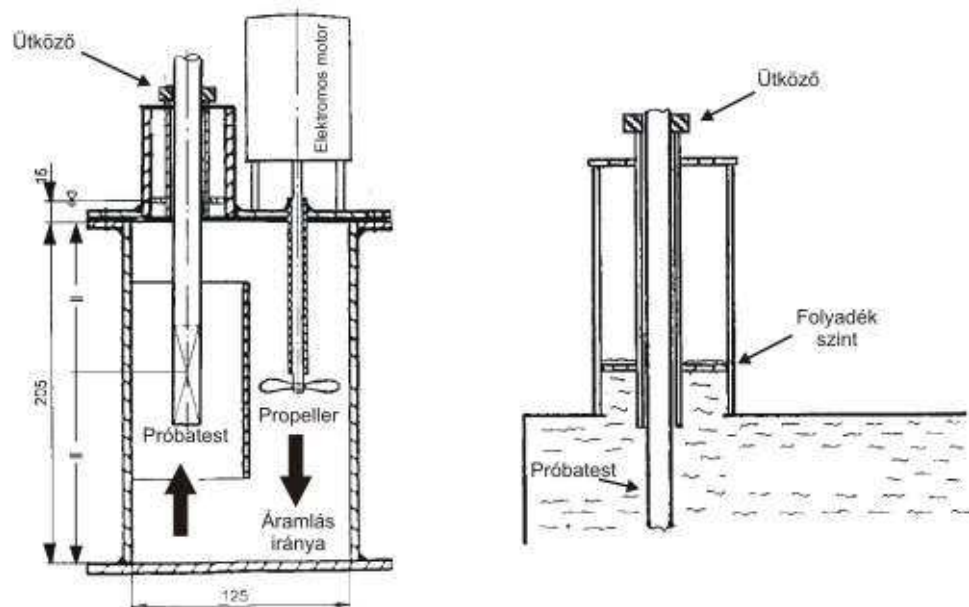


4.2 ábra Az ISO 9950 szabványban előírt próbatest jellemzői [26]

A hűlési görbe elemzés legelterjedtebb módszere az ISO 9950 [26] szabványban előírt eljárás alapján. A méréshez egy nikkelbázisú ötvözetből készült (Inconel 600)  $\varnothing 12.5 \times 60$  mm méretű hengeres próbatestet használnak, melynek a szimmetriatengelyében, a véglaptól 30 mm-re egy NiCr-NiAl típusú köpeny termoelem van (4.2. ábra).



4.3 ábra Az ISO 9950 szerinti hűlési görbe felvétele nyugató közegben

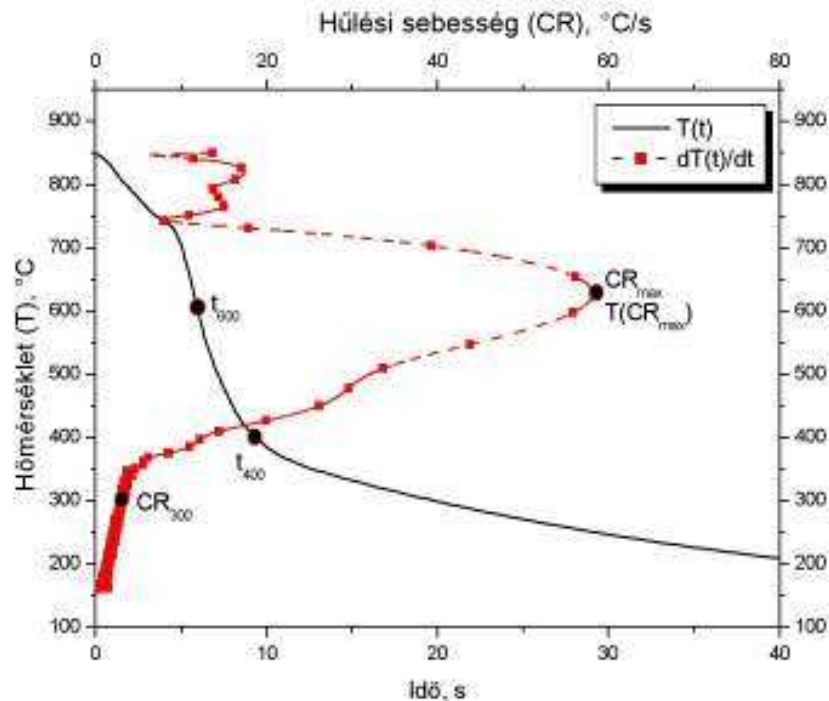


4.4 ábra Az ISO 9950 szerinti hűlési görbe felvétele mesterségesen áramoltatott közegben

A szabvány pontosan definiálja a mérés körülményeit, úgy, mint, a próbatest felületének előkészítését, a hevítés idejét és atmoszféráját, a termoelem jelének mintavételi frekvenciáját stb. Ugyancsak szigorúan meghatározottak a nyugvó (4.3 ábra) és a mesterségesen áramoltatott közegben (4.4 ábra) való hűlési görbefelvétel kondíciói, a próbatest helyzete, az edzőfolyadék mennyisége és a kalibrálási eljárás. A próbatestet 850 °C-ról a 2000 ml térfogatú folyadékban hűtik le, miközben a szenzor jelét a teljes lehűlési folyamat során rögzítik. Az 4.5 ábra egy olaj alapú közegben felvett lehűlési görbét,  $T(t)$  és annak az idő szerinti első rendű deriváltját  $dT(t)/dt$ , azaz a hűlési sebességet, mint a hőmérséklet függvényét szemlélteti. A két görbe jellegzetes pontjainál felvett függvényértékek a közeg hőátadását számszerűen jellemzik és így kvantitatív összehasonlításukra, minősítésükre nyújtanak lehetőséget. A görbe elemzése során meghatározott mérőszámokat a 4.5. ábrával összhangban 4.1 táblázat tartalmazza. Az ISO 9950 népszerűsége első sorban a mérések jó reprodukálhatóságának tulajdonítható. További előnye, hogy a próbatestet mobil műszerbe építve ipari környezetben is hatékonyan használható.

$Cr_{max}$	A hűlési sebesség maximuma
$T(Cr_{max})$	A hűlési sebesség maximumához tartozó hőmérséklet
$Cr_{300}$	A hűlési sebesség 300 °C-on
$t_{600}$	A lehűlési idő 600 °C-ig
$t_{400}$	A lehűlési idő 400 °C-ig

4.1 táblázat Az ISO 9950 szabvány szerinti mérési eljárás által meghatározott minősítő adatok [26]



4.5. ábra Lehülési görbe az idő és lehülési sebesség a hőmérséklet függvényében

Liscic és munkatársai [27] olyan mérési eljárást dolgoztak ki, melynek segítségével a hűlés során kialakuló felületi hőáram sűrűség, határozható meg. A módszer azon az elven alapszik, hogy a hőfluxus arányos a felületi hőmérsékleti gradiensekkel, amely a próbatest felületén és annak közelében felvett lehülési görbéből közvetlenül származtatható. Jóllehet, a mérési és az értékelési eljárás elve előremutató volt, a Liscic-Namac próba első sorban a mérési eredmények gyenge reprodukálhatósága miatt nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket.

## 4.2 Az edzési teljesítmény minősítésére kidolgozott eljárások

Az edzőközegeknek a kialakult keménységre való hatásának vizsgálatára alkalmazott legegyszerűbb módszer az ún. bemejtéses teszt (immersion tests). Az eljárás a felhevített próbatestnek a vizsgált közegbe történő bemejtéséből, majd keménységének méréséből, végső soron minősítéséből áll. A teszthez alkalmazott munkadarab ugyanabból az ötvözetből készül, mint a mérés eredményei alapján hőkezelti kívánt alkatrész. A módszer előnye, hogy a gyártási környezetben is hatékonyan alkalmazható, hiszen a valódi munkadarabok helyén, például az edzőkádban bárhol bemejtethetőek és lehűthetőek. A Renault-Peugeot cég lépcsős tengelyeket, kettő vagy három különböző átmérőjű tesztadarabokat használt erre a célra [28]. A lépcsős tengelyek alkalmazásával a különböző

méreteknél kialakuló mechanikai tulajdonságok vizsgálhatóak egy alkatrészen. Az ék, vagy kúp alakú próbatest (wedge-shaped specimen) alkalmazása ugyancsak Franciaországban vált népszerűvé, melyet nemzeti (NFT 60179), majd 1988-ban nemzetközi szabványba foglaltak a francia hőkezelő szövetség (ATTT) kezdeményezésére [29]. A próbatest 0.4% karbontartalmú 38C2 jelű ötvözetlen acélból készült. A kúpos darabot a bemejtéses teszt után a szimmetriatengely mentén kettévágták és a metszeteken a csúcstól meghatározott távolságokban – melyek adott átmérőt jelöltek – megmérték a középvonalban a keménységet. A minősítési eljárás lényege, hogy az egyes átmérőkhöz tartozó keménység ismeretében lehet következtetni a közeg edzési teljesítményére.

Boyer és Cary nevéhez fűződik a módosított Jominy teszt, mely az ismert edzhetőség minősítésére szolgáló eljárás továbbfejlesztett változata [30]. Az új típus felépítésében csupán abban különbözik elődjétől, hogy a véglap hűtéséhez nem csupán víz, hanem gyakorlatilag bármilyen hűtőfolyadék használható. A közeg zárt rendszerben kering, így állapotának monitorozását és változtatását is lehetővé teszi. A hőkezelés kimenetelét érintő tényezők változtatása (vegyi összetétel, hevítési és a hűtőközeg hőmérséklete, a közeg oldat koncentrációja) teszt eredményben, a véglaptól mért távolság függvényében mért keménység profilban tükröződik. A módszer kétségtelen előnye, hogy a hagyományos Jominy teszt berendezés gazdaságosan átalakítható, s így a kérdéses közeg hatása a már ismert eszközzel vizsgálható. A bemejtéses és a Jominy tesztet tekinthetjük fizikai szimulációknak, melyek előnye, hogy valós fizikai tulajdonságok alapján történik a minősítés, hátrányuk azonban pont a mérés elvégzésében, annak időigényes voltában mutatkozik meg.

Új irányzatként, a hűtőközegek „edzési teljesítményének” jellemzésére az 1970-es évektől a folyamatos átalakulási diagramokat (CCT) használták fel. Shimizu és Tamura [31, 32] grafikus módszert dolgozott ki változó a hűlési sebesség melletti átalakulási kinetika, és kritikus hűlési sebesség meghatározásához. Theling és munkatársai [33] CCT diagramokat vettek fel, melyek víz és olajbázisú közegek hűlési viszonyai figyelembevételével az adott hengeres acél munkadarab felületén és középvonalában végbemenő átalakulás leírására hivatott. A diagramok adatai azt a feltételezést támasztották alá, hogy az átalakulás kinetikája víz és olajedzés estén eltérő. A CCT diagramok átalakulási görbéinek döntő többségét lineáris hűlési viszonyok, egyenletes hűlési sebesség mellett határozzák meg. Mint ismeretes, a hűtőfolyadékba merített munkadarab lehűlése, egyes pontjaiban kialakuló hűlési sebessége változó, emiatt a CCT diagramok adatai az „edzési teljesítmény” közvetlen értékelésére csak korlátozott viszonyok mellett alkalmazhatóak sikeresen.

A hűlési görbe elemzéséhez kidolgozott hardverek megjelenése az „edzési teljesítmény” jellemzésére koncentrált K+F tevékenységnek is lendületet adott. A mért hűlési görbe, illetve az abból származtatott hűlési sebesség, és az edzési teljesítmény közötti kapcsolat feltárása, lineáris összefüggésekkel való leírása több éven keresztül a hőkezelés optimalizálásával foglalkozó kutatások központi témájává vált. A 4.2 táblázat ezeket az eredményeket foglalja össze, jelölve, hogy az egyes szerzők a hűlési görbének milyen hőmérsékleti tartományban eltöltött ideje (átlagos hűlési sebessége), vagy melyik hőmérsékleten kialakuló hűlési sebessége és az edzési teljesítmény között találtak kapcsolatot.

	Hőmérséklet tartomány, °C	Hűlési sebesség, °C/s
Lechatelier [34]	700 – 100	
Benedicks [35]	700 – 100	
Mathews, Stagg [36]	650 – 370	
Portevin, Garvin [37]	700 – 200	
Grossmann, Asimow, Urban [16]	700 – 300	
Murry [38]	700 – 300	
Deliry, El Haik, Guimier [39]	640 – 400	
Wever, Rose [40]	800 – 500	
Kulmburg, Kornteuer, Kaiser [41]	800 – 500	
Rogen, Sidan [42]	A <sub>e3</sub> – M <sub>s</sub>	
Ives, Meszaros, Foreman [43]		700, 200
Atkins, Andrews [44]		800, 750, 700
Segeberberg [45]		550

4.2 táblázat Az edzési teljesítmény és hűlési görbéből származtatott adatok

Az említett munkák eredményei arra mutatnak rá, hogy a lehűlési görbének a diffúziós átalakulást jellemző hőmérsékleti zónában lévő szakaszának ideje, illetve az ott mérhető lehűlési sebesség nagysága és a mechanikai tulajdonságok között szoros összefüggés van.

Atkins és Andrews [44] és Murry [38] olyan CCT diagramokat készítettek, melyekkel a 800, 750, 700 °C-hoz tartozó hűlési sebesség függvényében számítható az átalakulás, az acélminőség összetételének, valamint a 700 – 300 °C tartományban mért hűlési időnek a figyelembe vétele mellett. Deliry és munkatársai [39] ötvözetlen acél keménysége és a 640-400 °C zónában töltött lehűlési idő között mutatott ki lineáris kapcsolatot. Segeberberg [45, 46] exponenciális összefüggést talált a 0.45 karbon tartalmú szénacél keménysége és az 550 °C fokon mért hűlési sebesség között. A Tamura [47] által bevezetett „V” mennyiség a japán szabvány szerint ezüst próbatestben rögzített lehűlési görbének az adott közegre jellemző forrási hőmérséklet tartománya és a vizsgált acélminőségre jellemző diffúziós átalakulási hőmérséklet-zóna arányából számítható. A hasonló geometriájú acél munkadarab felületi keménysége és a V értéke közötti kapcsolat lineáris összefüggéssel írható le.

Az olaj és polimer közegeknek az edzési teljesítmény, mint számszerű kritérium szerinti rangsorolására Segeberberg és Bodin [45,46] a HP (Hardening power) formulákat (4.2, 4.3) dolgozta ki. Segeberberg a különböző közegekben az ISO 9950 szabvány szerinti berendezéssel felvett lehűlési görbék célszerűen választott adataiból, valamint ugyanazokban a folyadékokban edzett, 16 mm átmérőjű, 0.45 karbon tartalmú ötvözetlen acél próbaestek felületi keménységi értékeiből regresszió analízis alkalmazásával fejezte ki a HP összefüggéseket. Segeberberg a hűlési sebesség görbe jellegzetes pontjait, a hűlési sebesség maximumát és az un. látszólagos átmeneti hőmérsékleteket ( $T_{vp}^v$  és  $T_{cp}^v$ ), a gőzforrási szakasz, valamint a forrási-konvekciós szakasz kritikus hőmérsékleteit szerepelteti egyenleteiben. Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy míg a Segeberberg (és Deck) által használt átmeneti hőmérsékleteket a próbatest belsejében mért lehűlési görbék alapján számítják, addig a „valós”  $T_{vp}^v$  és  $T_{cp}^v$  a felületen kialakuló hőmérsékletciklusból származtatott mennyiségek. Az olaj (4.2) és polimer (4.3) alapuló közegekre a formulák az alábbiak:



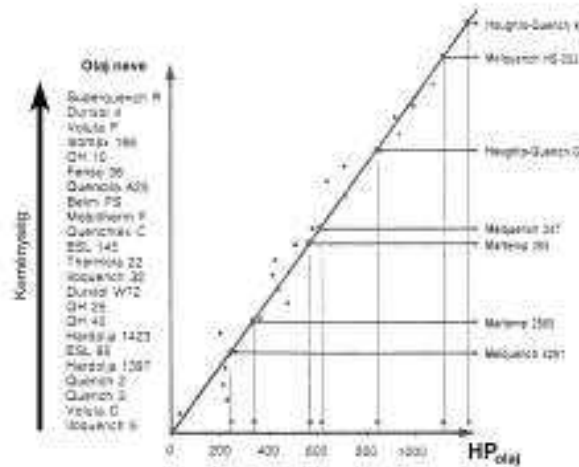
$$HP_{\text{olaj}} = 91.5 + 1.34 T_{\text{vp}}^{\text{v}} + 10.88 Cr_{\text{max}} - 3.85 T_{\text{cp}}^{\text{v}} \quad (4.2)$$

$$HP_{\text{polimer}} = 3.54 CR_f + 12.30 Cr_m - 168 \quad (4.3)$$

ahol

$T_{\text{vp}}^{\text{v}}$	A gőzfilm-forrási szakasz látszólagos átmeneti hőmérséklete
$T_{\text{cp}}^{\text{v}}$	A forrasi-konvekciós szakasz látszólagos átmeneti hőmérséklete
$Cr_{\text{max}}$	A hűlési sebesség maximuma
$CR_f$	A 0.45 karbon tartalmú ötvözetlen acél izotermás átalakulási diagramján leolvasható ferrites átalakulást jelző C görbe „orra” által determinált hőmérsékleten (550 °C), a lehűlési görbén kialakuló hűlési sebesség
$Cr_m$	A 0.45 karbon tartalmú ötvözetlen acél martenzites átalakulás kezdő hőmérsékletéhez (325 °C) tartozó hűlési sebesség

Az egyes olaj alapú közegekben felvett görbékből származtatott  $HP_{\text{olaj}}$  és az edzés utáni keménység között kapcsolatot szemlélteti a 4.6 ábra [46]. A diagram tanúsága szerint a vizsgált hűtőfolyadékok adatai alapján a (4.2) formulát úgy alakították ki, hogy a  $HP_{\text{olaj}}$  értéke a 0 – 1200 tartományba esik.



4.6 Különböző olajokra jellemző  $HP_{\text{olaj}}$  értékek [45]

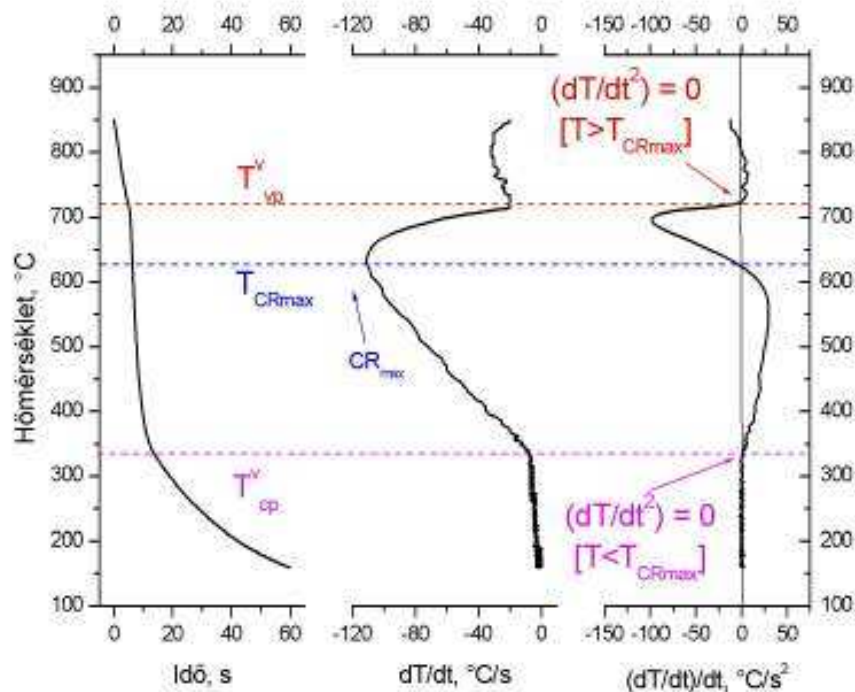
Deck és társai [48] hasonló metodológia alapján dolgozták ki az ún. Castrol indexet (4.4). A regresszió analízis eredményeként kapott egyenlet egyrészt az Inconell alapanyagú 16 mm átmérőjű hengeres próbatest szimmetriatengelyében mért hűlési görbe két jellegzetes pontja, másrészt a 38C2 ötvözetlen acélból készült azonos geometriájú próbatest felületén mért keménység lineáris kapcsolatára utal:

$$HP_{\text{Castrol}} = 99.6 - 0.17 T_{\text{cp}}^{\text{v}} + 0.19 Cr_{400} \quad (4.4)$$

ahol

- $T_{cp}^v$  A forrási-konvekciós szakasz látszólagos átmeneti hőmérséklete  
 $Cr_{400}$  A lehülési görbe 400 °C hőmérsékletén kialakuló hűlési sebesség

Az átmeneti hőmérsékletek ( $T_{vp}^v$  és  $T_{cp}^v$ ) meghatározásához Segerberg és Deck ugyanazt numerikus eljárást alkalmazta (4.7 ábra). Definíció szerint [45] a gőz és forrási szakaszt elválasztó hőmérsékletet a lehülési görbének ahhoz az inflexiós pontjához tartozó hőmérséklete reprezentálja, mely a lehülési sebesség maximumához tartozó hőmérsékletnél ( $T(CR_{max})$ ) nagyobb, és hozzá legközelebbi hőmérsékleten ( $T_{vp}^v$ ) jelentkezik. A forrási és konvekciós lehülési szakasz átmeneti hőmérsékletét ( $T_{cp}^v$ ) az előzőekkel összhangban a  $T(CR_{max})$  hőmérsékletnél kisebb hőmérsékleten kialakuló első inflexiós pont határozza meg.



4.7 Az átmeneti hőmérsékletek meghatározása Segerberg és Deck szerint [46,48]

A mért hűlési görbe és a hőkezelés eredményét minősítő paraméterek közötti reláció leírására hivatott Quench Factor Analysis (QFA) Evancho és Staley [49] nevéhez fűződik. A szerzők az egyes fémötvözetekben végbemenő átalakulások (és kiválások) kinetikai modelljének alkalmazásával számított edzési tényező (Quench Factor) és a szakítószilárdság között exponenciális összefüggést találtak. Az alumínium ötvözetek nemesítési technológiatervezéshez kifejlesztett módszert később acélok hőkezelésénél használt folyadékok elemzésére is kiterjesztették [17,50]. Az alkalmazott átalakulási modell hiányosságai miatt (tekintettel arra, hogy a módszer kizárólag az ún. inkubációs időt veszi figyelembe) azonban ez az eljárás végül nem terjedt el.

Az acélok bemelegítési edzéséhez alkalmazott hűtőközegek kvantitatív jellemzése területen elért eredményeket az alábbiakban foglalhatjuk össze:

A hűtési teljesítmény analízisére kidolgozott módszerek első sorban a hűtőközegek összehasonlítását támogatják. Alkalmazásukkal kideríthető, hogy a vizsgált edzőfolyadék hőelvonási képességét az állapotát jellemző paraméterek, azaz a hőmérséklet, a koncentráció, a szennyezettség mértéke, az áramlási viszonyok miként befolyásolják. A hűtési intenzitás elemzése tehát csak a közegről szolgáltat információt, a folyadék és egy valós munkadarab közötti interakció jellemzését nem teszi lehetővé.

Az edzési teljesítmény számszerűsítésére hivatott eljárások valamelyik szabványos mérési módszerrel felvett hűlési görbék és az adott acélminőségű, hőkezelt próbatesten mért mechanikai tulajdonságok (keménység vagy szakító szilárdság) adatai alapján következtetnek az edzőközeg erélyességére. A kialakult szilárdsági tulajdonságot méréssel vagy többváltozós regresszió-analízissel meghatározott mennyiséggel, a hűtőfolyadék hőelvonó képességét tehát a hűtés kinetikájának figyelembe vételével közvetetten jellemzi. Ezek a módszerek azonban a hőátadás hőmérséklettől és helytől való függésének felderítését nem teszik lehetővé, emiatt az edzés folyamán kialakult valós tulajdonságok feltárására alkalmatlanok.

A hűtőközegek minősítését célzó kutatómunka napjainkban is több helyen folyik. A Worcester Polytechnic Institute (USA) CHTE csoportja új, mérő és minősítő berendezés kifejlesztését tűzte ki célul. A 2001-ben indított „Virtual Heat Treatment tool for monitoring and optimising HT process” című EU6 program [51] egyik súlyponti témája ugyancsak a hűtéshez alkalmazott folyadékok hőelvonásának megismerésére, leírására irányul. Az edzőközegek kvantitatív elemzésével kapcsolatos kutatások aktualitását mi sem bizonyítja jobban, mint az a tény, hogy az ASM (Amerikai anyagtudományi társaság) hőkezelő bizottsága a 2004 évi kiadványában a hűtőközegek értékelésével kapcsolatos K+F tevékenységet kiemelt trendként szerepelteti [52].

## 5. A kifejlesztett minősítő módszer

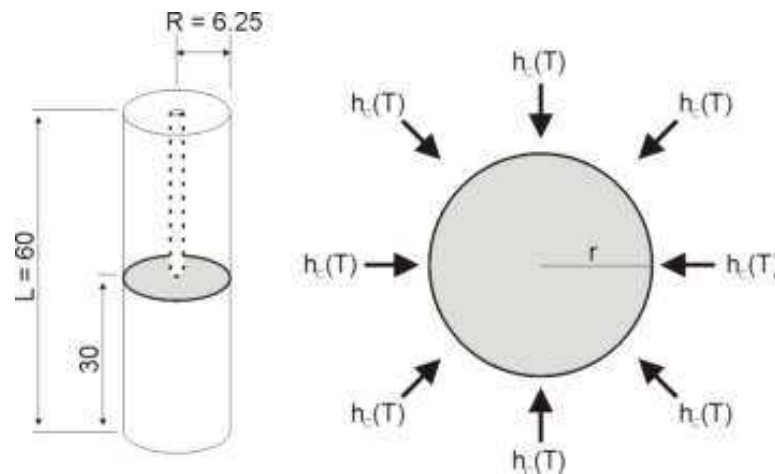
Az elmúlt húsz évben kifejlesztett és bevezetett minősítő módszerek eredendően standard berendezésekkel rögzített lehülési görbék elemzésén alapulnak. Ezek a technikák első sorban a folyadékoknak hűtési képességének összehasonlítására, rangsorolására alkalmasak, a lehülés során a munkadarab és a közeg interakciójából adódó, az alkatrészben létrejövő szövetszerkezeti, mechanikai tulajdonságokat figyelmen kívül hagyják. Első sorban ebből az okból kifolyólag ezeknek az eljárásoknak a hőkezelési technológiában való alkalmazhatósága nagy részben korlátozott.

Következésképpen, olyan értékelési módszer alkalmazása volna célszerű, amely kvantitatív módon, a hőkezelés eredményeként a munkadarabban kialakult tulajdonságok alapján jellemzi edzőközeget.

Az új típusú Inverz-Predikciós számítási eljáráson alapuló módszer kidolgozásakor az alábbi szempontokat vettük figyelembe.

1. Az edzőközegek minősítése a teljes lehülési folyamatot reprezentáló hűlési görbe többlépcsős feldolgozásán, elemzésén alapul. A lehülési görbék felvételéhez az ISO 9950 szabvány [26] szerinti berendezést jelöltük meg (4.1 fejezet). Választási döntésünket a következő megfontolások indokolják:
  - A próbatest anyaga olyan ötvözet (Inconel600), melyben a 0-1000 °C tartományban nem megy végbe látens hő képződéssel együtt járó átalakulás. 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 próbatest 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 szabványban rögzített berendezés felépítése viszonylag egyszerű és ezért költség hatékonyan kivitelezhető. Külön figyelmet érdemel, hogy a világon jelenleg ez a legelterjedtebb ilyen célú műszer
2. A lehülés során a hűtőfolyadék nedvesítési kinetikájára jellemzően a munkadarab felületének minden egyes pontjában más és más a hőelvonás mértéke, mely csak igen komplex összefüggésekkel, a hőátadási együtthatónak a hőmérséklet és helykoordináta szerinti függvényével,  $h(\mathbf{r},T)$  jellemezhető. A hőátadási együttható a vizsgált munkadarab és a folyadék interakciójának függvénye, karakterisztikáját a közeg állapotán kívül a hőkezelt kívánt alkatrész geometriai sajátosságai, felületi minősége, alapanyaga, helyzete, az abból adódó áramlási viszonyok is befolyásolják. Az ISO 9950 szerinti próbatest méreteit ( $\varnothing 12.5 \times 60$ ) és a termoelem helyzetét figyelembe véve megállapítható, hogy a termoelem helyén (a szimmetriatengelyen, a véglaptól 30 mm-re) elhanyagolható az un. sarok, vagy szélhatás jelensége, mely több felület találkozási

helyénél, azaz sarkok, élek közelében sajátosan befolyásolja a kialakuló hőmérséklet eloszlást [4]. Ebből a megállapításból, illetve a szigorúan meghatározott mérési körülményekből következően (4.3 és 4.4 ábra) jogosan feltételezhető, hogy a hőmérsékletszenzor helyzete által determinált  $D=2R$  átmérőjű körlapon (5.1 ábra) a sugárirányú hővezetés hatása dominál. Ezek szerint a tengelyszimmetrikus, egydimenziós tranziens hőátadási folyamat hajtóereje e körlap kerületéhez tartozó hőátadási együtthatóval,  $h(r_{R,30}, T) = h_c(T)$  arányos. Más szóval, a termoelem által rögzített jel karakterisztikáját a  $h_c(T)$ , a körlap hőmérsékletétől függő, de a felületi helykoordinátától független hőátadási függvény szabja meg.



5.1 ábra Az ISO 9950 próbatest termoelemének helyzetéhez tartozó hőátadási viszonyok

3. Az adott hűtőközegre jellemző  $h_c(T)$  a lehülési görbe  $T^m(t)$  és a próbatest fizikai tulajdonságainak ismeretében becsülhető. A predikcióhoz alkalmazott számítási eljárások speciális numerikus módszereken alapulnak, a feladat egy nemlineáris, tranziens inverz hőközlési probléma (IHCP, Inverse Heat Conduction Problem) megoldását feltételezi [53, 54, 55].
4. A hőátadási együttható előrejelzése szempontjából meghatározó jelentőségű  $T^m(t)$  jelek zajszintje. A mérés során rögzített zaj mértéke a hőközlési probléma „rosszul feltett” (ill-posed) volta miatt szignifikánsan hat az inverz számítás pontosságára. A „rosszul feltett” problémák esetén ugyanis az input jel csekély mértékű változtatása (zajossága) az output jel jelentős, váratlanul nagy perturbációjához vezethet [56], szemben az un. „direkt” eljárásokkal, ahol az input kismértékű torzítása az output jelet arányosan változtatja [57]. Jelen esetben a köpeny-termoelem és a próbatest eltérő hőtágulásából adódó bizonytalan felületi érintkezés is lehet zaj forrása. A hőátadási együttható becslését megelőzően tehát olyan jelsimítási eljárás alkalmazása célszerű, mely a zaj hatékony redukálása mellett a hasznos információkat, azaz a ténylegesen kialakult hőmérséklet ciklust minimálisan „roncsolja”.
5. Az elmúlt két évtizedben, mint ismeretes, számos, a hőkezelési folyamat matematikai modellezésén és szimulációján alapuló szoftver kifejlesztésére került sor. A számítógépes folyamat-tervezés céljára készített különféle szimulációs programok

alapját, "belső magját" legtöbbször egy tulajdonságbecslés céljára kifejlesztett modell képezi. A tulajdonságbecslés céljára szánt szimulációs modellt egymással meghatározott relációban álló "modell-elemek" együttese alkotja. A modell-elemek - más néven modulok - bizonyos értelemben láncszemenként kapcsolódnak egymáshoz, és funkcionálisan összefüggő rendszert alkotnak. Minden egyes modul valójában egy hőkezelési részfolyamat matematikai részmodellje. Megfelelő input adatok ismeretében a modell elvi lehetőséget teremt a hőkezeléskor végbemenő folyamatok szimulálására, és a szimuláció eredményeként output adatok generálására. A hőkezelési technológia szimulációjára hivatott, véges-elem (FEM), véges-differencia (FDM), vagy perem-elem (BEM) eljáráson alapuló szoftverek működésének általános reprezentációját az 5.2 ábra szemlélteti. A rendszer általános input adatai a következők:

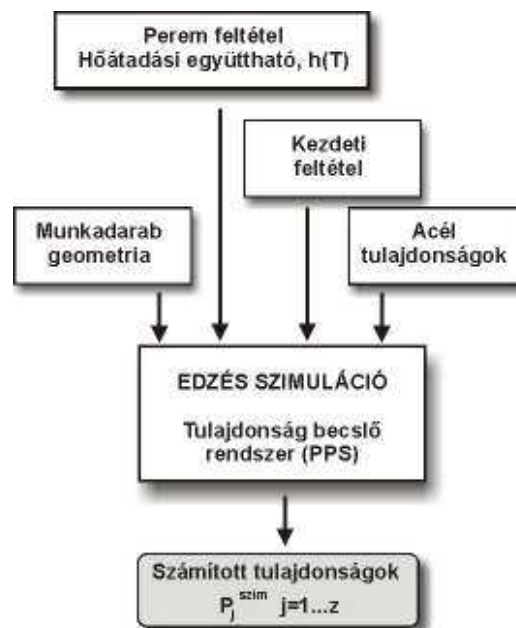
- A munkadarab geometriai tulajdonságai, mérete
- A kezdeti feltételek, azaz munkadarabnak az edzést megelőző állapotát (hőmérséklet-, szövetszerkezet-, belső feszültség-eloszlás, stb) leíró paraméterek.
- Az acélminőségek adatbázisa, mely a kémiai összetételtől és a kiinduló mikroszerkezettől függő technológiai, hőtechnikai, anyagszerkezeti (kinetikai) paramétereket tartalmazza.
- A hőtani peremfeltételt reprezentáló hőátadási együttható, mint a helykoordináta és a hőmérséklet függvénye,  $h(\mathbf{r}, T)$

A munkadarab geometriájának, fizikai, metallurgiai tulajdonságainak, és a hőátadást reprezentáló adatok birtokában becsülhetők a hőkezelés kimenetelét jellemző tulajdonságok ( $P_j^{szim}$ ,  $j=1..z$ ) úgy, mint a kialakult szövetszerkezet-, mechanikai tulajdonságok-, belső feszültség-, alakváltozás eloszlása. Amennyiben  $P_j^{szim}$  becsült tulajdonságok csak megengedett mértékben térnek el a valós, mérhető adatoktól ( $P_j^{mért}$ ), a modell, illetve szoftver kielégíti a felhasználói elvárásokat.

A kidolgozott módszer egyik alapgondolata azon a hipotézisen alapul, hogy az ausztenitesítési hőmérsékletről való lehűtési szakaszban az adott hűtőfolyadék és a munkadarab közötti hőátadási folyamat hasonló termo-fizikai tulajdonságú munkadarabok esetén hasonlóan megy végbe. Más szóval, feltételezve, hogy az alkatrészek geometriája, felületi minősége, fajhője és hővezetési tényezője, valamint a hűtést megelőző hevítési és a hűtőközeget jellemző körülmények (annak hőmérséklete és áramlási viszonyai) azonosak, a hűtés során a vizsgált közeg hőelvonása eltérő ötvözetű munkadarabok esetén is megegyezik.

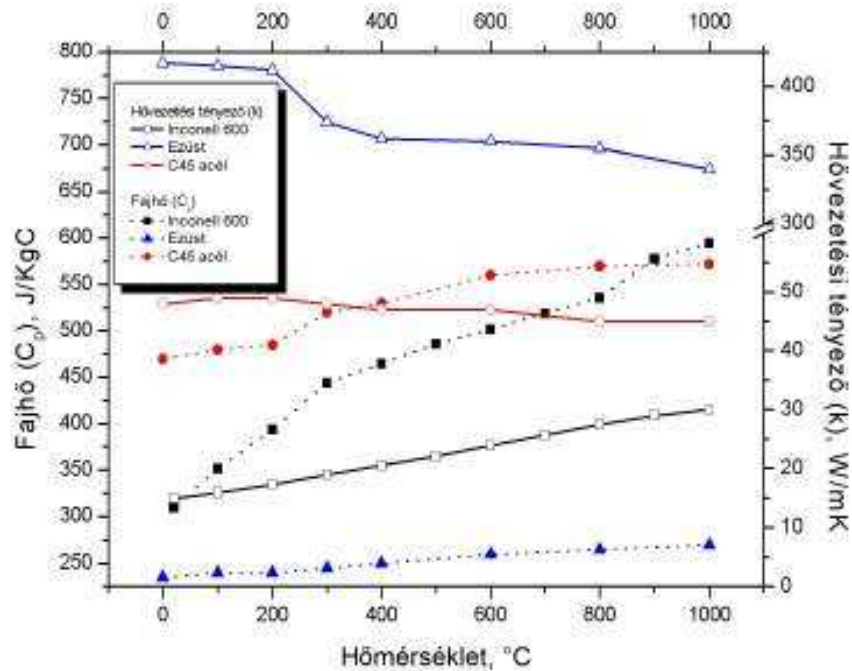
Az előbbi feltételezésből kiindulva, miszerint az ISO 9950 szerinti műszerrel mért folyadék hőelvonása a helykoordinátától független hőátadási együttható függvényével megadható, továbbá, hogy az így determinált  $h_c(T)$  a közeg hőátadását a nikkelt bázisú ötvözet fizikai tulajdonságaitól kis mértékben eltérő alapanyagú munkadarabok hűtésénél is valósan jellemzi, arra következtethetünk, hogy a célszerűen választott ötvözetű próbatest figyelembe vételével végzett szimulációs kísérletek során számított tulajdonságok ( $P_j^{szim}$ ) közvetett módon utalnak a közeg edzési teljesítményére. A  $P_j^{szim}$  ebben az esetben a hűtőközeg edzési képességét számszerűen, méghozzá a számított fizikai tulajdonságok alapján minősítő mérőszám. Az edzési szimulációknál a számításokat olyan ötvözetre érdemes elvégezni, mely a különböző hűtőfolyadékok hűtési teljesítményét a számított tulajdonságok tekintetében – a próbatest méretére is tekintettel – szignifikánsan tükrözi. Ennek megfelelően, a módszer alkalmazhatóságának demonstrálásához gyengén ötvözött

hipoeutektoidos szerkezeti acélt, a C45 minőséget választottuk. Az Inconel ötvözet (négyzet jel) és a C45 jelű acél (kör jel) hőmérséklettől függő hővezetési tényezője, valamint fajhője az 5.3 ábrán figyelhető meg [58]. Az összehasonlítás kedvéért a diagramban a hűtőközegek minősítéséhez használt japán szabvány szerinti próbatest anyagának (ezüstötötvözet) tulajdonságait is szerepeltettük. A diagram adatait vizsgálva megállapítható, hogy a nikkelbázisú anyag és a szerkezeti acél tulajdonságai csak kis mértékben térnek el, és emiatt az előzőekben ismertetett hipotézis ezen körülmények mellett alkalmazható.



5.2. ábra Az edzés szimulációjához alkalmazott szoftverek általános felépítése

A kifejlesztett eljárás másik alap gondolata az említett műszerrel mért lehülési görbék  $T_i^m(t)$  elemzésének [45-48] célszerű alkalmazására épül. A hűlési görbék elemzésének eredményeként meghatározhatóak  $\mathbf{R}$  vektor komponensei, melyek a hőciklusok karakterisztikáját jellemző mennyiségek. A lehülési görbe, annak első és második deriváltja ismeretében közvetlenül generálhatóak  $\mathbf{R}$  elemei. A leggyakrabban figyelembe vett mennyiségek a hűlési sebesség maximuma, bizonyos hőmérsékleti tartományokban az átlagos lehülési sebesség, a folyadék hűtési állapotváltozását (gőz, forrási és konvekciós) jelző átmeneti hőmérsékletek [45,48]. Az  $\mathbf{R}$  komponensei primer módon utalnak a mérési helyen kialakult hőciklus karakterisztikájára.



5.3 ábra Az Inconell ötvözet, a C45 acélminőség és az ezüstötvözet hővezetési tényezője és fajhője a hőmérséklet függvényében

Továbbá, mivel ismertek a hőátadási együttható meghatározásához alkalmazott lehülési görbék karakterisztikus adatai,  $\mathbf{R}$  és a  $T_i^m$  görbékéből származtatott  $h_{c,i}(T)$  függvény figyelembe vétele mellett előre jelzett tulajdonság, kifejezhető

$$P_j^{sim} = QF_j^T(\mathbf{R}) \quad (5.1)$$

ahol  $QF_j^T$  a  $P_j^{sim}$  tulajdonságot jellemző un. primer minőségfüggvény. Hasonló gondolatmenetet követve, a folyadék hűtési intenzitását leíró  $h_c(T)$  és az alkalmazásával becsült minősítő tulajdonság, kifejezhető

$$P_j^{sim} = QF_j^h(h_c(T)) \quad (5.2)$$

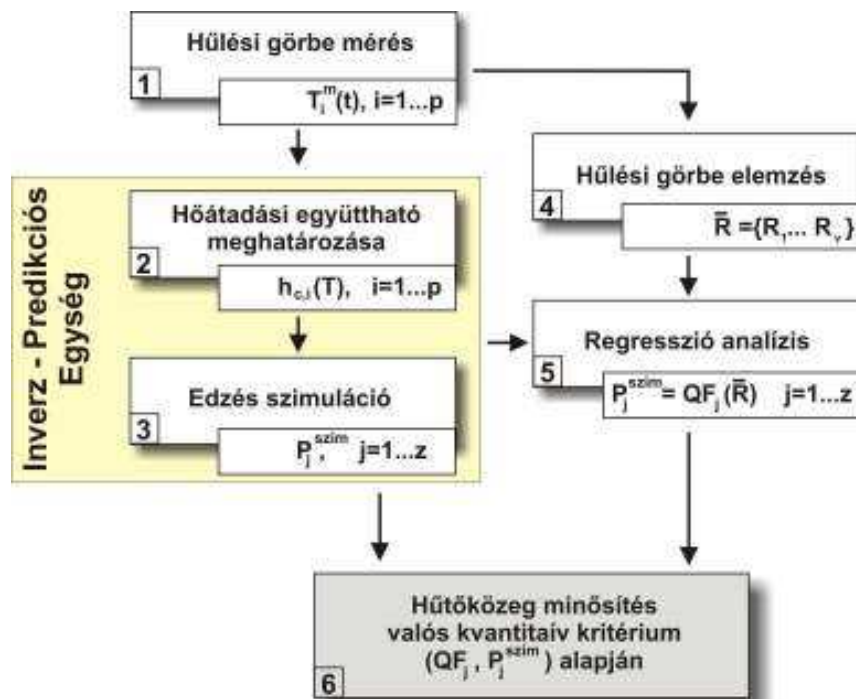
ahol  $QF_j^h$  a  $P_j^{sim}$  paraméter szekunder minőségfüggvénye. A minőségfüggvény definíció szerint olyan függvénykapcsolatra utal, mely az ISO 9950 módszerrel mért hőmérsékletciklusból, illetve az inverz analízis eredményeként előálló  $h_c(T)$  függvényből származtatott mennyiségek ( $\mathbf{R}$ ) és a mérésnél alkalmazott próbatesttel azonos geometriájú, gyengén ötvözött acél alapanyagú munkadarab edzésénél kialakuló számított tulajdonságok ( $P_j^{sim}$ ) közötti összefüggést írja le. Mivel a primer (5.1) és szekunder (5.2) minőségfüggvények, ezek szerint közvetlenül jellemzik az említett minősítő tulajdonságokat, azok hőmérsékletmérések vagy a számított hőátadási együttható alapján becsülhetőek. Amennyiben a  $QF_j^h$  és  $QF_j^T$  függvényekkel közelített tulajdonságok csak



megengedett mértékben térnek el a mérhető adatoktól ( $P_j^{\text{mér}}$ ), a minőségfüggvények hatékonyan alkalmazhatók a hűtésre használt folyadékok számszerű minősítésére.

Az előzőekben ismertetett gondolatmenet alapján a kidolgozott minősítő eljárás folyamatát az 5.4 ábra reprezentálja. Az egyes modulelemek a következő funkciók ellátására hivatottak:

Az 1. modul a hűlési görbék zajszűrését és kódolását végzi. A további jelfeldolgozás szempontjából olyan adekvát zajszűrő algoritmus alkalmazása kívánatos, mely a zaj redukálása mellett a valós hőmérséklet ciklust minimálisan „roncsolja”. A jelsimító módszer ismertetésével az 5.1 fejezetben foglalkozunk. A modul kimenetét a simított görbék jelentik.



5.4 ábra A kidolgozott minősítési módszer folyamatábrája

A minősítési módszer magját az Inverz-Predikciós Egység (IPE) adja, melyet a 2. és 3. almodul együttesen prezentál. A 2. modul a hőelvonást reprezentáló hőátadási együttható becslésére hivatott. A simított  $T^m$  görbe, mint input adat és az egydimenziós hőátadási modelltől kiindulva a hőátadási peremfeltétel inverz metodológia alapján számítható. A felületi hőmérséklettől függő hőátadási együttható,  $h_c(T)$  a modul output adata. Az inverz probléma megoldására kifejlesztett algoritmust az 5.2 fejezetben tárgyaljuk.

A 3. modul, melynek működését az 5.3 fejezetben ismertetjük, annak a tulajdonságeggyüttesnek a becslését végzi, melyek alapján az edzés eredménye számszerűen minősíthető. A modul feladata tehát a hőkezelés kimenetét jellemző paraméterek, azaz a lehűlési során kialakuló szövetszerkezeti és mechanikai tulajdonságok számítása. A modul kimenetét ezek az előre jelzett tulajdonságok képezik.

A 4. modul feladata a hűlési görbék elemzése, a hőmérséklet ciklusok és a hűlési sebesség görbék karakterisztikus pontjainak és tartományainak meghatározása. A hőciklus karakterisztikát jellemző mennyiségek  $\mathbf{R}$  vektor komponenseként determináltak. A modul kimenete az  $\mathbf{R}$  vektor.

A hűlési görbék jellemző pontjainak, a hőátadási együttható karakterisztikájának és a számított minősítő paraméterek ismeretében az 5. modul feladataként regresszió analízis alkalmazásával minőség függvények (Quality function, QF<sub>j</sub>) állíthatók elő. Ezek az összefüggések, melyek egyben a modul kimenő adatai, a vizsgált közegben felvett lehűlési görbe, valamint a  $h_c(T)$  függvény és az ugyanabban a folyadékban edzett munkadarab minősége (minőségét jellemző tulajdonsága) közötti kapcsolatot írják le.

A minősítési eljárás szerint a hűtőközegek valós, számszerű kritérium szerint értékelése (6. modul) két módon lehetséges. Egyrészt, közvetlenül a számított tulajdonságok,  $P_j^{szim}$  alapján, azaz csupán az 1, 2, 3 modul funkcióit alkalmazva. Másrészt, kellően nagy számú mérés és ezt követő számítások elvégzésével, valamint a mért lehűlési görbék elemzéséből nyert  $\mathbf{R}$  vektor ismeretében regresszió analízis alkalmazásával előállíthatóak a primer (5.1) és szekunder (5.2) minőségfüggvények. Az edzőfolyadékok minősítése tehát a generált  $QF_j^T(\mathbf{R})$  vagy  $QF_j^h(h_c(T))$  függvényekkel alapján végezhető.

A továbbiakban (5.1 – 5.4 fejezet) a minősítési eljárás egyes funkcióit, valamint az Inverz-predikciós modul ellenőrzését, verifikálását mutatjuk be. A 6. fejezetben a minőség függvények előállítását és a minősítési módszer alkalmazását ismertetjük.

## 5.1. Kódolás és zajszűrés Fourier-analízis alkalmazásával

A lehülési görbe egy folytonos monoton csökkenő  $T=T(t)$  függvénnyel írható le, amelynek független változója a  $t$  idő és függő változója a  $T$  hőmérséklet. A szabványosított hengeres próbatesttel meghatározott módon kivitelezett termoelemes mérés azonban – a mintavételezés gyakoriságától függően – csak adatpárok egy véges sorozatát szolgáltatja, amely adatpárok diszkrét időpontokat és az ezekhez rendelt diszkrét hőmérsékletértékeket tartalmaznak.

Az adatpárok szükséges (optimális)  $\Psi$  számának megválasztására vonatkozóan csak méréseken alapuló megfigyelések, gyakorlati mérés technikai tapasztalatok szolgálnak támpontul. Amint a szakirodalomból kitűnik,  $\Psi$  értékét 300-nál kisebbre nem célszerű választani, mert ez már esetleges információvesztéssel jár, viszont 1200-nál nagyobbra sem ésszerű választani, mert ez esetben az információtartalom növekedése már elhanyagolható mértékű.

A lehülési görbe felvételekor (az adatpárok származtatásakor) – az immerziós hűtés folyamán végbemenő ismert folyamatok sajátosságaiból adódóan – jelentős mérvű „zajjal” kell számolni, amely nemkívánatos, de természetszerű velejárója a mérésnek. Ebből következik, hogy a lehülési görbe által reprezentált információtartalom elemzéséhez, számszerű értékeléséhez a zajt eliminálni kell, következésképpen a mért lehülési görbét szűrési, simítási műveleteknek kell alávetni. E célra használatos módszerek a szakirodalomból jól ismertek [59].

További fontos követelmény, hogy a szűrési-simítási műveletek elvégzését követően, az immár „megtisztított” lehülési görbét kódolni kell valamilyen formában. A kódolás célja alapvetően a lehülési görbe célszerű tárolása (archiválása), mégpedig oly módon, hogy a kódolás egyidejűleg adatsűrítéssel párosuljon. Olyan kódolási technika alkalmazása a kívánatos, amely lehetővé teszi, hogy „megtisztított” lehülési görbe a kódolt adatok alapján kívánt pontossággal rekonstruálható legyen: egyrészt a valósághű grafikus megjelenítés, másrészt pedig további elemzések végzése céljából. A további elemzés jelen esetben azt jelenti, hogy mindenképpen szükség van a lehülési görbéből származtatott ún. lehülési sebesség függvény előállítására is, nevezetesen a  $dT/dt$  derivált-függvény származtatására és kódolására is. (A később ismertetett vizsgálatainkban demonstrálni fogjuk, hogy a derivált-függvény alapján származtatott különféle számszerű paraméterek fontos szerepet játszanak az egyes hűtőközegek „hűtési teljesítményének” számszerű kritérium alapján történő minősítésében.)

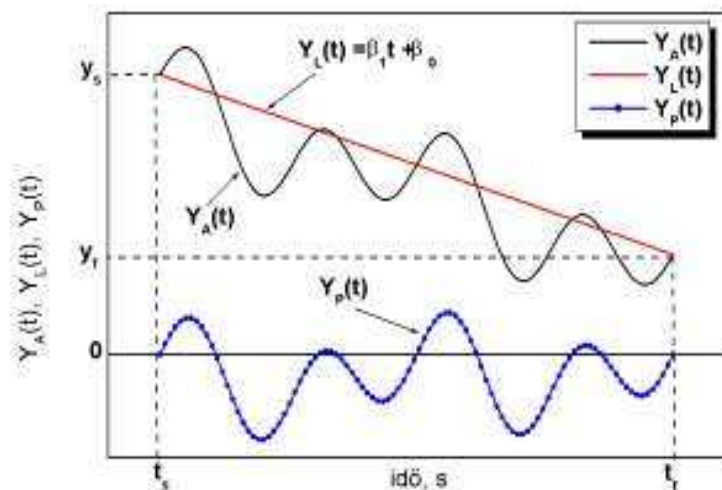
A következőkben azt az eredendően Fourier-analízisen alapuló eljárást ismertetjük, amely alkalmasnak bizonyult a fenti követelmények együttes kielégítésére, nevezetesen a szűrési, simítási, adat-kompressziós kódolási funkciók, valamint a deriváltfüggvény előállításával és kódolásával kapcsolatos feladatok megvalósítására. A továbbiakban – az egyértelmű hivatkozás végett – a Fourier-analízis eredményeként származtatott, a lehülési görbét approximáló folytonos függvényt „simító függvénynek” nevezzük.

### 5.1.1 Szűrő és kódoló algoritmus

A simító függvény előállítása a következő koncepción alapul. Tegyük fel, hogy a zajos jel (a mérés eredménye) a mintavételezéssel kapott  $(t_i, y_i)$  adatpárok véges sorozataként áll rendelkezésünkre, ahol  $i = 0, 1, 2, \dots, 2N$ . Következésképpen  $\Psi = 2N$ , vagyis az adatpárok száma maga is páros szám. Az adatpárok a folytonos  $Y_A = Y_A(t)$  „zajos” függvényt reprezentálják a  $[t_s, t_f]$  intervallumban (5.4.ábra), melyre  $y_i = Y_A(t_i)$  minden

$$t_i = t_0 + i \frac{t_f - t_s}{2N} \quad (5.3)$$

esetén, ahol  $i = 0, 1, 2, \dots, 2N$ ,  $t_0 = t_s$ ,  $y_0 = y_s$  és  $t_{2N} = t_f$ ,  $y_{2N} = y_f$  mellett teljesül.



5.4. ábra A Fourier analízis alapján számítási eljárás elve

A Fourier analízis alkalmazása céljából bevezetjük az  $Y_P(t)$  periodikus függvényt

$$Y_P(t) = Y_A(t) - Y_L(t) \quad (5.4)$$

ahol definíció szerint (lásd 5.4 ábra)

$$Y_L(t) = \beta_1 t + \beta_0 \quad (5.5)$$

A (5.5) egyenletben szereplő konstans paraméterek ( $\beta_1$  és  $\beta_0$ ) az alábbiak szerint számíthatóak

$$\beta_1 = \frac{y_f - y_s}{t_f - t_s} = \frac{y_{2N} - y_0}{t_{2N} - t_0} \quad (5.6.1)$$

és

$$\beta_0 = y_s - \beta_1 t_s = y_0 - \beta_1 t_0 \quad (5.6.2)$$

A (5.5) egyenlet definíciójából következően  $Y_L(t)$  lineáris függvény, melyre az alábbi összefüggések teljesülnek:

$$Y_p(t_s) = Y_A(t_s) - Y_L(t_s) = 0 \quad (5.7.1)$$

$$Y_p(t_f) = Y_A(t_f) - Y_L(t_f) = 0 \quad (5.7.2)$$

A továbbiakban azzal a feltételezéssel élünk, hogy  $Y_p(t)$  négyzetesen integrálható valós függvény, amely a  $(-\infty \dots \infty)$  intervallumon értelmezett, és  $P = t_f - t_s$  szerint periodikus. Ezen feltételezések alapján az  $Y_p(t)$  függvény előállítható Fourier sorával

$$Y_p(t) = \frac{A_0}{2} + \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^M A_k \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) + B_k \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) \quad (5.8)$$

ahol  $A_k$  and  $B_k$  a megfelelő Fourier együtthatók

$$A_k = \frac{2}{P} \int_0^P Y_p(t) \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) dt \quad (5.9.1)$$

és

$$B_k = \frac{2}{P} \int_0^P Y_p(t) \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) dt \quad (5.9.2)$$

Mint ismeretes a Fourier sor (5.8)  $M$  tagból álló  $Y_M(t)$  részletösszeggel (trigonometrikus polinommal) közelíthető az alábbiak szerint

$$Y_M(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^M a_k \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) + b_k \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) \quad (5.10)$$

A Fourier együtthatók (5.10) az ismert Bessel formulával becsülhetőek

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2N-1} Y_i \cos\left(i \frac{k\pi}{N}\right) \quad (5.11.1)$$

és

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2N-1} Y_i \sin\left(i \frac{k\pi}{N}\right) \quad (5.11.2)$$

ahol

$$Y_i = y_i - (\beta_1 t_i + \beta_0) \quad (5.12)$$

és  $i = 0, 1, 2, \dots, 2N-1$  és  $k = 0, 1, 2, \dots, M$ .

A (5.10) egyenletet felhasználva a zajszűrés és kódolási funkciók ellátására hivatott  $Y_{F,M}(t)$  simító függvényt az alábbi folytonos függvénnyel definiáltuk:

$$Y_{F,M}(t) = Y_M(t) + Y_L(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^M a_k \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) + b_k \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) \quad (5.13)$$

A simítófüggvény értelmezési tartománya a  $t_s \leq t \leq t_f$  intervallum.

A  $Y_{F,M}(t)$  simító függvény idő szerinti első (5.14) és második (5.15) deriváltja zárt alakban is kifejezhető, nevezetesen

$$Y'_{F,M}(t) = \frac{Y_{F,M}(t)}{dt} = \beta_1 + \frac{2\pi}{P} \sum_{k=1}^M k \left[ b_k \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) - a_k \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) \right] \quad (5.14)$$

$$Y''_{F,M}(t) = \frac{Y'_{F,M}(t)}{dt} = -\left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 \sum_{k=1}^M k^2 \left[ b_k \sin\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) + a_k \cos\left(k \frac{2\pi}{P} t\right) \right] \quad (5.15)$$

A (5.13) egyenletben szereplő  $M$  pozitív egész szám, mely az analízishez használt Fourier együttható-párok számát jelöli. Az  $M$  nagysága döntő fontosságú a függvényközelítés közelítés pontossága szempontjából, ezért  $M$  optimális értékének meghatározása külön vizsgálatok elvégzését tette szükségessé. Ezen vizsgálatok eredményeinek ismertetésére a továbbiakban részletesen is kitérünk.

### 5.1.2 A Fourier analízis zaj szűrés teljesítményének tesztelése és az optimális együttható szám meghatározása

Az alkalmazott az Fourier együtthatók száma döntően befolyásolja a függvényközelítés, illetve a zajszűrés hatékonyságát. Kevés együttható alkalmazása nyilvánvalóan a függvényközelítés pontosságának romlásához vezet, míg  $M$  növelése a zajos függvény minél pontosabb közelítését, azaz a zaj szűrés teljesítmény csökkenését eredményezi. A kidolgozott eljárás zajszűrés teljesítményének vizsgálatához egy analitikusan, azaz zárt alakban kifejezhető pozitív folytonos  $T(t)$  függvényt alkalmaztunk. A  $T(t)$  egy mért lehűlési

görbét reprezentál, melyet olaj alapú hűtőközegben végzett hűtésnél vettek fel. A további vizsgálatok céljából jelölje  $Y_A(t)$  a mért lehülési görbét reprezentáló, folytonos függvényt, amelyről feltételezzük, hogy additív zajjal terhelt:

$$Y_A(t) = T(t) + n(t) \quad (5.16)$$

A fenti egyenletben  $n(t)$  az additív zajfüggvény,  $t$  az idő, mely a  $[t_s=0 \text{ s}, t_f=60 \text{ s}]$  intervallumban definiált. Vizsgálataink alapján indokolt volt azt is feltételezni, hogy  $n(t)$  valamennyi  $t$  időpontban zérus várható értékű, normál eloszlású random zajt reprezentál, amelynek becslt szórása az időtől független pozitív konstans (azaz  $n(t) = \text{const.}$ ).

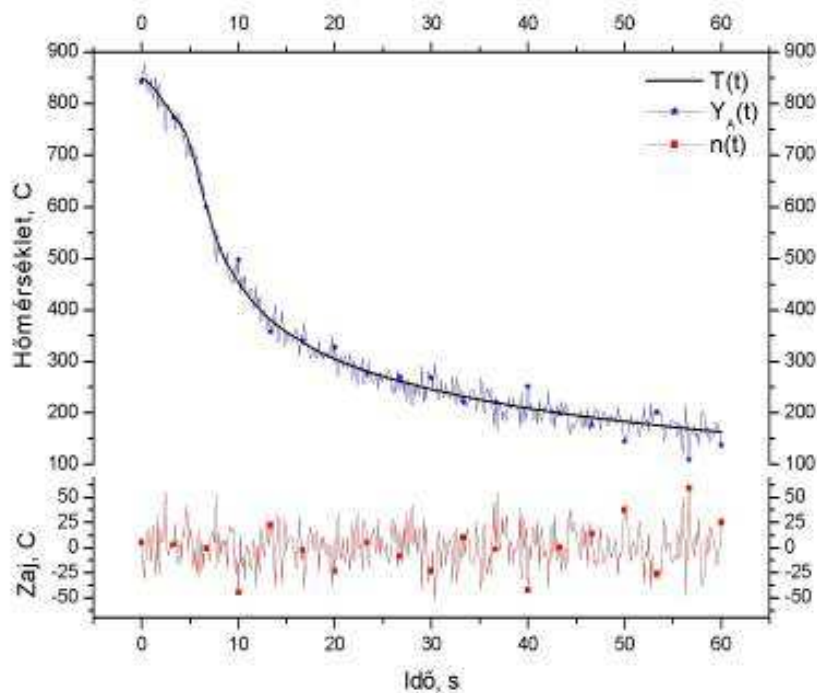
A (5.16) egyenletből kiindulva a  $(t_i, y_i)$  adatpárok a következők szerint állíthatók elő

$$y_i = T(t_i) + n(t_i) \quad (5.17.1)$$

ahol

$$t_i = i * \frac{t_f - t_s}{2N} = i * \frac{600}{2N} \quad (5.17.2)$$

$i = 0, 1, 2, \dots, N$ , és  $N = 300$ . Példaként az 5.5. ábra egy adott lehülési görbét  $T(t)$ , a zajos függvényt  $Y_A(t)$ , valamint a zérus várható értékű zajfüggvényt  $n(t)$  szemlélteti.



5.5. ábra A lehülési görbe  $T(t)$ , a zajos függvény  $Y_A(t)$ , és a zajfüggvényt  $n(t)$

A szűrési módszer hatékonyságának teszteléséhez két mérőszámot vezetünk be: a teljes átlagos eltérést (total average deviation,  $E_{Fa}$ ) és a teljes relatív eltérést (total relative deviation,  $E_{Fr}$ ). Ezek szórás jellegű mennyiségek, amelyek az

$$E_{Fa} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} [y_{Fi} - T(t_i)]^2} \quad (5.18)$$

és

$$E_{Fr} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} \left[ \frac{y_{Fi} - T(t_i)}{n(T_i)} \right]^2} \quad (5.18)$$

formulákkal definiáltak. A fenti képletekben  $y_{Fi}$  a szűrési eljárás által simított jel értéke a  $t_i$  időpontokban,  $i = 0, 1, 2, \dots, 2N-1$ -re.

Az 5.5. ábrán példaként feltüntetett lehülési görbére vonatkozóan a teljes átlagos eltérésre ( $E_{na}$ ) és relatív eltérésre ( $E_{nr}$ ) az alábbi értékek adódtak:

$$E_{na} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} [y_i - T(t_i)]^2} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} n^2(t_i)} = 28.982 \quad (5.19)$$

és

$$E_{nr} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} \left[ \frac{y_i - T(t_i)}{T(t_i)} \right]^2} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} \left[ \frac{n(t_i)}{T(t_i)} \right]^2} = 0.1417 \quad (5.20)$$

A kidolgozott algoritmus szűrési „hatékonyságát” nemcsak szisztematikusan végzett tesztek eredménye alapján, de más szűrési eljárásokkal összehasonlítva is értékeltük. A Fourier analízisen alapuló módszert összehasonlítottuk a műszaki gyakorlatban elterjedten alkalmazott ún. „mozgó átlagolási” (Moving average), valamint a „Savitzky-Golay” algoritmusokkal [60].

Mindkét módszer jellemzője, hogy az  $y_w(t_i)$  szűrt jel értékének becsléséhez adott számú, egymást követő zajos mérési adat különböző súlyokkal származtatott átlagát alkalmazza. A szűrt jel

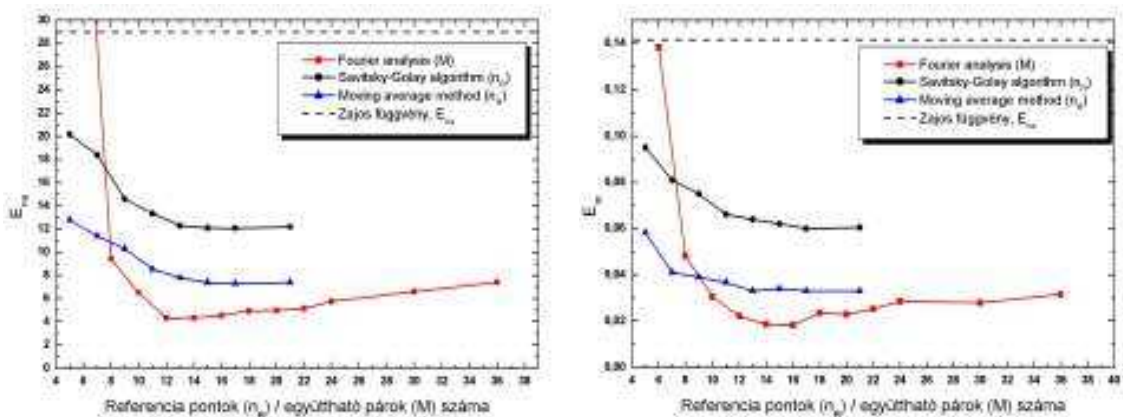
$$y_w(t_i) = \sum_{j=-w}^w \frac{C_j y_{i+j}}{N_w} \quad (5.21)$$



formulával becsülhető, ahol  $N_w$  a normalizáló tényező,  $C_j$  a konvolúciós együttható,  $2w + 1$  a mérési adatok figyelembe vett száma, az ún. ablakméret. A „mozgó átlagolási” módszernél  $N_w = 1/(2w+1)$ ,  $C_j = 1$ , míg a „Savitzky-Golay” eljárás esetén  $N_w = \sum_{j=-w}^w C_j$  és  $C_j$  a legkisebb négyzetek módszerével meghatározott konstansok egy véges sorozata [59]. Vizsgálatainkat az alábbi paraméter-választás (ablakméret választás) mellett végeztük:

- A „Mozgó átlag” technikát 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 21 adatpontot tartalmazó ablakkal,
- A Savitzky-Golay algoritmust 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 21 adatpontot tartalmazó ablakkal,
- Fourier analízist  $M= 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 30, 36$  számú együttható alkalmazásával.

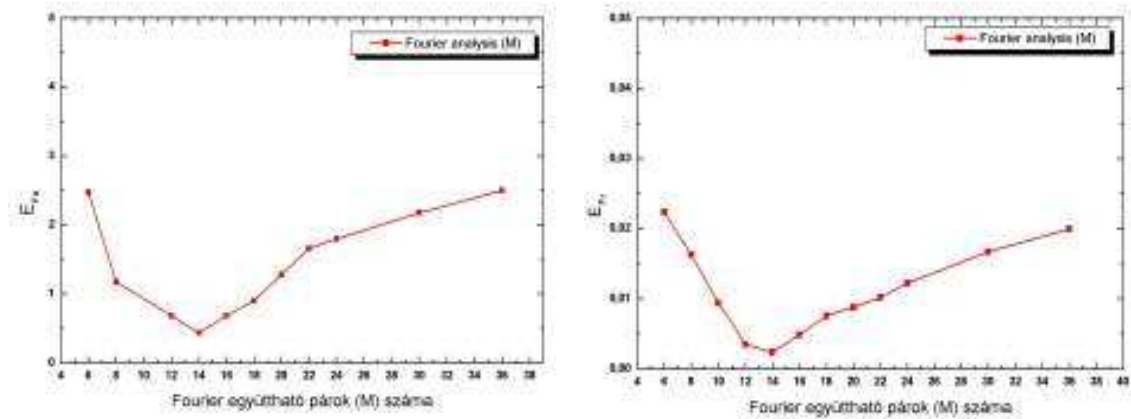
Az összehasonlító teszt eredményeit tekintve (5.6. ábra) az alábbi konklúziók vonhatók le. Mind a mozgó-átlag módszer, mind pedig a Savitzky-Golay módszer szűrési teljesítménye korlátozott. Mindkét technikára jellemző, hogy az adatpontok számának egy bizonyos határon túli növelése (10-12 pont) a zajszint redukciójára már nincs szignifikáns hatással. Az eredmények tanúsága szerint a Fourier analízis alkalmazásával csökkenthető leghatékonyabban a zaj mértéke. Külön figyelmet érdemel, hogy az együttható párok számának csak egy bizonyos, meglehetősen szűk tartománya (12-16 Fourier-együtthatópár) biztosítja a szűrés kívánt hatékonyságát. A diagramokból kitűnik, hogy a Fourier analízissel származtatott simító függvény kellően nagy számú együttható esetén pontosabban közelíti a zajos függvényt, továbbá az is megfigyelhető, hogy a zaj nem eliminálódik teljes mértékben, hanem bár kis mértékben, de a simított hűlési görbén továbbra is jelen van.



5.6. ábra A szűrési hatékonyságot vizsgáló összehasonlító teszt eredménye

Az együttható számnak a lehülési görbe rekonstruálására való hatásának felderítéséhez a fentiekben vázolt metodológia szerint jártunk el. A (5.17) és (5.18) formulák szerint definiált mérőszámoknál  $y_{Fi} - t$ , mint az adott együtthatószám felhasználásával visszaállított lehülési görbét vettük figyelembe. A számítások eredményét a 5.7. ábra szemlélteti. Az  $E_{Fa}$  és  $E_{Fr}$  mérőszámokat a növekvő együtthatószám függvényében ábrázolva, megfigyelhető, hogy a felvett görbéknek globális szélső értéke (minimuma) van. Mindez arra utal, hogy kevés együttható mellett pontatlan a közelítés, míg túl sok együttható használatával a magas

frekvenciájú trigonometrikus tagok jelenléte a visszaállított jel torzulásához (hullámosodáshoz) vezet.



5.7. ábra Az optimális együttható szám meghatározásához végzett vizsgálatok eredményei

Az optimális együttható szám meghatározására irányuló vizsgálatunk arra a végső következtetésre vezetett, hogy a lehülési görbék kódolásához és a kellő hatékonyságú szűrés-simítás megvalósításához elégséges 16 Fourier-együtthatópár használta.

A simító függvény deriválását elvégezve a hűlési sebességfüggvény közvetlenül, zárt alakban előállítható. A lehülési sebesség számításához így nem kell a deriváltakat numerikus módszerrel származtatni, tehát eleve kiküszöbölhetők a numerikus deriválásból adódó pontatlanságok.

A lehülési görbék tárolásához és rekonstruálásához az  $(a_k, b_k, i=0,1,2,\dots,M)$  együtthatókon kívül a  $t_s, t_f, \beta_0, \beta_1$  paraméterek szükségesek. A lehülési görbe  $M=16$  esetén,  $2 \cdot 16 + 5 = 37$  (ugyanis a  $b_0$  együttható értéke minden esetben zérus) adattal leírható. Figyelembe véve, hogy a mért hőmérséklet ciklusokat a jel mintavételi frekvenciájától és rögzítés idejétől függően netán több ezer adatpár is reprezentálhatja, az alkalmazott módszerrel igen nagy mértékű adattömörítés valósítható meg, aminek számos előnye van. A fix adathosszúsággal történő leírási mód egyik nagy előnye, hogy lehetőséget nyújt a lehülési görbék egységes formátumban, adatbázisban való tárolására [60-64].

## 5.2. Hőátadási együttható meghatározása inverz módszerrel

Immerziós edzéskor a hűtőfolyadékba merített testben a hőmérséklet-eloszlás változását az idő és helykoordináta függvényében oly módon határozhatjuk meg, hogy előállítjuk a Fourier-egyenletet megoldását a szokásos harmadfajú (ún. konvekciós) peremfeltétel mellett (5.22). A testben valamint a határfelületen végbemenő hőközlési folyamat több szempontból is nemlinárisnak tekinthető abban az értelemben, hogy a fizikai tulajdonságoknak (hővezetési tényező, fajhő, stb.) valamint a hőátadási együttható erőteljesen függ a hőmérséklettől, és a lehűlés folyamán létező, átalakuló fázisok típusától, minőségétől. Mindebből adódik, hogy a Fourier egyenlet megoldása zárt alakban nem állítható elő, a hőmérséklet-eloszlás meghatározására kizárólag numerikus módszerek alkalmazhatók.

Amennyiben a kezdeti és peremfeltételek korrekt módon adottak, a hőmérsékleteloszlást leíró függvény egyértelműen meghatározható, azaz garantált az egyetlen, egyértelmű megoldás létezése. Ilyen esetben „helyesen feltett” problémáról (well-posed problems) szokás beszélni, amelynek kezelése a rendelkezésre álló numerikus módszerekkel általában probléma mentes.

Alifanov [54] terminológiáját követve „a helyesen feltett problémák” jellegzetessége, hogy: az ok (hőátadási együttható vagy hőfluxus) ismeretében megfelelően alkalmas, numerikus módszerrel egyértelműen meghatározható az okozat (azaz a kialakuló hőmérsékletmező).

A hőátadási együttható becslésére azonban – méréssel meghatározott – hőmérsékletmező ismeretében van lehetőség. A „direkt” probléma „ok-okozat” szekvenciájával szemben ebben az esetben az okozat ismeretében kell következtetnünk az okra, azaz a probléma-felvetés inverz jellegű. Ilyen esetekben „rosszul feltett” (ill-posed) problémákról szokás beszélni, ugyanis ekkor a megoldandó feladat a peremfeltételek rekonstruálása (pl. hőátadási tényező, felületi hőfluxus meghatározása) a munkadarabban kialakult (többnyire mért) már ismert hőmérséklet-eloszlás (mint input adat) ismeretében. Az ill-posed problémák sajátossága, hogy a megoldás előállítása, (az egyértelmű megoldás garantálása miatt) lényegesen bonyolultabb feladatot jelent, mivel a hagyományos direkt módszerek közvetlen alkalmazása általában nem vezet eredményre [53-57].

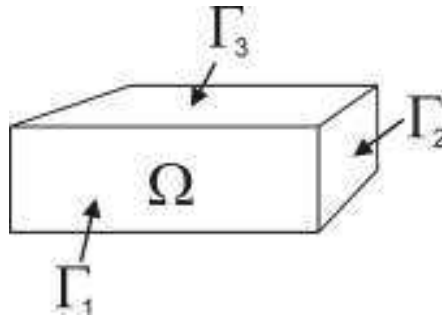
A dolgozat célkitűzéseinek megvalósítása végett szükségesnek tartottuk egy olyan inverz hőközlési feladat megoldására alkalmas algoritmus (numerikus eljárás) kidolgozását, mely lehetővé teszi az 1D végtelen hosszú, hengersizmetrikus test és a környezete között végbemenő hőátadást jellemző, a hőmérséklettől is függő hőátadási együttható kellő pontosságú becslését. Az alábbiakban az inverz számítási módszer elvét ismertetjük, majd két példán keresztül mutatjuk be az eljárás alkalmazását.

### 5.2.1 Az inverz számítási módszer elve

Egy  $\Omega$  térfogatú test (5.8. ábra)  $\Gamma$  felülete (ahol  $p$  a felületelemek száma és  $\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \dots \cup \Gamma_p = \Gamma$  és  $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 \dots \cap \Gamma_p = \emptyset$ ) és az azt körülvevő közeg közötti hőátadási folyamatot az ismert Fourier differenciálegyenlet írja le:

$$\nabla \cdot (k(\mathbf{r}, T) \cdot \nabla T) + Q(T, \mathbf{r}, t) = C_p(\mathbf{r}, T) \rho(\mathbf{r}, t) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.22)$$

ahol  $\mathbf{r}$  a helykoordináta vektor,  $t$  az idő,  $T(\mathbf{r}, t)$  a hőmérséklet,  $k(\mathbf{r}, T)$  a hővezetési tényező,  $C_p(\mathbf{r}, T)$  a fajhő,  $\rho(\mathbf{r}, T)$  a sűrűség,  $Q(T, \mathbf{r}, t)$  az esetleges szilárdfázisú átalakulás következtében képződő hőmennyiség.



5.8. ábra A hőátadás folyamatban résztvevő test

A  $t=0$  időpillanatban homogén hőmérsékleteloszlást feltételezve kezdeti feltétel megadására

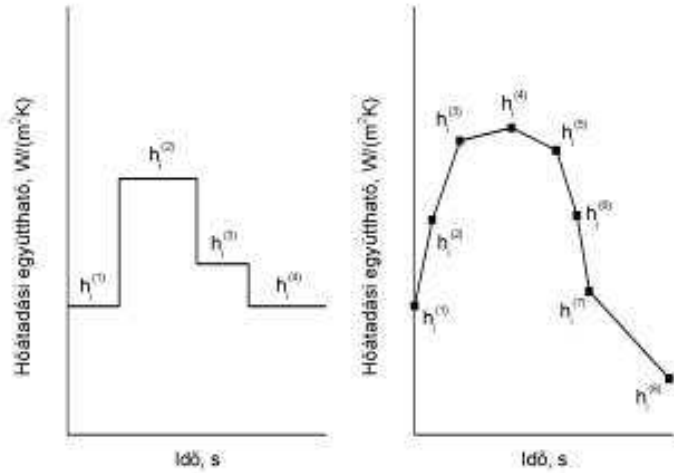
$$T(\mathbf{r}, t = 0) = T_0(\mathbf{r}) \quad (5.23)$$

egyenlet szolgál, ahol  $T_0$  a kezdeti hőmérséklet és  $\mathbf{r} \in \Omega$ . Az egyes felületekhez tartozó harmadfajú peremfeltételt

$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{r}} = h_i (T(\mathbf{r}, t) - T^{\text{am}}) \quad (5.24)$$

egyenlet írja le, ahol  $h_i(T)$  a  $\Gamma_i$  felülethez tartozó hőátadási együttható ( $i=1..p$ ),  $T^{\text{am}}$  a felületet körülvevő közeg hőmérséklete, míg a felületi hőmérséklet  $T(\mathbf{r}, t)$ ,  $\mathbf{r} \in \Gamma_i$ .

A  $h_i$  felületi hőátadási együttható az idő lépcsős, vagy poligonális lineáris függvényt közelíthető a  $[t_s, t_f]$  intervallumban. A hőátadási együtthatót a  $(t_j, h_i^{(j)})$  adatpárok reprezentálják, ahol  $i=1..p$  és  $j=1..q$  (5.9. ábra).



5.9. ábra A hőátadási együttható közelítésére alkalmazott függvények

Az ismeretlen paraméterek  $\boldsymbol{\tau}$  vektor elemeinek tekinthetők, ahol a vektorelemek száma  $m$  ( $m = p \cdot q$ ),  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_m) = (h_1^{(1)}, \dots, h_q^{(1)}, h_1^{(2)}, \dots, h_q^{(2)}, \dots, h_1^{(p)}, \dots, h_q^{(p)})$ . Tegyük fel, hogy a test  $\mathbf{r}_k$ , ( $k=1 \dots n$ ) pontjaiban mért ( $T_k^m$ ) és az ugyanezen a helyeken számított ( $T_k^c$ ) lehűlési görbék rendelkezésünkre állnak. A számított és mért hőmérsékletciklusok ismeretében a hőátadási együttható paramétereinek meghatározása optimalizálási feladat. Azt a vektort ( $\boldsymbol{\tau}$ ) keressük, amely alkalmazása mellett a számított lehűlési görbék a legjobban közelítik a mért görbét. Ennek megfelelően a célfüggvényben (5.25) a mért és számított lehűlési görbék különbségének négyzetösszege szerepel, melynek minimumánál adódik a legkisebb a görbék eltérése.

$$S = S(\tau_1, \dots, \tau_m) = \sum_{k=1}^n (T_k^m - T_k^c)^2 = \min \quad (5.25)$$

A (5.25) célfüggvény szélső érték vizsgálatához a következő egyenlőségnek kell teljesülnie:

$$F_i = \frac{\partial S}{\partial \tau_i} = -2 \sum_{k=1}^n (T_k^m - T_k^c) \frac{\partial T_k^c}{\partial \tau_i} = 0 \quad (5.26)$$

ahol  $i = 1 \dots m$ . Feltételezzük, hogy a nemlineáris egyenletrendszer megoldásához létezik egy  $\boldsymbol{\tau}^{(0)} = (\tau_1^{(0)}, \dots, \tau_m^{(0)})$ , mint első közelítés

$$T_k^c = G_k(\boldsymbol{\tau}) \cong G_k(\boldsymbol{\tau}^{(0)}) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial G_k}{\partial \tau_j} \Delta \tau_j^{(1)} \quad (5.27)$$

ahol  $\Delta \tau_j = \tau_j^{(1)} - \tau_j^{(0)}$

A (5.27) egyenletet a (5.26) formulába helyettesítve

$$\sum_{k=1}^n \left[ T_k^m - G_k(\tau^{(0)}) - \sum_{j=1}^m \frac{\partial G_k}{\partial \tau_j} \Delta \tau_j^{(1)} \right] \frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} = 0 \quad (5.28)$$

rendezve az egyenletet ( $i=1 \dots m$ ), az alábbi összefüggés adódik

$$\sum_{j=1}^m \left[ \sum_{k=1}^n \frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} \frac{\partial G_k}{\partial \tau_j} \right] \Delta \tau_j = \sum_{k=1}^n \left[ T_k^m - G_k(\tau^{(0)}) \right] \frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} \quad (5.29)$$

A (5.29) a lineáris egyenletrendszer általános alakja

$$\mathbf{A}^{(1)} \Delta \boldsymbol{\tau}^{(1)} = \mathbf{b} \quad (5.30)$$

ahol az  $\mathbf{A}$  mátrix elemei

$$\mathbf{A}_{ij}^{(1)} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} \frac{\partial G_k}{\partial \tau_j} \quad (5.31)$$

ahol ( $i=1 \dots m$  és  $j=1 \dots m$ ) és  $\mathbf{b}$  vektor elemei

$$\mathbf{b}_i^{(1)} = \sum_{k=1}^n \left[ T_k^m - G_k(\tau^{(0)}) \right] \frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} \quad (5.32)$$

ahol ( $i=1 \dots m$ ). A  $\frac{\partial G_k}{\partial \tau_i}$  derivált centrális differencia sémával közelíthető

$$\frac{\partial G_k}{\partial \tau_i} \cong \frac{G_k(\tau_i^{(0)} + \varepsilon) - G_k(\tau_i^{(0)} - \varepsilon)}{2\varepsilon} \quad (5.33)$$

ahol  $G_k(\tau_i \pm \varepsilon)$  az  $\mathbf{r}_k$  helyen számított hőmérséklet,  $\varepsilon$  célszerűen választott alacsonyértékű szám, ( $k=1 \dots n$ ). A számított lehűlési görbe  $\tau_i$  szerinti első deriváltja az un. érzékenységi paraméter (sensitivity parameter) [53], mely a  $\tau_i$  változásának a lehűlési görbére gyakorolt hatását jellemzi. A lineáris egyenletrendszer megoldásával az optimalizálási probléma (5.25) közelítését kapjuk:

$$\tau_j^{(1)} = \tau_j^{(0)} + \Delta \tau_j^{(1)} \quad (5.34)$$

A (5.25) ismételt megoldásával (iterálásával), felhasználva az első közelítés eredményét ( $\tau_i^{(1)}$ ) újabb közelítést kapunk,:

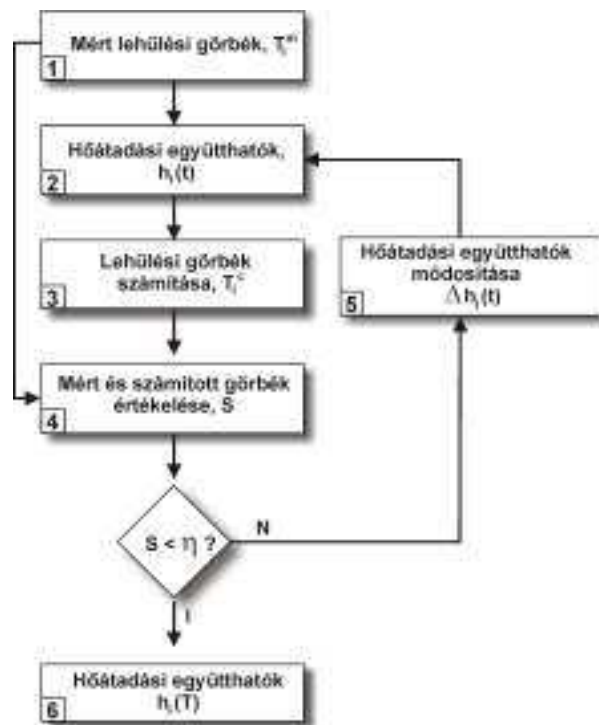
$$\mathbf{A}^{(2)} \Delta \boldsymbol{\tau}^{(2)} = \mathbf{b}^{(2)} \quad (5.35)$$

$$\tau^{(2)} = \tau^{(1)} + \Delta\tau^{(2)} \quad (5.36)$$

Az iterációs eljárás

$$S(\tau) < \eta \quad (5.37)$$

leállási feltételig ismétlődik, ahol  $\eta$  tetszőlegesen választott kis szám.



5.10. ábra Az inverz algoritmus lépései

A kidolgozott iterációs algoritmus működését a 5.10 ábra szemlélteti. A hőátadási együttható számítása a következő lépésekből áll:

1. lépés A lehülési során a vizsgált munkadarab adott pontjaiban a lehülési görbék ( $T_i^m$ ,  $i=1 \dots p$ ) felvétele a  $[t_s, t_f]$  intervallumban.
2. lépés Az idő függvényében definiált hőátadási együtthatók ( $h_i(t)$ ,  $i=1 \dots p$ ) meghatározása a  $[t_s, t_f]$  intervallumban.
3. lépés A lehülési görbék számítása ( $T_i^c$ ,  $i=1 \dots p$ )  $h_i(t)$  alapján
4. lépés A mért és számított lehülési görbék összehasonlítása,  $S$  számítása
5. lépés Ha a különbség a megadott tolerancia határon kívül esik, akkor  $h_i(t)$  módosítása  $\Delta h_i(t)$ -val és visszatérünk a 2. lépéshez.
6. lépés Ha a közelítés megfelelő, akkor a számítás végeredménye a teljes hőmérséklet ciklus ismeretében a hőátadási együtthatók, mint a felületi hőmérséklet függvényei  $h_i(T)$ .

Az iterációs eljárás 0. lépésében a hőátadási együttható függvényeket az alábbiakban definiáljuk

$$h_i(t) = I_i \quad (5.38)$$

ahol  $I_i$  az  $i$  felülethez tartozó ( $i=1 \dots p$ ) un. a kezdeti beállítás (initial guess) függvény.

### 5.2.2 Szimulációs vizsgálatok a hőátadási együttható meghatározására

A kifejlesztett inverz számítási technika vizsgálatát numerikus szimulációs vizsgálatokon keresztül végeztük. Szakirodalmi források ajánlásainak megfelelően [53-55] a számított hőátadási együttható közelítésének pontosságát vizsgáltuk. Az inverz módszer működésének hatékonyságát két példán keresztül illusztráljuk.

Az első kísérletünknel, direkt modellezési eljárással szimuláltuk a hengeres test lehűlését egy hipotetikus, az időben szakaszosan lineáris (háromszög jel) hőátadási együttható figyelembe vétele mellett (5.11. ábra). A szimulációs teszthez egy dimenziós, tengelyszimmetrikus hőátadási modellt alkalmaztunk, ahol a peremfeltételben (5.24) szereplő hőátadási együttható,  $h_1(t)$ . A hőmérsékletszámításokhoz szükséges geometriai és fizikai adatokat a 5.1 táblázat tartalmazza. A próbatest középvonalában kialakult hőmérsékletciklust, mint „mért lehűlési görbét” ( $T^m$ ) vettük alapul az inverz számításainkhoz a  $[0, 20s]$  időintervallumban. A hőátadási együttható meghatározásánál tehát azt a  $h_1(t)$  függvényt közelítettük, amelynek alkalmazásával a középvonalban számított hőmérséklet ( $T^c$ ) és a mért hőciklus ( $T^m$ ) közötti eltérés a legkisebbre adódott az említett időtartományban. Az inverz számításokhoz szükséges  $h_1(t)$  kezdeti beállítását

$$h_1(t) = 100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.39)$$

szerint definiáltuk, ahol  $0 \leq t \leq 20 \text{ s}$ .

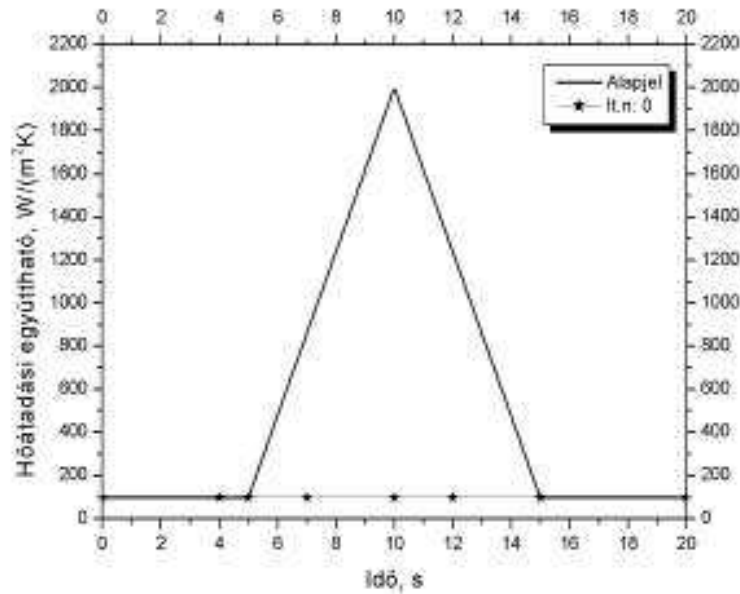
Henger átmérő, D	12.5 mm
Hővezetési együttható, k	24 W/(mK)
Fajhő, $C_p$	495 J/(KgC)
Sűrűség, $\rho$	7850 Kg/m <sup>3</sup>

5.1 táblázat A szimulációs vizsgálatokhoz alkalmazott paraméterek

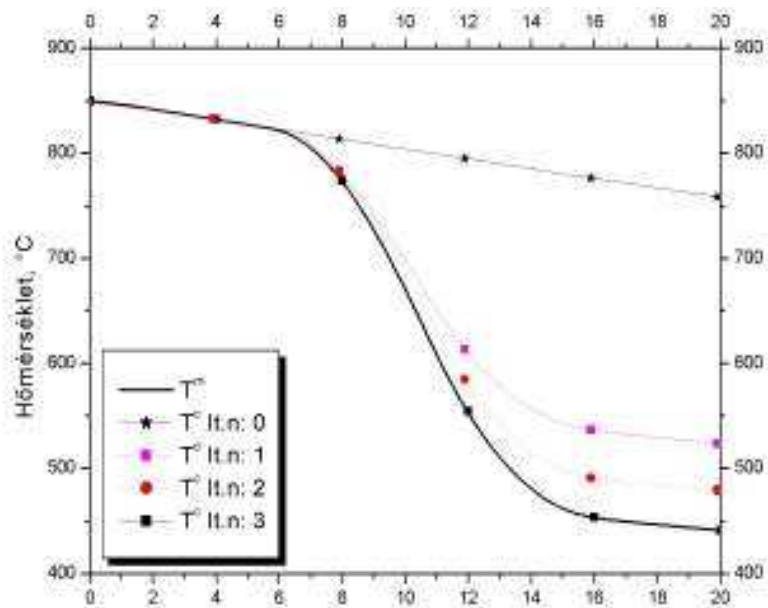
A számítások eredményeit az 5.12 – 5.14 ábrák szemléltetik. Az 5.12. ábra a henger szimmetriatengelyében mért hőmérsékletciklus és az egyes iterációs lépésekben számított hőmérsékletet reprezentálja az idő függvényében. Az ábra tanúsága szerint a 3. iterációs lépésben számított hőátadási együttható mellett a számított hőmérsékleti görbe csaknem teljesen fedi mért görbét. Ezt a következtetést támasztja alá a 5.13. ábrán látható diagram is, mely a mért és számított lehűlési görbék különbségét mutatja az idő függvényében. Szembetűnő, hogy a harmadik lépésben a hőmérséklet differencia igen csekély mértékű a



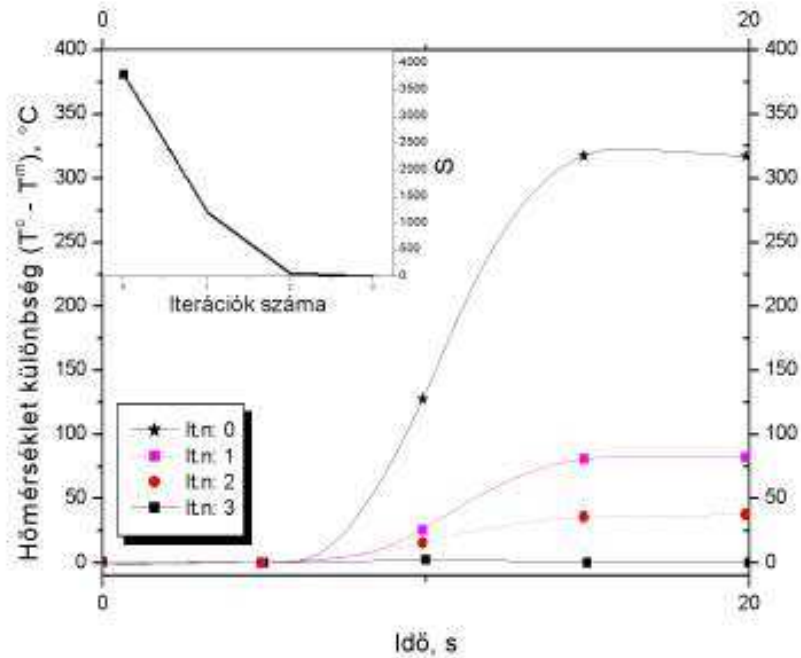
vizsgált időintervallumban. A görbék különbségének négyzetösszege,  $S$  (5.25) az iterációk számának függvényében csökkenő tendenciát mutat (5.13. ábra), mely arra utal, hogy a közelítés lépérlől-lépésre egyre pontosabb. Ezzel összhangban a 5.14. ábra az egyes iterációk során számított hőátadási együttható szemlélteti az idő függvényében.



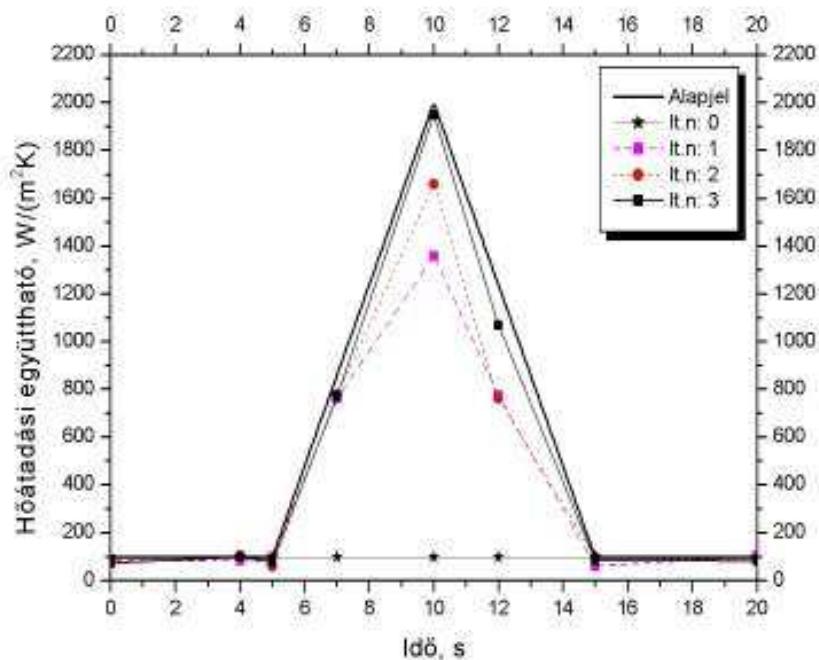
5.11. ábra A numerikus teszteléshez alkalmazott hipotetikus hőátadási együttható (Alapjel) és a 0. iterációhoz tartozó hőátadási együttható (kezdeti beállítás) az idő függvényében



5.12. ábra A mért hőmérsékletciklus ( $T^m$ ) és az egyes iterációs lépésekben számított hőmérsékletet ( $T$ ) reprezentálja az idő függvényében



5.13 ábra A mért és számított lehülési görbék különbsége az idő függvényében és a görbék különbségének négyzetösszege,  $S$  (5.25) az iterációk számának függvényében



5.14 ábra Az iterációs lépésekben számított hőátadási együttható az idő függvényében

A második kísérletünk során valós, ISO 9950 szabványnak megfelelő mérőműszerrel rögzített hűlési görbe alapján határoztuk meg a hengeres próbatest palástjához tartozó hőátadási együtthatót. A számításokhoz ebben az esetben is egy dimenziós,

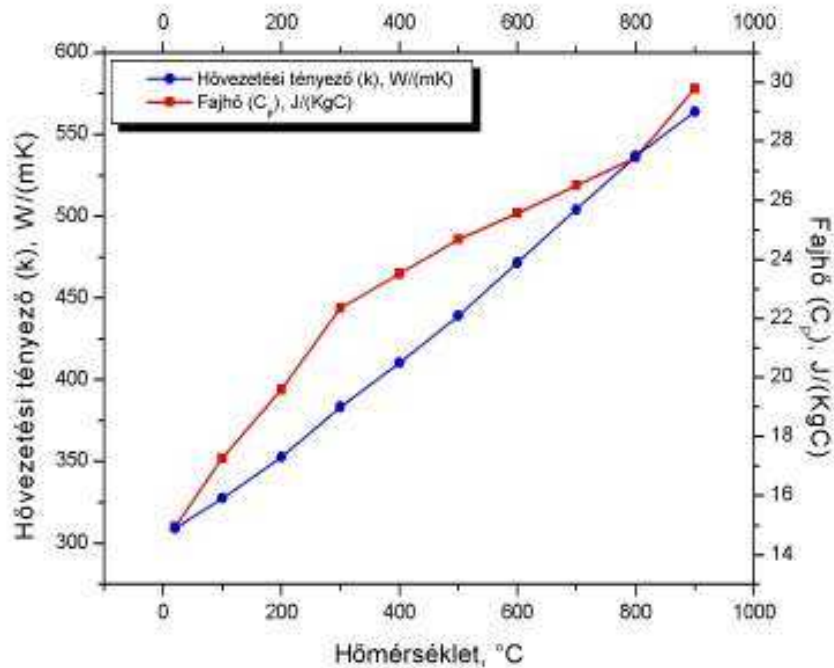
tengelyszimmetrikus hőátadási modellt alkalmaztunk. A próba alapanyagára jellemző termo-fizikai tulajdonságokat az 5.15 ábra szemlélteti. A hőmérsékletszámításokhoz egyrészt a 5.3 táblázat geometriai és fizikai paramétereit, másrészt az Inconel600 ötvözetre jellemző hővezetési tényező és a fajhő hőmérséklettől való függését (5.15.ábra) vettük figyelembe [58]. A 30 °C hőmérsékletű hagyományos edzőolajban felvett lehülési görbe ( $T^m$ ) 5.16. ábrán látható. Az inverz számításokhoz szükséges  $h_1(t)$  kezdeti beállítását

$$h_1(t) = 600 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.40)$$

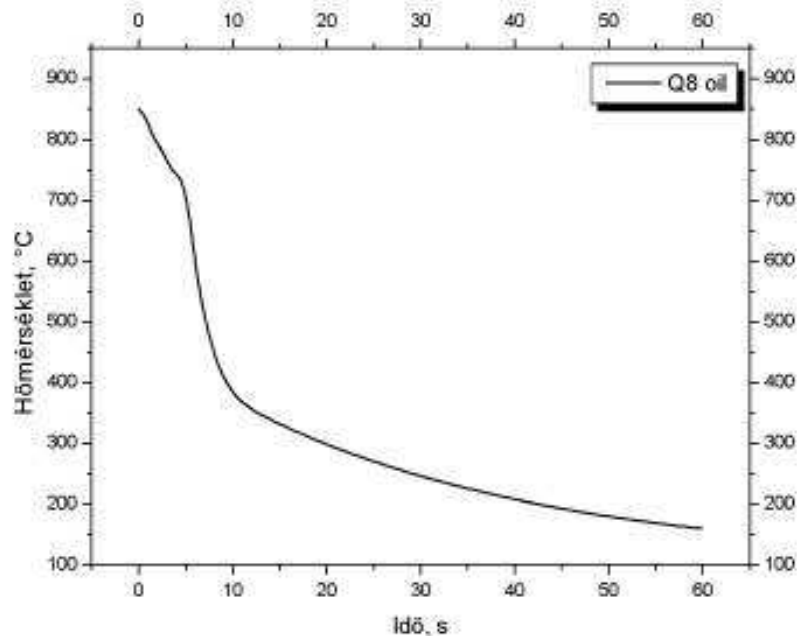
szerint határoztuk meg, ahol  $0 \leq t \leq 60 \text{ s}$ .

C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Ti	Ni
0.08	0.47	0.21	0.16	0.13	15.51	0.21	8.33	0.23	74.79

5.2 táblázat Az Inconel600 ötvözet kémiai összetétele



5.15. ábra Az Inconel600 ötvözetre jellemző hővezetési tényező és a fajhő a hőmérséklet függvényében [58]



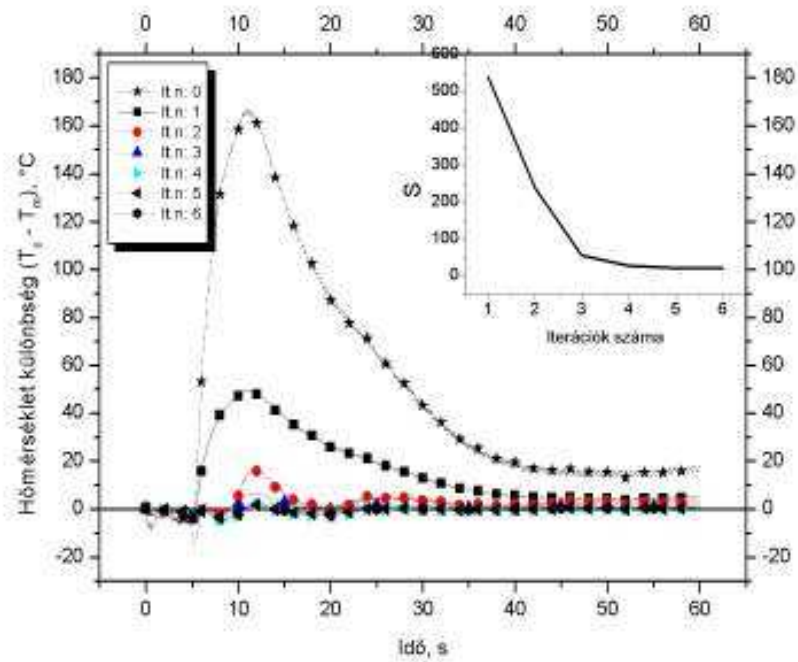
5.16. ábra A hagyományos edzőolajban felvett lehülési görbe

Henger átmérő, D	12.5 mm
Hővezetési együttható, k	A hőmérséklet függvénye [58] (5.15 ábra)
Fajhő, $C_p$	A hőmérséklet függvénye [58] (5.15 ábra)
Sűrűség, $\rho$	8430 Kg/m <sup>3</sup>

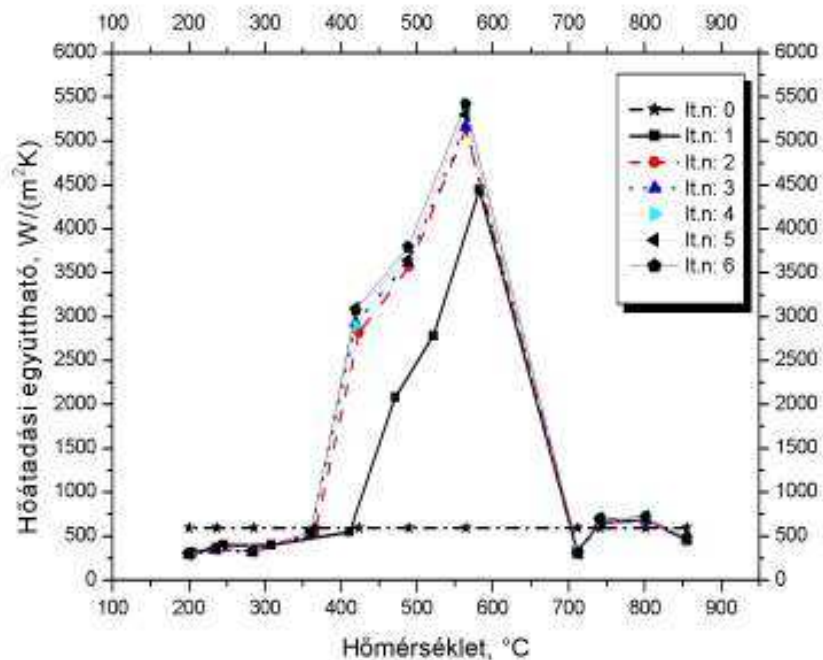
5.3 táblázat Az ISO 9950 szabványban meghatározott próbatest adatai

A 5.17 – 5.18. ábrák a számítások eredményeit reprezentálják. A mért és számított lehülési görbe különbségét az idő, valamint a különbségek négyzetösszegét (S) az inverz számítások iterációs számának függvényében a 5.17 ábra szemlélteti. Az ábra tanúsága szerint az egymást követő számítások eredményeként a görbék közötti eltérés szignifikánsan csökken, azaz a közelítés egyre pontosabb. Ugyancsak szembeűnő, hogy a 4. iteráció után a görbék négyzetösszegének különbsége egy alacsony értékhez konvergál, tehát az ezt követő inverz számítások a közelítés pontosságát jelentősen nem javították. Ez a jelenség tapasztalható az egyes iterációs lépésekben számított hőátadási együttható függvényeket tekintve is (5.18 ábra), a 4-5-6 iterációban kalkulált függvények gyakorlatilag azonosak

E két szimulációs kísérlet eredménye arra enged következtetni, hogy a kifejlesztett inverz hőátadási algoritmus az 1D tengelyszimmetrikus próbatest lehülésekor kialakuló hőátadási együttható meghatározásához eredményesen alkalmazható [82].



5.17 ábra A mért és számított lehülési görbék különbsége az idő függvényében és a görbék különbségének négyzetösszege,  $S$  (5.25) az iterációk számának függvényében



5.18 ábra Az egyes iterációs lépésekben számított hőátadási együttható a hőmérséklet függvényében

### 5.3 A Tulajdonság-becslő rendszer

A következőkben ismertetett fémtani-matematikai modell alapgondolata Gergely Márton és Réti Tamás nevéhez fűződik [65-68]. A modell és az arra épülő szimulációs eljárás kifejlesztésében és alkalmazásnak kiterjesztésében 1994-től kezdődően vettem részt, melynek eredményei azokban a publikációkban követhetők nyomon, melyek a témakörhöz kapcsolódó munka eredményeiről számolnak be [69-76, 80-83]. Mivel a dolgozat első sorban a hűtőközegek minősítésére koncentrált, ezért az alábbiakban csupán a predikciós modell felépítéséről ejtünk szót.

A modellen alapuló számítási algoritmus lehetőséget nyújt az ausztenitbomlással kapcsolatos folyamatok nyomon követésére az ausztenitesítést követő hűtés során, továbbá az átalakulások eredményeként kialakuló mikroszerkezet és mechanikai tulajdonságok eloszlásának előrejelzésére a henger alakúnak feltételezett munkadarab teljes keresztmetszetében.

A modell alapját képező egyenletek alapvetően három fő csoportba sorolhatók:

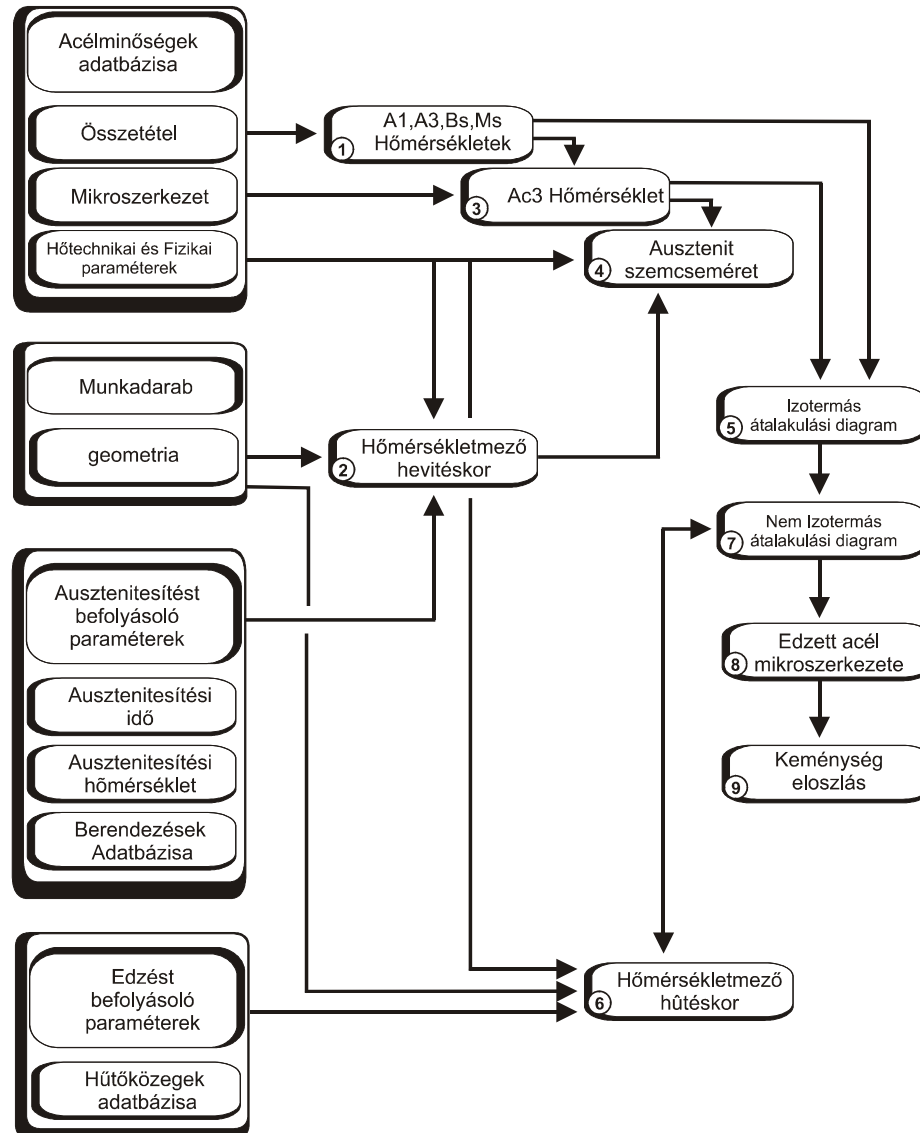
- A hőközlési folyamatot leíró egyenletek. Ezek közé tartoznak a mérési adatok alapján származtatott empirikus jellegű formulák (hevítési és hűtési görbék, melyek a hőkezelő berendezés, munkadarab geometriája, elhelyezkedése, a hőátadó közeg paramétereinek figyelembe vételével becsülhetők), továbbá az ausztenitesítést követő hűtés folyamatát leíró Fourier egyenlet, amelynek numerikus megoldása harmadfajú peremfeltétel mellett történik.
- A nem-izoterm átalakulási folyamatokat (ausztenit szemcsenövekedést, és az ausztenit diffúziós mechanizmus szerinti bomlását (ferrites, perlites, bénites átalakulást) jellemző kinetikai differenciálegyenlet rendszer.
- A mikroszerkezet és a mechanikai tulajdonságok között összefüggést leíró, jobbra empirikus jellegű összefüggések.

#### 5.3.1. A modell felépítése

A tulajdonságbecslő modell felépítését, a modulelemek kapcsolódási rendszerét a 5.19 ábra blokkdiagramja ábrázolja. A diagramból kitűnik, hogy a szimulációs modell a nemesítés két alapvető részműveletének az ausztenitesítésnek és az ezt követő lehűtésnek leírására terjed ki [67].

Az 1-től 9-ig terjedő sorszámmal jellemzett modulelemek az egyes részfolyamatok leírására hivatottak. Az egyes modulok az időközi fejlesztés eredményeként több ízben is módosultak, összhangban azzal a korábban említett törekvéssel, hogy az egyes elemeket

fokozatosan korrigálva, ill. kicserélve, növeljük a becslés pontosságát, és végeredményként ezáltal is javítsuk.



5.19 ábra A szimulációs modell felépítése

A modell input adatai a következők:

- Az acélminőségek adatbázisa, mely a kémiai összetételtől és a kiinduló mikroszerkezettől függő technológiai, hőtechnikai, anyagszerkezeti (kinetikai) paramétereket tartalmazza.
- A munkadarab geometriai adatai, amelyek egydimenziós hőközlési modellt feltételezve lemez illetve henger alakú munkadarabra vonatkoznak.
- A munkadarabnak az auszenítésési hőmérsékletre való felhevítését jellemző adatok (kemencék adatbázisa, hevítő közegek, hevítési módok, auszenítésési idő, hőmérséklet paraméterei).

- Az ausztenitesítést követő hűtésre vonatkozó adatok (hűtési mód, hűtőközegek adatbázisa).

Az 1. modul ellenőrzi, hogy a választott acélminőség megfelel-e az előírt összetételre vonatkozó specifikációnak, és kiszámítja az átalakulási folyamatokat jellemző karakterisztikus  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $B_s$ , és  $M_s$  hőmérsékleteket. Ezek becslésére az acél vegyi összetétele függvényében a szakirodalomban különféle formulák nagy választékban állnak rendelkezésre [68].

A 2. modul a hevítési görbét számítja, figyelembe véve a munkadarab geometriáját, a hevítés módját, a hőkezelő berendezés típusát, az ausztenitesítés idő és hőmérséklet paramétereit. Tekintettel arra, hogy a felhevülés folyamatára rendkívül sok tényező lehet hatással (így a hőközlés módja és hevítő berendezés műszaki paramétere, a munkadarab nagysága, a felület minősége, a munkadarabok száma, relatív helyzete egymáshoz képest, stb.), ezért ritka kivételtől eltekintve a hevítési görbe csak empirikus módszerrel becsülhető, többnyire mérési adatok alapján származtatott formulákkal.

A 3. modul az  $A_{c3}$  nem-egyensúlyi átalakulási hőmérséklet számítására hivatott. Értékét alapvetően az acél kémiai összetétele, a hevítés sebessége valamint a kiinduló mikroszerkezet határozza meg. Az  $A_3$  hőmérséklet előzetes ismeretében  $A_3$  a következő formulával számítható [68]

$$A_{c3} = A_3 + a_p \sqrt[3]{V_p} \quad (5.41)$$

ahol  $V_p$  az  $A_3$  hőmérsékletre vonatkozó becsült hevítési sebesség,  $a_p$  pedig a kiinduló mikroszerkezetre jellemző, a szakirodalomból ismert ausztenitesítési diagramok felhasználásával becsült állandó. Az  $a_p$  értéke 3 és 25 között változik, attól függően, hogy a kiinduló mikroszerkezet milyen típusú (ferrit-perlites, szfeoridit, stb.), illetve ezt milyen előzetes hőkezeléssel (lágnyítás, normalizálás, nemesítés, stb.) hozták létre. Az  $A_{c3}$  hőmérséklet ismerete több szempontból is fontos, részben azért, mert homogén ausztenit létrejöttéhez e hőmérséklet fölé kell az acélt hevíteni, másrészt az ausztenit szemcsenövekedése gyakorlatilag az  $A_{c3}$  hőmérsékleten veszi kezdetét. Nemesíthető acéloknál az ausztenit ASTM fokozat szerinti szemnagysága az  $A_{c3}$  hőmérsékleten 11-12 közötti van. Az acélok ausztenitesítések végbemenő komplex folyamatok vizsgálata újabban különösképpen előtérbe került. Ez összefügg a nagysebességű hevítést alkalmazó hőkezelési eljárások (pl. indukciós, lézeres edzés) terjedésével, illetve modellezésével, ugyanis itt a részleges ausztenitesedés jelenségével is számolni kell.

Az ausztenit szemcsedurvulási folyamatának fenomenológiai leírása 4. modulon alapszik. Homogén ausztenit létrejöttét feltételezve, a munkadarab egyes pontjaiban az ausztenit szemcsemérete  $D_a$  a változó hőmérsékletű hevítés során fokozatosan növekszik. A szemcsenövekedés kinetikája [65.].

$$\frac{dD_a}{dt} = \frac{K_a(T)}{n_a} \cdot D_a^{n_a} \quad (5.42)$$



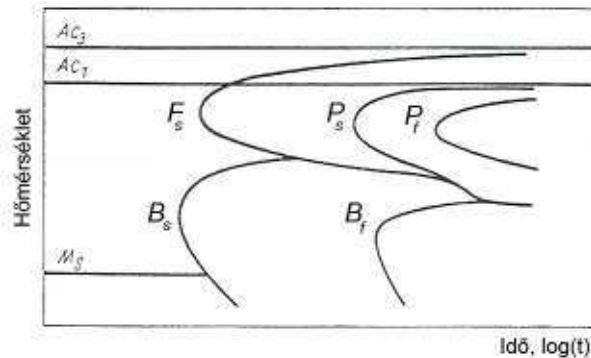
differenciál egyenlettel írható le, ahol  $D_a$  az ausztenit aktuális szemcsemérete. Az  $n_a$  anyagminőségtől függő paraméter értéke 2 és 4 között van. Az Arrhenius típusú  $K_a(T)$  kifejezés a termikusan aktivált folyamat sebességének a Kelvinben mért  $T$  hőmérséklettől való függőségét jellemzi

$$K_a(T) = k_a e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (5.43)$$

ahol  $K_a$  az un. pre-exponenciális tényező,  $E_a$  a folyamat látszólagos aktiválási energiája. Az ausztenit szemcseméret becslése azért fontos, mert a fajlagos szemcsefelület nagysága befolyással van a csíráképződéssel és növekedéssel járó, diffúziós mechanizmus szerinti ausztenitbomlás kinetikájára. Itt kell kitérni arra a körülményre, hogy az ausztenit szemcsenövekedés kinetikájára kihat a szemcsenövekedést gátló un. második fázisok (pl. nitridek) jelenléte is. Ismeretes, hogy amennyiben az ausztenitesítés hőmérséklete meghaladja a második fázis oldódási hőmérsékletét, a szemcsenövekedés sebessége ugrásszerűen megnövekedhet. Ezt a problémát (5.42) egyenlet kinetikai paramétereinek alkalmas megválasztásával lehet megoldani. Az említett jelenség a nemesíthető acélok ausztenitesítésére általában nem jellemző, ugyanis ezeknél a szokásos ausztenitesítési hőmérséklet viszonylag alacsony. A probléma kiélezetten jelentkezik a képlékeny alakítás szokásos hőmérsékletéről edzett acéloknál, valamint az acélok hegesztést követő lehűlés során a hőhatás övezet egyes tartományaiban.

Újabban az ausztenit ill. általában fázisok növekedési kinetikájának jellemzésére több új típusú 2 ill. 3 dimenziós modellt is javasoltak, ezek általában közönséges vagy sztochasztikus differenciál egyenletek megoldásán alapulnak, vizsgálatuk a sztochasztikus szimuláción alapuló eljárások (Monte Carlo módszerek) alkalmazását feltételezik. Az újabb modellek gyakorlati hasznosítását egyelőre hátráltatja az a körülmény, hogy a modellparaméterek becslésének módszerei kevésbé tisztázottak, az új megközelítési mód nyújtotta előnyöket a tapasztalatok még nem igazolták meggyőzően [65.].

Az 5. modul az izoterm átalakulási diagramok jellemzőit határozza meg, figyelembe véve az acél kémiai összetételét, a becsült ausztenit szemcseméretet, valamint a már számított  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $B_s$ , és  $M_s$  karakterisztikus hőmérsékletet. Az alkalmazott módszer elvét 5.20 ábra szemlélteti, amelyek a gyengén ötvözött nemesíthető acélok jellemző izoterm átalakulási diagramjait ábrázolva, feltüntetik a ferrites, perlites és bénites átalakulások kezdő  $F_s$ ,  $P_s$ ,  $B_s$  valamint  $F_f$ ,  $P_f$ ,  $B_f$  véghőmérsékleteit az idő-hőmérséklet koordinátarendszerben. A görbepár valamennyi esetben az átalakulás kezdeti és befejezési időpontját adja meg, amely az 1%, ill. a 99% átalakult ausztenithányad alapján definiált. Kivételt képez a proeutektoidos ferrites átalakulás  $F_f(T)$  befejeződési hőmérséklete, amely a lehetséges maximális egyensúlyi ferrithányadot reprezentálja. Az átalakulások kezdetének és befejeződésének idejét a hőmérséklet, kémiai összetétel és ausztenit szemcseméret függvényében exponenciális típusú negyedfokú polinomokkal lehet megadni. Az ily módon definiált C-görbepárok szolgálnak kiindulásul az izoterm ferrites, perlites és bénites átalakulást leíró kinetika függvények származtatásához, nevezetesen az Avrami-típusú kinetika függvények paramétereinek becsléséhez.



5.20 ábra Hipoeutektoidos ötvözetlen és gyengén ötvözött acélokra jellemző izotermikus átalakulási diagram

Az ausztenit diffúziós típusú izoterm átalakulási folyamatainak kinetikai leírására az Avrami egyenlet kiterjesztéseként származtatott [66]

$$\frac{dy_j}{dt} = K_j \cdot y_j^{a_j} \cdot (1 - y_j)^{b_j} \cdot \left[ \ln \frac{1}{1 - y_j} \right]^{c_j} \quad (5.44)$$

típusú differenciálegyenleteket alkalmaztuk. (A különféle átalakulási termékek  $y_j$  relatív hányadának megkülönböztetésére a bevezetett index szolgál, ahol  $j=1$  a ferrites,  $j=2$  a perlites,  $j=3$  a bénites,  $j=4$  a martenzites átalakulásra utal. Az  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  és  $K_j$  összetétel, az ausztenit szemcseméretétől és a hőmérséklettől függő paraméterek. Az izoterm átalakulási folyamatok leírásakor azokból a feltételezésekből indultunk ki, amelyek a szokásos izoterm C-görbék tükrében az alábbiak szerint interpretálhatók:

- Ferrites átalakulás befejeződésének időpontja megegyezik a perlites átalakulás kezdeti időpontjával, amennyiben a perlites átalakulást ferrites előzi meg. Adott izotermán maximálisan képződő ferrithányad az ún. Hultgren extrapoláció alkalmazásával becsülhető meg [77]. A ferrites átalakulást leíró Avrami típusú kinetika függvény exponense egyenlő 1-el, ami elfogadott és gyakran használt hipotézis a szakirodalomban [78].
- Feltételezve, hogy a  $T_{Bs}$  hőmérséklet alatti tartományban az ausztenit átalakulása bénitesen kezdődik, majd perlitesen folytatódik, a két szövetelem térfogathányadának meghatározása lineáris keverési szabály alkalmazásával megvalósítható.
- A ferrites, perlites és bénites átalakulást leíró Avrami típusú egyenletek paraméterei, amelyek a hőmérséklet, ausztenit szemcseméret és kémiai összetétel által determináltak, a megfelelő izoterm átalakulási diagram kezdő és befejező C görbepárját reprezentáló időhőmérséklet függvények alapján becsülhetők.

A 6. modul a hűtési folyamat hőtechnikai modelljét tartalmazza. Az 5.1 ábra jelöléseinek megfelelően a henger geometriájú munkadarabra vonatkoztatott egydimenziós hőközlési modellt feltételezve,  $D=2R$  hengerátmérő ill. lemezvastagság esetében a Fourier egyenlet

$$\left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + Q = C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.45)$$

alakot ölti, ahol  $r$  a helykoordináta vektor,  $t$  az idő,  $T$  a hőmérséklet,  $k$  a hővezetési tényező,  $C_p$  a fajhő,  $\rho$  a sűrűség,  $Q$  az ausztenit átalakulásával járó hőeffektust jellemző térfogati hőforrástagn.

A  $T_a$  ausztenitesítési hőmérséklettről való hűtés instacioner jellegű, a hőmérséklet-eloszlás meghatározása a

$$T(r, t = 0) = T_a(r) \quad (5.46)$$

kezdeti feltétel és a

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h_c(T) [T(R, t) - T^{am}] \quad (5.47)$$

harmadfajú peremfeltétel mellett történik. A (5.47) egyenletben  $T^{am}$  a hűtőközeg környezeti hőmérséklete,  $h_c(T)$  a henger felületéhez tartozó (5.1 ábra) hőátadási együttható ( $i=1..p$ ).

A 7. modul, amely eredendően a nemizoterm ausztenitbomlás kinetikai részmodelljét reprezentálja, az ausztenitbomlási folyamatot a 6. hűtési modullal kölcsönhatásban írja le. A kölcsönhatást ill. visszacsatolást (coupled model) annak a körülménynek a figyelembevétele jelenti, hogy a hűtés során a hőmérsékletváltozás befolyással van az átalakulási folyamatok sebességére, másrészt viszont a hőtermeléssel járó ausztenitbomlás folyamata visszahat a hőmérséklet eloszlásra és megváltoztatja a hőmérsékletmező jellegét.

E jelenség leírására a hőtechnikai modellben

$$Q(x, t) = \sum_{j=1}^4 E_j \cdot \frac{dy_j}{dt} \quad (5.48)$$

un. forrástagn szolgál, ahol  $E_j$  ( $j=1, 2, 3,$  és  $4$ ) rendre a ferrites, perlites, bénites és martenzites átalakulás látens hője [78]. A vizsgálatokból kitűnik, hogy az ausztenitbomlás során termelt hő elsősorban azoknál a nagyobb karbontartalmú, ötvözetlen acéloknál számottevő, amelyeknél az  $500-600$  °C közötti intervallumban jelentős mennyiségben képződik perlit a lehűlés folyamán.

Az  $y_j$  átalakult térfogathányad számítása a nemizoterm lehűlési folyamat során a (5.44) differenciálegyenlet rendszer numerikus megoldásával történik, az un. rekurziós algoritmusra támaszkodva [66].

Az  $M_s$  hőmérséklet alá hűtve az acélt a még rendelkezésre álló ausztenithányad (vagyis az ausztenitnek az a része, amely még nem alakult át ferritté, perlitté, ill. bénitté) martenzitté alakul át. Az  $y_4$  martenzithányad az  $M_s$  hőmérséklet, a  $T_v$  véghőmérséklet függvényében szokásos módon az un. Koistinen-Marburger féle formulával [78].

$$y_4 = (1 - y_1 - y_2 - y_3) \{1 - \exp[-(0.011(M_s - T_v))]\} \quad (5.49)$$

becsülhető, ahol  $T_v = 20^\circ\text{C}$ .

A 8. modul funkciója az edzést követően kialakult mikroszerkezet (ferrit, perlit, bénit, martenzit) hányad predikciója.

A 9. modul az edzés utáni keménységeloszlást hivatott kiszámítani. A számítási algoritmus alapjául a szövetelemeknek az izoterm hőkezelés eredményeként becsült keménysége szolgált. Az a módszer, amelynek alapelve Pumphry és Jones nevéhez fűződik [79] és amelynek szélesebb körű alkalmazására csak jóval később, a számítástechnika anyagtudományi célú hasznosítását követően került sor, a következő megfontolásokon alapul [68].

Az ausztenitesítést követően izotermikusan hőkezelt (adott izotermára lehűtött) acél keménysége alapvetően a hőmérséklet függvénye. Azt a keménységet, amely az izotermikus hőntartáskor a teljes átalakulás befejeződése után lehűtött munkadarabra jellemző, izotermikus keménységnek szokás nevezni. Az izotermikus keménység a hőmérséklet függvényében mérésrel becsülhető, vagy izoterm C-görbét tartalmazó szakirodalmi forrásokból határozható meg. A lehűlési folyamat során a hőmérsékletváltozást numerikus módszerrel számítva, eredményül az idő függvényében szakaszonként konstans lépcsős függvényt kapunk, ahol a hőmérsékletlépcsők izotermák sorozatának tekinthetők. Ha az átalakulás az  $M_s$  hőmérséklet elérése előtt befejeződött, az ferritből, perlitből és esetleg bénitből álló  $y_{\text{FPB}} = y_1 + y_2 + y_3$  térfogathányadú szövetelemek eredő  $H_{\text{FPB}}$  keménysége

$$H_{\text{FPB}} = \frac{\left\{ \sum_{v=1}^{n_i} K(T_v) \cdot \Delta y_v \right\}}{y_{\text{FPB}}} \quad (5.50)$$

ahol  $T_v$  a lépcsős hőmérséklet függvény  $v$ -edik eleméhez tartozó hőmérséklet,  $n_i$  a lépcsők száma az  $M_s$  hőmérséklet elérésekor,  $K(T_v)$  a  $T_v$  hőmérsékletre rendelt izoterm keménység,  $\Delta y_v$  pedig a  $T_v$  hőmérsékletlépcsőn az átalakult térfogathányad.

Amennyiben az átalakulás az  $M_s$  hőmérsékleten nem fejeződött be, akkor a továbbiakban martenzit is képződik, következésképp az edzés utáni  $H_t$  eredő keménység a következő módon számítható

$$H_t = y_{\text{FPB}} \cdot H_{\text{FPB}} + y_4 \cdot H_m + y_5 \cdot H_a \quad (5.51)$$

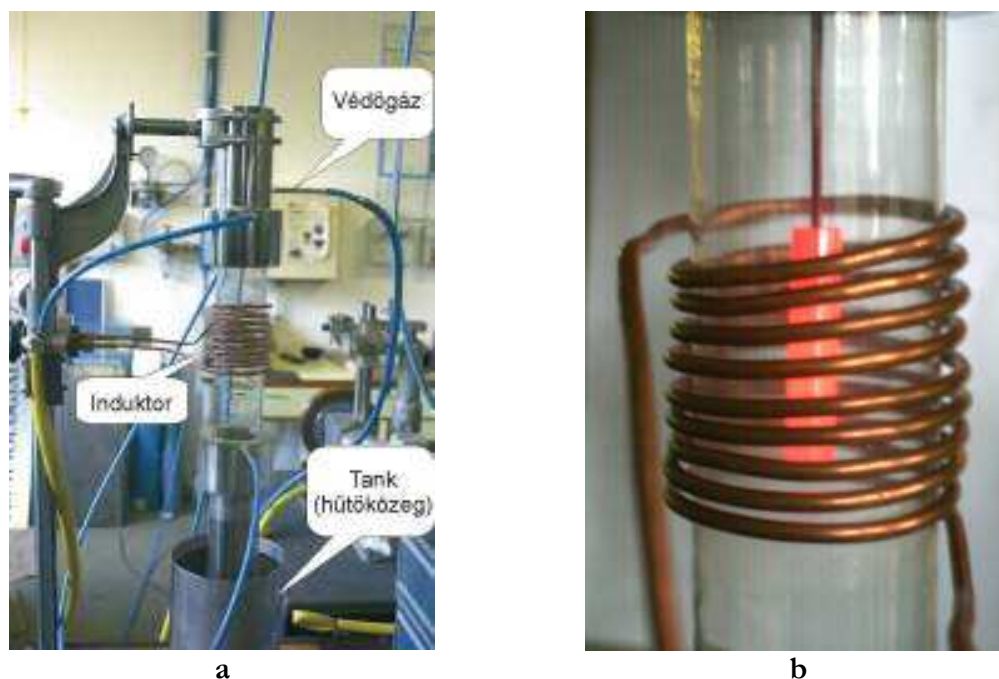
ahol  $y_5 = 1 - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)$  a maradék ausztenit mennyisége,  $H_a$  a maradék ausztenit keménysége,  $H_m$  a martenzit keménysége (amely végső soron a karbon tartalom által determinált). A (5.51) összefüggés valójában a heterogén mikroszerkezetű anyagok eredő keménységének számítására használatos ún. keverési szabály (rule of mixing) egyik lehetséges általánosításának tekinthető.

## 5.4 Az Inverz-Predikciós Egység validációja

A hűtőfolyadékok hűtési képességének kvantitatív értékelésére kifejlesztett eljárás az edzés eredményeként kialakult tulajdonságok alapján minősíti a hűtőközegeket. Az értékelési módszer „motorja” az Inverz-predikciós egység (IPE), mely a hőátadási együttható meghatározására és az annak figyelembevételével számított minősítő tulajdonságok előrejelzésére hivatott. Az IPE számítási-becslési pontossága végső soron a kidolgozott módszer alkalmazhatóságának záloga.

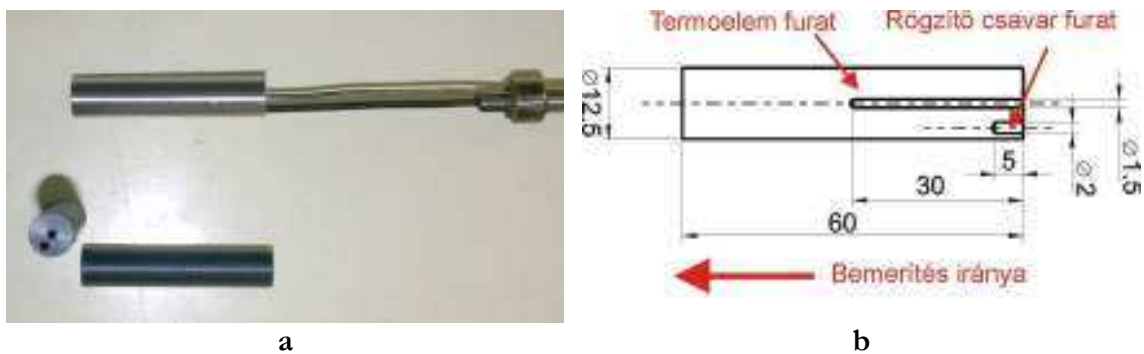
Mivel a számítási eredmények helyességét kizárólag a tapasztalat, a gyakorlat igazolhatja, az IPE számítási-becslési helyességét tesztelés révén ellenőrizni (és adott esetben korrigálni) szükséges. A validáció célja tehát az IPE kritikai vizsgálata, nevezetesen, a minősítés alapjául választott tulajdonság, esetünkben a keménység-eloszlás becslési pontosságának ellenőrzésére irányult.

A vizsgálataink három tevékenységre összpontosultak. Egyrészt, az IPE által a keménység-eloszlás predikciójára, mely adott hűlési görbék felhasználásával a felületi hőátadási együttható meghatározását, majd hőkezelési szimulációt, a keménység becslését foglalta magában. Másrészt ugyanazokban a vizsgált hűtőközegekben végzett valós edzési kísérletekre került sor. Végül a becsült és a hőkezelt munkadarabok keresztmetszetében kialakult keménység-eloszlást vetettük össze.



5.21. ábra A hőkezelési kísérletekhez alkalmazott berendezés (a) és a próbatest hevítés közben (b)

Az edzési kísérleteket a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetben fejlesztett célberendezésen végeztük, melyet a 5.21 ábra szemléltet. Az eszköz egy EMA típusú 30 kW legnagyobb teljesítményű és 4 kHz maximális frekvenciájú indukciós hevítőhöz kapcsolódik, mely a próbatestet redukáló atmoszférában ( $Ar_2$  gáz) hevíti. A hevítés számítógéppel szabályozott, a vezérlő program a munkadarabban elhelyezett termoelem(ek) jelének függvényében változtatja az induktor frekvenciáját, végső soron a hevítés sebességét. A legnagyobb hevítési sebességet 5 K/s-ra korlátoztuk, elkerülendő az esetleges túlságosan gyors hevítésből adódó inhomogén hőmérséklet eloszlás kialakulását. Az ausztenitesítési eljárás után a munkadarabot a vizsgált hűtőközeggel teli tankban (2000 ml) hűtöttük le.



5.22 ábra A kísérletekhez alkalmazott próbatest (a) és méretei (b)

A kísérletekhez az ISO 9950 szabvány szerinti 12.5 mm átmérőjű 60 mm magasságú hengeres munkadarabokat (5.22 ábra) használtunk, melyeket az eredetileg 20 mm átmérőjű kovácsolt rúdanyagból alakítottunk ki. A próbatest alapanyagának gyengén ötvözött, C45 minőségű acélt jelöltünk meg. A 680 °C-on, 1.5 óráig lágyított acél kémiai összetételét a 5.4. táblázat rögzíti. A választás azért esett a C45 minőségű acélra, mert a gyenge ötvözöttség miatt a hőelvonás karakterisztikája szignifikánsan mutatkozik meg a kialakult keresztmetszet menti keménységprofilban és így a folyadékok hőelvonó képessége hatékonyan értékelhető. A hűlési görbe felvételéhez ugyancsak az ISO 9950 által meghatározott anyagú, az 5.5 táblázat szerinti vegyi összetételű próbaestet (Inconel 600) alkalmaztuk.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,45	0,24	0,62	0,006	0,007	0,15	0,04	0,10

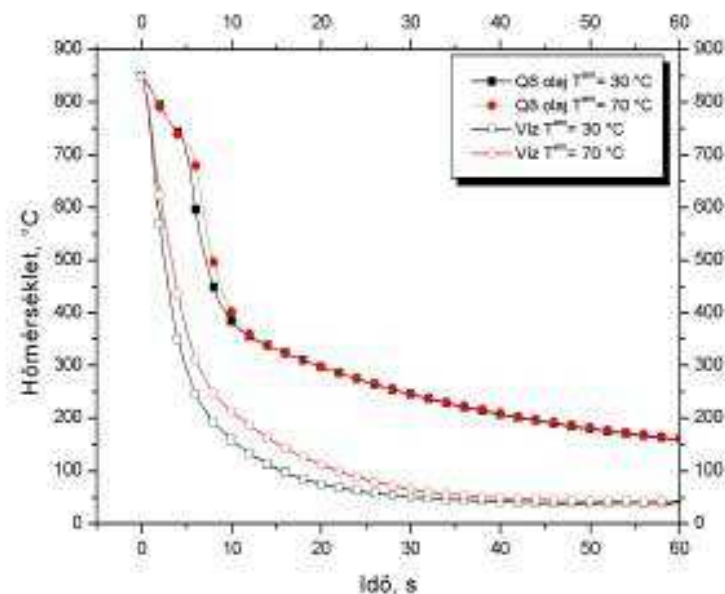
5.4. táblázat A C45 jelű acél kémiai összetétele

A munkadarabokat 850 °C-ra közel 5 perc alatt hevítettük fel, majd hőmérséklet-eloszlás, illetve az ausztenites szövet homogenizálása céljából további 5 percig ezen a hőmérsékleten tartottuk, majd a tankban lévő hűtőközeggel edzettük le.

C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Ti	Ni
0.08	0.47	0.21	0.16	0.13	15.51	0.21	8.33	0.23	74.79

5.5. táblázat Az Inconel600 ötvözet kémiai összetétele

A kísérletek során két különböző típusú, a kereskedelmi forgalomban lévő Q8 Bellini FN minőségű olajt és a csapvizet alkalmaztunk. A munkadarabokat 30 és 70 °C hőmérsékletű közegekben hőkezeltük. Először az Inconell 600 készített próbatesten végeztük el a lehűtési kísérletet, úgy hogy a lehűlési szakaszban rögzítettük a termoelem jelét. Ezt követően a C45 alapanyagú munkadarabot edzettük le ugyanabban a folyadékban, természetesen csak az után, hogy az ismét visszanyerte az előző mérésakor regisztrált hőmérsékletét.



5.23 ábra Az olaj és vízbázisú  $T^{am}=30\text{ °C}$  és  $T^{am}=70\text{ °C}$  hőmérsékletű közegekben felvett lehűlési görbék

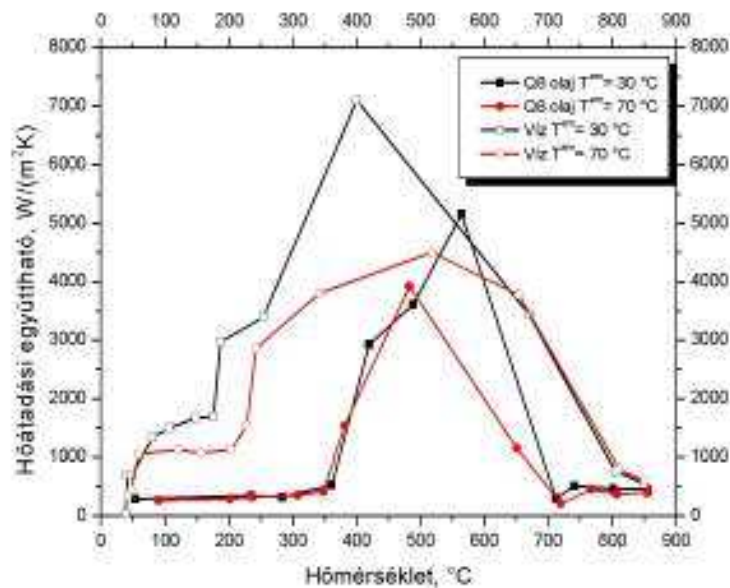
A kísérleteknél felvett lehűlési görbéket a 5.23 ábra, az inverz metodológia alapján számított hőátadási együtthatót, mint a felületi hőmérséklet függvényét az olaj és a vízbázisú közegekre a 5.24 ábra szemlélteti. A hőátadási együttható görbéket elemezve megfigyeléseinket az alábbiakban foglaljuk össze:

- Mindkét típusú közegnél a hőátadási együttható nagyobb globális szélsőértéke a kisebb hőmérsékletű közeg esetén adódik. Az olaj alapú közegre számított hőátadási együttható maximuma lényegesen alacsonyabb az azonos közegehőmérsékletű vízre jellemzőnél.
- Az olajnál a gőz és konvekciós fázisban tapasztalható hőelvonás mértéke a forrási szakaszéhoz képest szignifikánsan kisebb, melyet a folyadék hőmérséklete nem befolyásol. Az átmeneti hőmérsékletek ( $T_{vp}$  és  $T_{cp}$ ) az olaj hőmérsékletétől gyakorlatilag függetlenek (5.6 táblázat), a forrási szakasz tartománya 352-371 °C.
- A vízben kialakuló forrási szakasz hőmérséklettartománya lényegesen nagyobb az olajénál (608-636 °C). Víz esetén a gőzfátyol felszakadása az olajénál majd 100 °C-kal magasabb hőmérsékleten történik. A vízben való lehűtésnél a konvekciós szakasz kezdete között kb. 30 °C az eltérés.



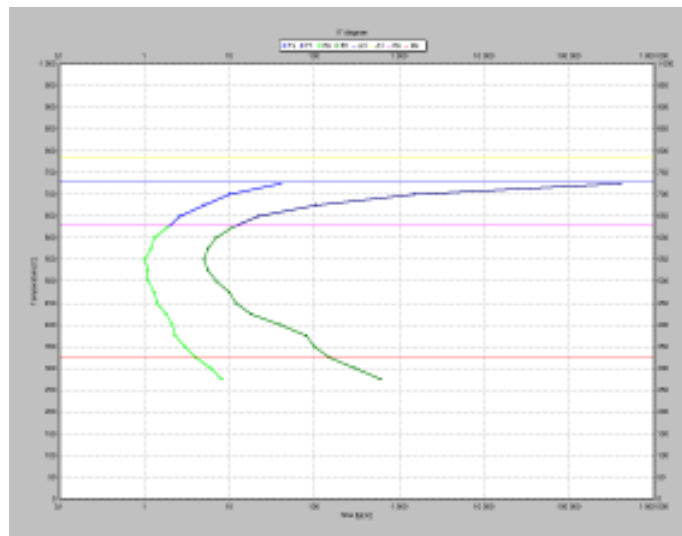
	$T_{vp}, ^\circ\text{C}$	$T_{cp}, ^\circ\text{C}$
Q8, $T^{am} = 30 ^\circ\text{C}$	712	360
Q8, $T^{am} = 70 ^\circ\text{C}$	719	348
Víz, $T^{am} = 30 ^\circ\text{C}$	804	168
Víz, $T^{am} = 70 ^\circ\text{C}$	811	203

5.6 táblázat A vizsgált hűtőközegek számított átmeneti hőmérsékletei

5.24 ábra Az  $T^{am}=30^\circ\text{C}$  és  $T^{am}=70^\circ\text{C}$  hőmérsékletű olaj és víz alapú közegre vonatkozó hőátadási együttható a hőmérséklet függvényében

A hűtőfolyadékba mártott próbatest hűlési sebessége arányos a közeg által, a hőátadási együtthatóval jellemzett abszorbeált hő mennyiségével. Nagyobb hűlési sebesség, gyorsabb lehűlés azoknál a közegeknél alakulhat ki, melyeknél szélesebb hőtartományban nagyobb a hőelvonás mértéke. Mindez összhangban van a hőátadási együtthatók karakterisztikájával (5.24 ábra), azaz a vizsgált közegeknél kisebb közeghőmérséklet mellett figyelhető meg gyorsabb hűlés (5.23 ábra) és az is nyilvánvaló, hogy a víz alapú közeg alkalmazásakor, melynél a forrási szakasz nagysága és mértéke nagyobb, a vízben hűtött próbatest hamarabb hűl le, mint az olajba merített.

A számított hőátadási együtthatók figyelembe vételével szimulációs kísérleteket végeztünk C45 acélminőségű, 12.5 mm átmérőjű hengeres próbatest edzésére vonatkozóan. A számításokhoz az 5.4 táblázat szerinti kémiai összetétel alapján kalkulált izotermális átalakulási diagramot (5.25 ábra) vettük alapul. Az alapanyagra jellemző, hőmérséklettől függő hővezetési együtthatót és fajhőt az 5.3 ábra szemlélteti. A virtuális hőkezelési kísérletek eredményeként keresztmetszetben kialakuló keménységeloszlást becsültük.



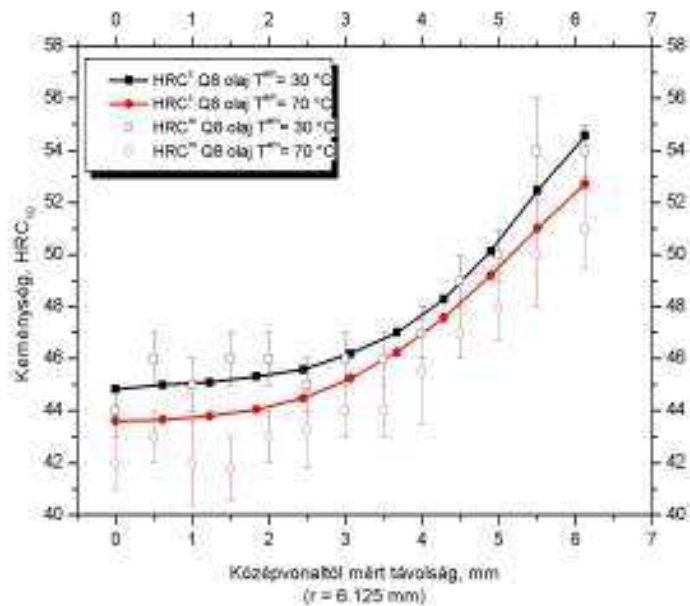
5.25 ábra Az 5.4 táblázat szerinti kémiai összetételű C45 acélminőségre jellemző számított izotermális átalakulási diagram

Mindegyik közegben, mindkét hőmérséklet mellett három-három, összesen tizenkettő db próbatestet hőkezeltünk. Az edzés után a munkadarabokat a szimmetriatengelyre merőleges irányban kettévágtuk, majd a középvonaltól mért távolság függvényében megmértük a keménységet. Az 5.26 – 5.27 ábra a kidolgozott módszer alapján becsült és a fizikai kísérletek során kialakult keménységeloszlást szemlélteti a középvonaltól mért távolság függvényében. E két ábrán a négy közegben edzett próbatestek keresztmetszetében 0.5 mm-es lépésekben felvett keménység szórását tüntettük fel.

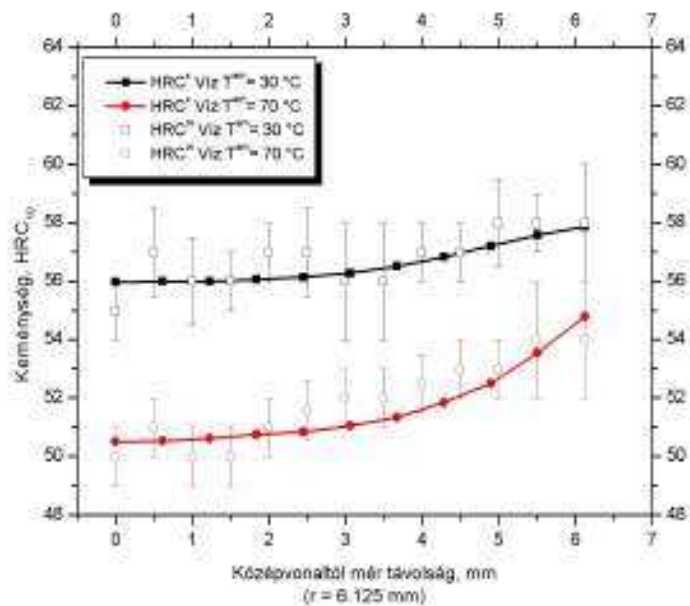
Az eredményeket tekintve a következő megállapításokra jutottunk:

- A számított keménység mind a négy esetben gyakorlatilag a teljes mérési tartományban a mért értékek szórásán belül marad.
- A különböző hőmérsékletű olajban hőkezelt darabok keménységtraverze között csekély eltérés mutatkozik, azonos helyen nagyobb keménység a kisebb hőmérsékletű közeg alkalmazásával adódott. Mindez az olaj közegek hőátadási függvényeit szemlélve, azok hasonló jellegével magyarázható. A szimmetriavonal és a felület keménysége között 10 HRC különbség figyelhető meg, mely arra utal, hogy míg a felület beedződött, addig a próbatest középvonalában diffúziós átalakulás is végbement. Ez a jelenség az olaj alapú hűtőfolyadékokra jellemző hőátadási karakterisztikából is következik, nevezetesen, hogy az ezekre a közegekre jellemző forrási szakasz viszonylag kis tartományban megy végbe, mely csak a felület környezetében okozza a döntő hányadában martenzites szövet kialakulásához szükséges lehűlési sebességet.
- A vízben edzett darabok keménysége csaknem egyenletesnek tekinthető, s az azonos helykoordinátához tartozó nagyobb keménységérték ebben az esetben is a  $T^{am}=30\text{ °C}$  esetén alakult ki. A víz közeg a keménység, mint minősítő tulajdonság tekintetében erősebbnek tekinthető, mint a vizsgált olaj, és alacsonyabb hőmérsékletű közeg alkalmazásával nagyobb keménység alakul ki. Mindezen megfigyelések a szakirodalmi forrásokkal összhangban vannak [4].

Az Inverz-predikciós egység számítási hatékonyságát fizikai kísérletekkel és szimulációs eljárással teszteltük. A vizsgálatok pozitív eredménnyel zárultak. Ezek az eredmények, úgy véljük, kielégítik az inverz számítás és a tulajdonság becslés pontosságával, illetve a módszer alkalmazhatóságával szemben támasztott szokásos elvárásokat.



5.26 ábra Az olajban edzett hengeres próbatest mért ( $HRC^m$ ) és számított ( $HRC^c$ ) keménysége a középvonaltól mért távolság függvényében



5.27 ábra Az vízben edzett hengeres próbatest mért ( $HRC^m$ ) és számított ( $HRC^c$ ) keménysége a középvonaltól mért távolság függvényében

## 6. Hűtőközegek hűtőképességének jellemzése a kidolgozott módszer alapján

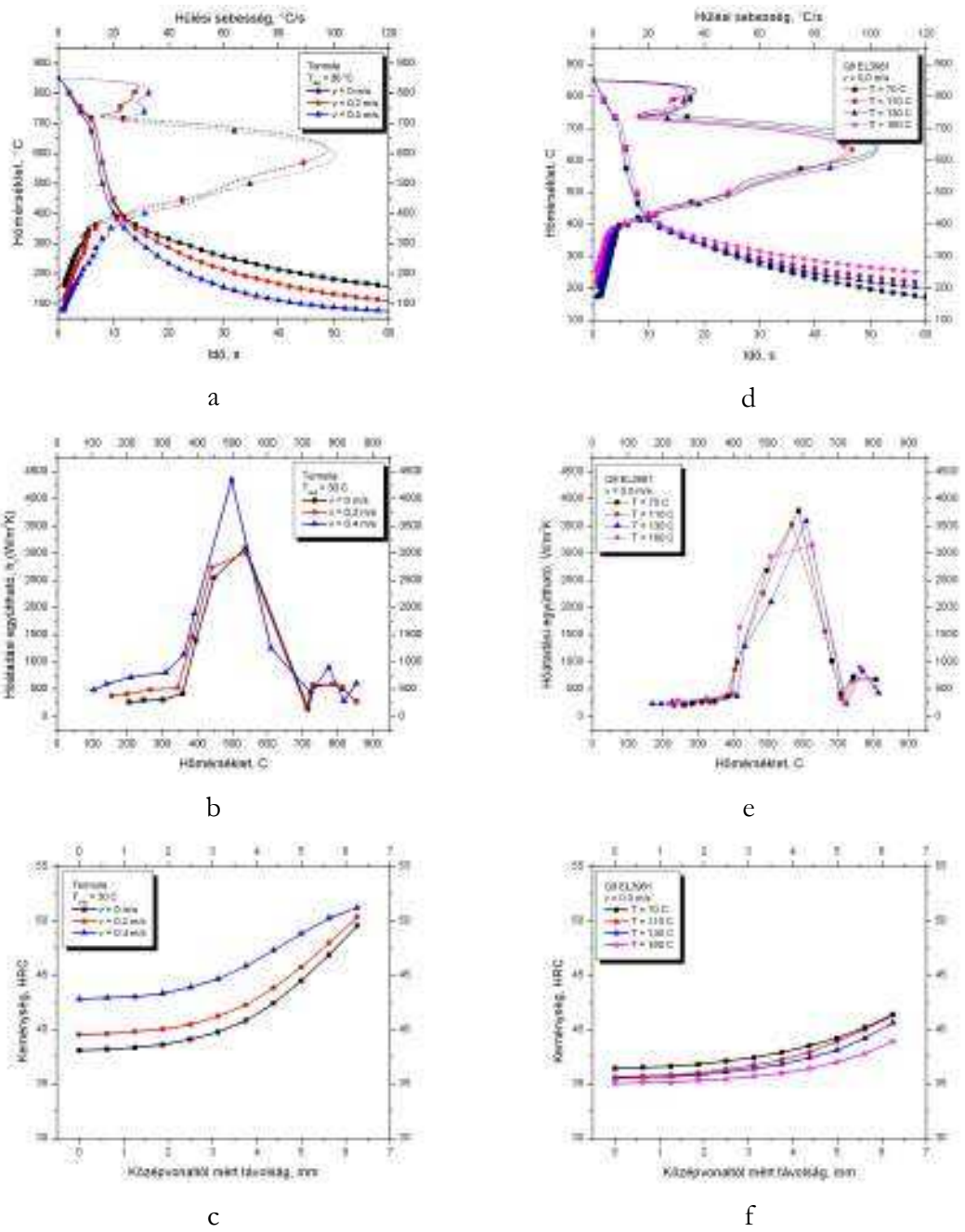
A kifejlesztett eljárás a hűtőközegek hűtési képességének vizsgálatára illetve jellemzésére két lehetőséget kínál: vagy a becsült tulajdonságok ( $P_j^{szim}$ ), vagy a generált minőségfüggvények (QF) alkalmazásával származtatott számszerű kritériumok alapján való minősítést. Az alábbiakban e két módszert alkalmazási példákon keresztül ismertetjük.

### 6.1 Hűtőközegek minősítése becsült tulajdonságok alapján

A 6.1 ábra két olaj alapú edzőfolyadék elemzésével kapcsolatos diagramokat szemlélteti. Vizsgálatainkhoz egyrészt egy nagy teljesítményű, Termola márkanevű olajban  $T^{am} = 30$  °C-on, különböző keringtetési sebesség ( $v=0, 0.2$  és  $0.4$  m/s) alkalmazásával végzett hűtés során meghatározott (mért) lehülési görbéket (6.1/a ábra), másrészt a hagyományos edzőolajok kategóriába sorolt Q8 EL3981 jelű, 4 különböző hőmérsékletű ( $T^{am} = 70, 110, 130, 160$  °C), statikus állapotú ( $v=0$  m/s) hűtőközegekben felvett lehülési görbéket (6.1/d ábra) használtuk fel.

A nagy teljesítményű olaj (Termola) hőátadási függvényeit szemlélve megállapítható, hogy a hőelvonás jellege a vizsgált hőmérsékleten  $v=0.2$  m/s keringtetési sebesség mellett csaknem azonos a statikus közegével. A keringtetés intenzitásának növelésével azonban a  $h_c(I)$  függvény karakterisztikája lényegesen megváltozik, maximuma a statikus közegénél csaknem 50 százalékkal nagyobb, forrási tartománya kiterjedtebb, azaz a gőzfilm nagyobb hőmérsékleten szakad le és a konvekciós fázis kisebb hőmérsékleten veszi kezdetét. A különböző folyadékáramoltatási sebesség mellett végbemenő eltérő hőátadás a próbatest keresztmetszetében számított keménységeloszlásban, mint választott előrejelzett tulajdonságban ( $P_j^{szim}$ ) is megmutatkozik. A keverés intenzitásának növelésével ugyanazon helyen nagyobb keménység adódik (6.1/c ábra). A felületen és a próbatest középvonalában a keménységkülönbség, azaz a keresztmetszetben a keménység-gradiens a keverési sebesség növelésével csökken. Más szóval, a keringtetés fokozása egy bizonyos mértéket elérve a keresztmetszet mentén egyenletesebb mechanikai tulajdonságok kialakulásához vezet. Ez utóbbi megfigyelés a szakirodalomban fellelhető ismereteket [4], mintegy számszerűen is igazolja.

Ezzel szemben, amennyiben a Q8 olajra vonatkozó ábrákat - az előző gondolatmenet szerint - elemezzük, arra következtethetünk, hogy a vizsgált hőmérséklettartományban a hűtőközeg hőmérséklete csak csekély mértékben befolyásolja a hőelvonást (6.1/e ábra), és ebből adódóan a kialakuló keménységeloszlás karakterisztikáját is. A keménység a próbatest középvonalától távolodva monoton növekszik, és azonos helykoordinátákat tekintve megállapítható, hogy a nagyobb keménységértéket a kisebb hőmérsékletű hűtőközeg esetében kapjuk. Ezek a megállapítások megfelelnek a hagyományos edzőolajok ipari alkalmazásánál szerzett tapasztalatoknak, melyeket szakirodalmi utalások [10] is alátámasztanak.



6.1 ábra A Termola és Q8 EL3981 közegben felvett lehűlési görbék (a,d), a származtatott hőátadási együtthatók a hőmérséklet függvényében (b,e) és a számított keménység a középvonaltól mért távolság függvényében (c,f)

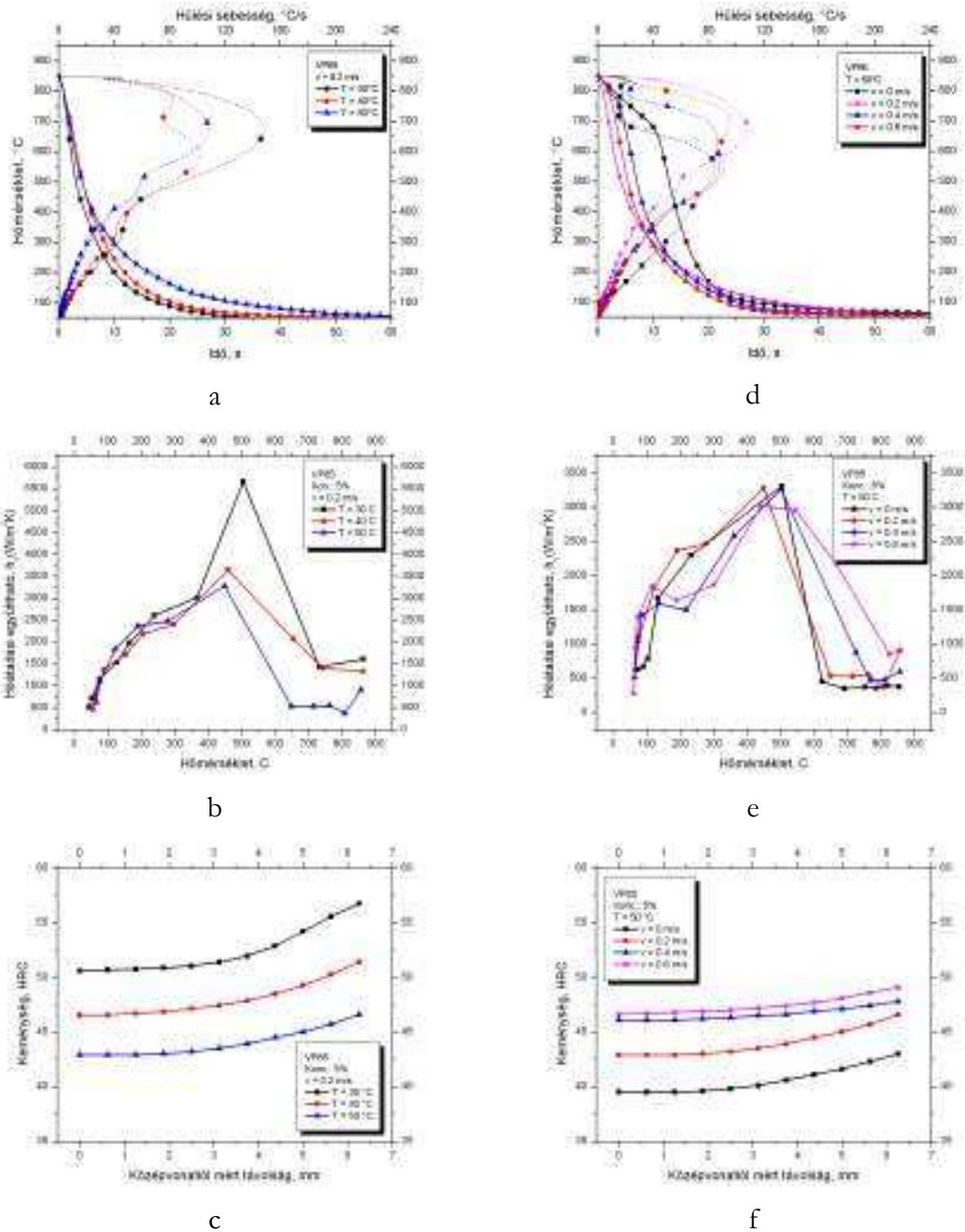
A továbbiakban vizsgálatainkat kiterjesztettük vízbázisú, polimer adalékos hűtőközegek vizsgálatára.

A Polyquench VP85 márkanévű, PVP polimer adalékos hűtőközegekre vonatkozó elemzések eredményeit a 6.2 ábra diagramjai reprezentálják. Az 5% polimer-koncentrációjú hűtőoldat vizsgálatához a  $v=0.2$  m/s áramoltatási sebesség mellett,  $T^{am} = 30, 40$  és  $50$  °C hőmérsékleten (6.2/a ábra), illetve a  $T^{am} = 50$  °C-os közegben különböző áramoltatási sebesség ( $v=0, 0.2, 0.4, 0.6$  m/s) esetén méréssel meghatározott (6.2/d ábra) lehülési görbék szolgáltak kiindulási alapul.

Az oldat hőelvonó képességét annak hőmérséklete (6.2/b ábra) erőteljesen befolyásolja, ez mindenképp előtt a hőátadási együttható görbék eltérő karakterisztikájában nyilvánul meg. A közeg hőmérsékletének növelésével a hőátadási együttható maximumértéke csökken: az 50 °C-os közeg maximális hőátadási tényezője mintegy fele a 30 °C-os folyadékban mért maximumértéknek. A Leidenfrost-hőmérsékletnek a folyadék hőmérséklettől való erős függése is szembevetendő, a gőzfilm 50 °C-os közegben kb. 100 °C-kal kisebb hőmérsékleten szakad fel, mint a kisebb hőmérsékletű (30 és 40 °C-os) közegek esetén. Az iménti megfigyelés Hilder [15] megállapításával analógnak tekinthető, nevezetesen, hogy az alacsony koncentráció mellett a „meleg” (jelen esetben 50 °C-os) PVP oldatokban a 300 °C-on mért lehülési sebesség drasztikusan csökken, a kisebb folyadék hőmérsékleteken mérthez képest közel harmadára esik vissza (3.4 ábra). A számított keménység görbéket vizsgálva kitűnik, hogy azonos mértékű folyadékáramlást feltételezve a kisebb hőmérsékletű közegben érhető el nagyobb keménység, mely a közeg hőmérsékletének növelésével – az adalék típusára és mennyiségére jellemző módon – kimutathatóan csökken.

A vizsgált polimer oldat hűtési teljesítményére – a 6.2/e ábra görbéi szerint – a keringtetési sebesség is jelentős hatást gyakorol. Az 50 °C-os folyadékok forrási szakaszát jellegzetesen változtatja az áramoltatás intenzitása,  $v=0.6$  m/s-nál a gőzfátyol gyakorlatilag a bemeletés után felszakad, míg a keringtetés mérséklésével egyre kisebb  $T_{vp}$  érték adódik. A hőátadási együttható görbék közel azonos hőmérsékleten érik el szélső értéküket és a maximumuk alatti hőmérséklet tartományban jellegük hasonló, azaz az áramlás intenzitásától kis mértékben függenek. A gőzfilm szakasz növekedése, azaz a Leidenfrost hőmérséklet csökkenése a hűlési sebesség csökkenését eredményezi, mely a közegbe merített test térfogatában diffúziós típusú (ferrit-perlites) átalakuláshoz, ezáltal a szilárdsági jellemzők, köztük a keménység csökkenéséhez vezet. Ez a jelenség az egyes áramoltatási sebességekhez tartozó keménység-traverzekén is nyomon követhető, a keresztmetszetben a  $v=0.6$  m/s sebesség mellett alakul ki a maximális keménység, mely az áramoltatás mérséklésével, azaz kisebb  $T_{vp}$  hőmérséklet esetén csökken.

A hűtőközegek hűtési képessége az edzési teljesítmény szempontjából a próbatest középvezetékében meghatározott „minősítő tulajdonság”, például a keménység alapján számszerűen jellemezhető. Ekkor a hűtőképesség, annak állapotát megszabó paraméterek (például a folyadék keringtetési sebessége, hőmérséklete, az adalékok aránya, szennyezettsége, stb) függvényében kvantitatív módon elemezhető. Az előző gondolatot folytatva, tehát joggal feltételezhető, hogy az a hűtőközeg tekinthető nagyobb teljesítményűnek, azaz annak az edzőfolyadéknak jobb a hűtőképessége, amelynek alkalmazásával a középvezetékben nagyobb keménység érhető el.



6.2 ábra Az 5%-os Polyquench VP85 polimer-oldatban felvett lehülési görbék (a,d), a származtatott hőátadási együtthatók a hőmérséklet függvényében (b,e) és a számított keménység a középvonaltól mért távolság függvényében (c,f)

E koncepció alapján készültek a 6.3 ábra diagramjai, melyek egy PVP (Polyquench VP85) és egy ACR (Feroquench2000) típusú oldatban hűtött hengeres próbatestek szimmetriatengelyben becsült „edzési” keménységét ábrázolják a polimer adalék koncentrációjának, a közeg hőmérsékletének és áramoltatás sebességének függvényében. A 6.3 ábra diagramjai nemcsak a grafikus megjelenítés vonatkozásában, de információtartalmukat tekintve is újszerűek a szakirodalomban, ugyanis lehetőséget nyújtanak arra, hogy a hűtőképességet befolyásoló 3 alapvető paraméter közötti kapcsolatot az ún. kompenzációs effektusok figyelembevételével analizáljuk. A 6.3 ábrán a keménységet az „a”-„d” diagramok 3D nézetben, míg a „b”-„e” és „c”-„f” diagramok az „Áramoltatási sebesség – Keménység”, illetve a „Közeghőmérséklet - Keménység” síkokra vetítve jelenítik meg. Az adatokat elemezve a következő megállapításokra jutottunk:

A középvonalban becsült keménység értékét az áramoltatási sebesség egyenes arányban, az adalék-koncentráció és a közeghőmérséklet nagysága fordított arányban változtatja. Mint kitűnik, a vizsgált három paraméter közül az oldat adalék-koncentrációjának van döntő szerepe. Nevezetesen, adott keringtetési sebesség és hőmérséklet mellett a polimer-adalék fajlagos mennyiségének növelésével az elérhető keménység – a görbék tanúsága szerint – szignifikáns módon csökken.

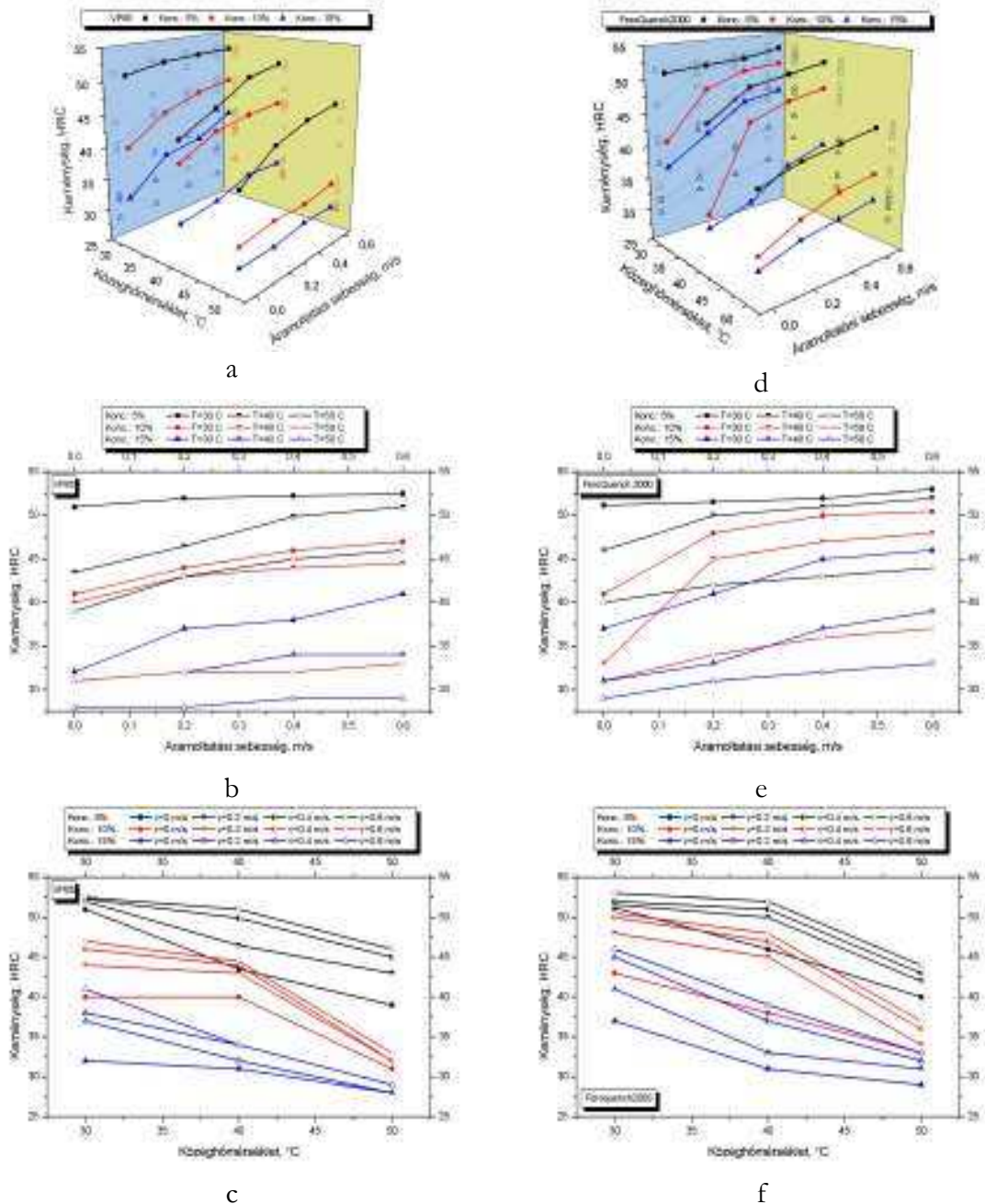
A keménységváltozás a keringtetés intenzitásnak fokozásával monoton növekedési trendet mutat (6.3/b és e ábrák). Külön figyelmet érdemel két szélsőséges eset. Egyrészt, az 5% adalékkoncentráció és alacsony hőmérséklet mellett – mindkét adalék esetében – a statikus és a nagy sebességgel áramoltatott folyadékban csaknem azonos keménység adódik. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a kis koncentrációjú folyadék széles intervallumú forrási szakasza olyan jelentős nagyságú lehűlési sebességet biztosít, mely csaknem teljes mértékben martenzites szövet, így nagy keménység kialakulását eredményezi. Másrészt, a 15% koncentrációjú, nagy hőmérsékletű hűtőközegekben végzett edzés elsődlegesen a magas adalék tartalom miatt még nagy keringtetési sebesség mellett is a diffúziós típusú átalakulásoknak, gyenge szilárdsági tulajdonságok létrejöttének kedvez. A vizsgált paramétertartomány szélső határait (a szokásos 5% és 15% adalékkoncentrációt) tekintve ezért a közeg mesterséges áramoltatásának nincs különösebb hatása, illetve értelme.

Az edzési teljesítmény a közeghőmérséklet növelésével mindkét hűtőfolyadék típus esetében drasztikusan mérséklődik (6.3/c és f ábrák). A közeg hőmérsékletének 20 °C-al való növelése (azaz 30 °C-ról 50 °C-ra való növelése) óhatatlanul együtt jár a keménység intenzív csökkenésével.

A vizsgálatokból adódó gyakorlati fontosságú felismerés, hogy azonos „hűtési teljesítmény” különböző paraméter-kombinációkkal is elérhető. Ennek alapját az ún. kompenzációs jelenség képezi, amelyet a 6.3/a és 6.3/d ábrák diagramjai szemléletesen is alátámasztanak. Azonos értékű (például 45 HRC) keménység elérése a hűtőközeg állapotát befolyásoló paraméterek eltérő kombinációival is megvalósítható (6.3/b,e és c,f diagramok). A VP85 közegben például 45 Rockwell keménység eléréséhez 5 és 10%-os, 30 – 50 °C hőmérsékletű oldatot is használhatunk, a hozzá célszerűen beállított áramoltatással. Ehhez hasonlóan, a Feroquench 2000 edzőfolyadékot alkalmazva az 5-15 % adalékkoncentrációhoz a 30-40 °C közeghőmérséklet is választhatjuk. A becsült adatok arra utalnak, hogy e paraméter-kombinációk az edzés eredményként adódó tulajdonságok



szempontjából „ekvivalensek”. Hasonló jelenség a hőkezelési gyakorlatban is ismert, edzett acélok megeresztésekor az idő és hőmérséklet hatását egyenértékű paraméterekkel szokás jellemezni (pl. Hollomon-Jaffe paraméter alkalmazásával).



6.3 ábra A Polyquench VP85 (a,b,c) és a FeroQuench2000 (d,e,f) polimer-oldatban edzett, 12.5 mm átmérőjű, C45 minőségűből készített hengeres próbatest középvezetékben becsült keménység a hűtőközeg koncentrációjának, hőmérsékletének és áramoltatási sebességének függvényében

Az imént felsorolt példákkal azt kívántuk igazolni, hogy a kidolgozott minősítő eljárás [84,85] az edzőfolyadékok állapotát, a hűtőképességet és az edzési teljesítményt befolyásoló tényezők hatását valós fizikai mennyiségekkel számszerűen képes jellemezni, összhangban az ipari gyakorlatban felhalmozott tapasztalatokkal és szakirodalmi eredményekkel [4,6,14,15].

## 6.2 Hűtőközegek minősítése minőségfüggvények alkalmazásával

Egy másik lehetséges módszer hűtőközegek hűtőképességeinek kvantitatív jellegű minősítésére az ún. minőségfüggvények alkalmazása. Ennek koncepciója ugyancsak a lehülési görbék vizsgálatára épül, de a minősítő módszer alapját döntően a mérési adatok matematikai statisztikai módszerekkel való elemzése képezi, különös tekintettel a regresszióanalízissel meghatározott empirikus formulákra [85-88].

Az edzőközegek számszerű értékeléséhez „minősítő tulajdonságként” a C45 acélból készített (5.4. táblázat szerinti vegyi összetételű), 12.5 mm átmérőjű, henger-szimmetrikus munkadarab középvonalaiban becsült martenzit hányadot és a Rockwell keménységet – mint az edzés eredményességét (hatékonyságát) jellemző mennyiséget – definiáltuk. Olyan minőségfüggvények (QF) előállítását tűztük ki célul, melyek e két prognosztizált tulajdonság és az ISO 9950 eljárással meghatározott lehülési diagramok, illetve hűlési sebesség függvények karakterisztikus pontjai közötti sztochasztikus kapcsolatot szignifikáns módon reprezentálják. A továbbiakban a minőségfüggvények előállításának egyik lehetséges módszerét részletezzük.

A vizsgálatokhoz kiindulásul összesen 204 hűlési görbét használtunk fel, melyek meghatározására különböző típusú olaj és polimer alapú közegekben, adott hőmérsékleten és keverési sebesség mellett került sor (6.1 táblázat). A méréseket a göteborgi székhelyű IVF (Industriforskning och utveckling AB) kutatóintézetben végeztem. A mérési adataim az (a közegek típusára és a hűtés körülményeire vonatkozóan) megfelelően reprezentatív mintának tekinthető a fejlett ipari országokban (és hazánkban) beszerezhető, napjainkban hőkezeléshez használatos hűtőközegeket illetően.

A vizsgálatok első lépéseként minden egyes hőmérsékletciklushoz meghatároztuk a lehülés során végbemenő hőtadást leíró  $h_c(T)$  hőtadási együttható függvényt a korábban vázolt inverz-predikciós eljárással, majd ennek felhasználásával szimulációval becsültük a próbatest középvonalaiban kialakuló keménységet és martenzit mennyiséget. Második lépésben előállítottuk a lehülési görbék, és a  $h_c(T)$  függvény adataiból azok karakterisztikáját jellemző  $\mathbf{R}$  vektort (5.4 ábra 4. modul). (Hangsúlyozni kell, hogy az  $\mathbf{R}$  vektor komponensei a lehülési görbék és a lehülési sebességfüggvény jellegzetes pontjait, ezek koordinátáit jellemző mennyiségek.)

A mért hőciklusok elemzésekor a szabványokban (4. fejezet) előírt paramétereken kívül meghatároztuk a 850 – 250 °C tartományban 25 °C-ként az adott hőmérsékletre tartozó lehülési időket és lehülési sebességeket, a  $t(T_0-T_1)$  mennyiséget, azaz a  $T_0$  és  $T_1$

hőmérsékletekre való lehűlési idő különbségét, valamint a  $T_0 - T_1$  hőmérsékletintervallumra vonatkozó  $CR(T_0-T_1)$  átlagos lehűlési sebességet.

Elnevezés	Gyártó	Típus	Hőmérséklet, °C	Koncentráció, %	Keverési sebesség, m/s	Mérések száma, db
<b>Q8 EL3981</b>	Kuwait Oil,	Olaj <sup>1</sup>	70, 100, 140		0, 0.2, 0.4, 0.6	12
<b>Houghtoquench</b>	Houghton Int.	Olaj <sup>1</sup>	40, 70, 120		0, 0.2, 0.4, 0.6	12
<b>Marquench 722</b>	Houghton Int.	Olaj <sup>2</sup>	40, 70, 120		0, 0.2, 0.4, 0.6	12
<b>Termola</b>	Texaco	Olaj <sup>2</sup>	30, 70		0, 0.2, 0.4	6
<b>Quenchway 22</b>	Statolaj Norge AS	Olaj <sup>3</sup>	40, 70		0, 0.2, 0.4	6
<b>Durixol W72</b>	Burgdorf Gmbh	Olaj <sup>1</sup>	40, 70		0, 0.2, 0.4	6
<b>Isorapid</b>	Petrofer Gmbh	Olaj <sup>1</sup>	40, 70		0, 0.2, 0.4	6
<b>Polyquench VP85</b>	Burgdorf Gmbh	PVP	30, 40, 50	5, 10, 15	0, 0.2, 0.4, 0.6	36
<b>Feroquench 2000</b>	Petrofer Gmbh	ACR	30, 40, 50	5, 10, 15	0, 0.2, 0.4, 0.6	36
<b>Aquaquench 3600</b>	Houghton Int.	PAG	30, 40, 50	5, 10, 15	0, 0.2, 0.4, 0.6	36
<b>Aquaquench 251</b>	Houghton Int.	PAG	30, 40, 50	5, 10, 15	0, 0.2, 0.4, 0.6	36
				<b>összesen</b>		<b>204</b>

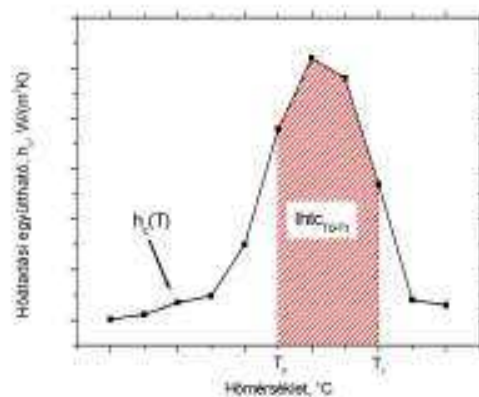
<sup>1</sup>Hagyományos olaj    <sup>2</sup>Nagy teljesítményű olaj    <sup>3</sup>Magas hőmérsékletű olaj

#### 6.1 táblázat A minőségfüggvények előállításához felhasznált hűtőközegek

A hőtadási függvény felhasználásával egy új számszerű jellemzőt vezetünk be: az adott  $T_0 - T_1$  hőmérséklet tartományra vonatkozó, a  $h_c(T)$  függvény határozott integráljaként (6.1) összefüggéssel definiált  $I_{h_{TC_{T_0-T_1}}}$  mennyiséget.

$$I_{h_{TC_{T_0-T_1}}} = \int_{T_0}^{T_1} h_c(T) dT \quad (6.1)$$

E paraméternek fizikai tartalma is tulajdonítható, ugyanis  $I_{h_{TC_{T_0-T_1}}}$  arányos az  $T_0 - T_1$  tartományban abszorbeált hő mennyiségével (6.5 ábra). Az  $I_{h_{TC_{T_0-T_1}}}$  integrált a 850 – 250 °C skálán 25 °C-os lépcsőkben, a  $T_0$  és  $T_1$  integrálási határhőmérsékletek célszerű változtatása mellett számítottuk. Az **R** vektor – különböző kombinációk figyelembe vételével – származtatott komponenseit a 6.2 táblázat összesíti.



6.5 ábra Az  $I_{h_{TC_{T_0-T_1}}}$  paraméter számításának módszere

A lehülési görbékből származtatott paraméterek és a becsült minősítő tulajdonságok közötti kapcsolat felderítése érdekében a generált adathalmazon korrelációanalízist végeztünk, melyhez az *MS Excell* szoftvert használtuk. A vizsgálat eredményeként nyert három legnagyobb korrelációs együttható ( $r^{\text{kor}}$ ) az 500 és 400 °C-ra való lehülési idő különbségét jelző  $t_{500-400}$  mérőszám, az ugyancsak 500 és 400 °C közötti átlagos hűlési sebesség, azaz a  $CR_{500-400}$ , valamint a 600-400 °C tartományban integrált hűtadási együttható ( $I_{htc_{600-400}}$ ) esetén adódott (6.3 táblázat).

A predikcióval becsült minősítő tulajdonságok (martenzit hányad, keménység) és a fent említett három paraméter matematikai kapcsolatát regresszió-analízissel előállított formulákkal írtuk le. A regressziós számításokhoz a *Microcal Origin 6.0* szoftver nem-lineáris függvényillesztő modulját használtuk. A keménység, valamint a martenzithányad és a  $t_{500-400}$  mérőszám között lineáris, míg  $CR_{500-400}$ , illetve a  $I_{htc_{600-400}}$  paraméterek esetén az exponenciális jellegű függvénykapcsolat eredményezte a legnagyobb regressziós tényezőt ( $R$ ). Az így generált minőségfüggvények paramétereit a 6.4 táblázatban összesítettük. A 6.6 ábra a lehülési görbékből számított három paraméter függvényében a minősítő tulajdonságokat és magukat a minőségfüggvényeket szemlélteti. Az analízis eredménye – figyelembe véve a regressziós tényezők viszonylag magas értékeit -, kielégíti a statisztikai módszerek segítségével generált függvényillesztés pontosságával támasztott szokásos elvárásokat.

Jelölés	Mértékegység	db	Paraméter jelentése
$T_{vp}$	°C	1	A gőz és forrási szakasz közötti látszólagos átmeneti hőmérséklet
$T_{cp}$	°C	1	A forrási és konvekciós szakasz közötti látszólagos átmeneti hőmérséklet
CRmax	°C/s	1	A lehülési sebesség maximuma
$T(\text{CRmax})$	°C	1	A hűlési sebesség maximumához tartozó hőmérséklet
$t(\text{CRmax})$	s	1	A hűlési sebesség maximumához tartozó idő
$t_{600}$	s	1	A lehülési idő 600 °C-ig
$t_{400}$	s	1	A lehülési idő 400 °C-ig
$t_{200}$	s	1	A lehülési idő 200 °C-ig
HP <sub>olaj</sub>		1	Edzési teljesítmény (Segeberg [45])
HP <sub>castrol</sub>		1	Edzési teljesítmény (Deck [48])
$t(T)$	s	15	A lehülési idő az adott hőmérsékletre a 850 – 250 °C tartományban, 25 °C-os lépcsőkben
$t(T_0-T_1)$	s	15	A $T_0-T_1$ hőmérsékletekre való lehülési idők különbsége a 850 – 250 °C tartományban, 25 °C-os lépcsőkben
CR(T)	°C/s	15	Az adott hőmérsékletnél kialakuló hűlési sebesség, a 850 – 250 °C tartományban, 25 °C-os lépcsőkben
CR( $T_0-T_1$ )	°C/s	15	Az $T_0-T_1$ hőmérsékletek közötti átlagos hűlési sebesség, a 850 – 250 °C tartományban, 25 °C-os lépcsőkben
$I_{htc_{T_0-T_1}}$		30	A $h_c(T)$ függvény $T_0 - T_1$ hőmérsékletek közötti integrálja, a 850 – 250 °C skálán 25 °C-os lépcsőkben, $T_0-T_1 = 100$ és 200 °C mellett
<b>összesen</b>		<b>100</b>	

6.2 táblázat A lehülési görbékből származtatott paraméterek,  $\mathbf{R}$  vektor komponensei

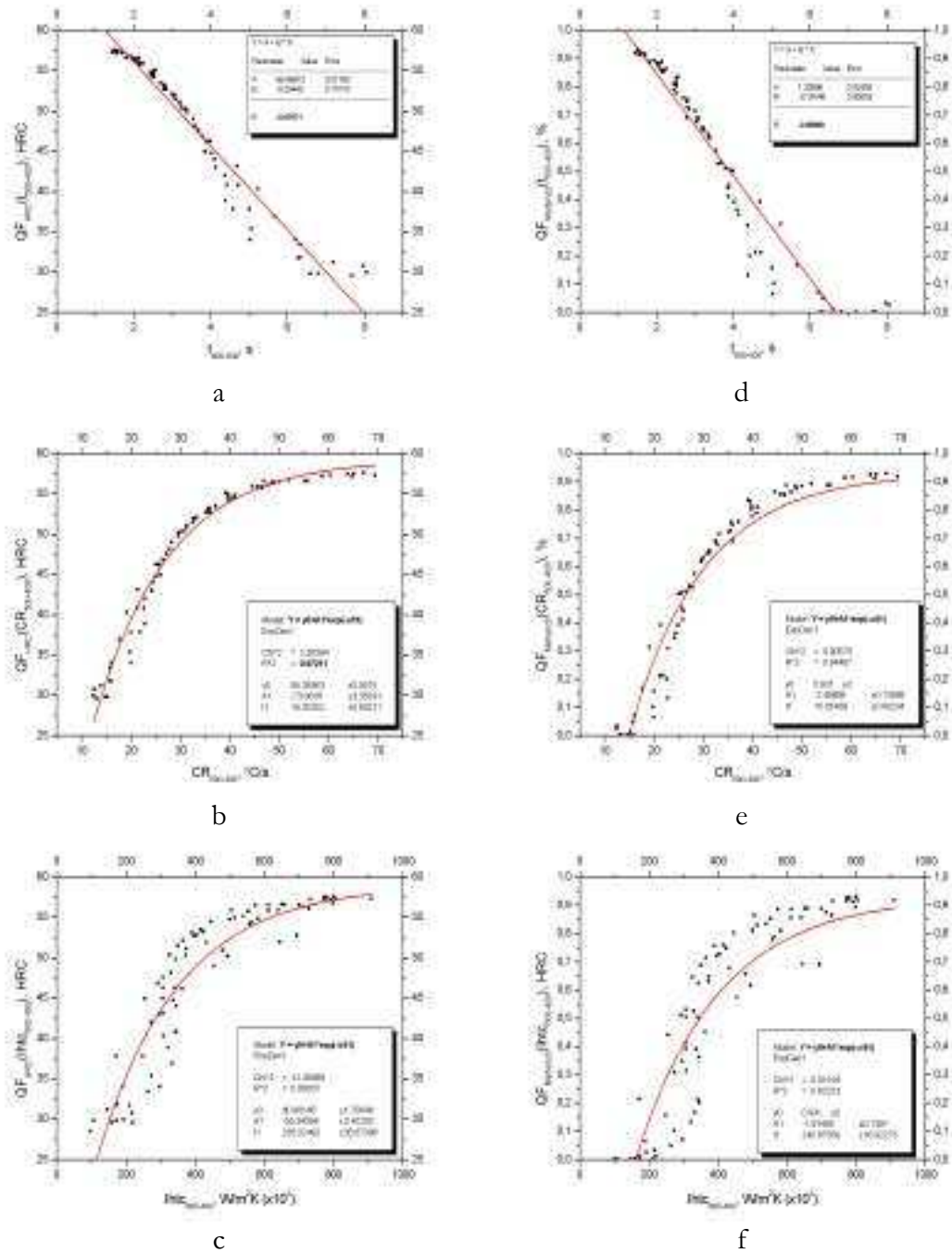
Jelölés	Korrelációs együttható, $r^{kor}$	Paraméter jelentése
$t_{500-400}$	0.8414	Az 500 és 400 °C hőmérsékletekre való lehűlési idők különbsége
$CR_{500-400}$	0.8175	Az 500 és 400 °C hőmérsékletek közötti átlagos hűlési sebesség,
$I_{htc600-400}$	0.7889	A $h_c(T)$ függvény 500 és 400 °C hőmérsékletek közötti integrálja

6.3 táblázat A korrelációanalízis eredményeként kiválasztott három, legnagyobb korrelációs együtthatójú paraméter

Minőségfüggvény	Számítási adatok
$Q_{F_{HRC}}(t_{500-400}) = C_{Time1} + C_{Time2} * t_{500-400}$	$C_{Time1} = 66.49572$ $C_{Time2} = -5.20442$ $R = -0.97671$
$Q_{F_{MARTENZIT}}(t_{500-400}) = C_{Time1} + C_{Time2} * t_{500-400}$	$C_{Time1} = 1.20906$ $C_{Time2} = -0.180148$ $R = -0.95868$
$Q_{F_{HRC}}(CR_{500-400}) = C_{CR1} + C_{CR2} * \exp(-CR_{500-400} / C_{CR3})$	$C_{CR1} = 59.35963$ $C_{CR2} = -73.9616$ $C_{CR3} = 15.20202$ $R = 0.9859$
$Q_{F_{MARTENZIT}}(CR_{500-400}) = C_{CR1} + C_{CR2} * \exp(-CR_{500-400} / C_{CR3})$	$C_{CR1} = 0.931$ $C_{CR2} = -2.49698$ $C_{CR3} = 15.05438$ $R = 0.9715$
$Q_{F_{HRC}}(I_{htc600-400}) = C_{HTC1} + C_{HTC2} * \exp(-I_{htc600-400} / C_{HTC3})$	$C_{HTC1} = 60.88145$ $C_{HTC2} = -54.09741$ $C_{HTC3} = 267.35781$ $R = 0.9275$
$Q_{F_{MARTENZIT}}(I_{htc600-400}) = C_{HTC1} + C_{HTC2} * \exp(-I_{htc600-400} / C_{HTC3})$	$C_{HTC1} = 0.931$ $C_{HTC2} = -1.81456$ $C_{HTC3} = 240.67559$ $R = 0.9067$

6.4 táblázat A regresszióanalízis eredményeként meghatározott minőségfüggvények, paramétereik és a számított regressziós tényezők (R)

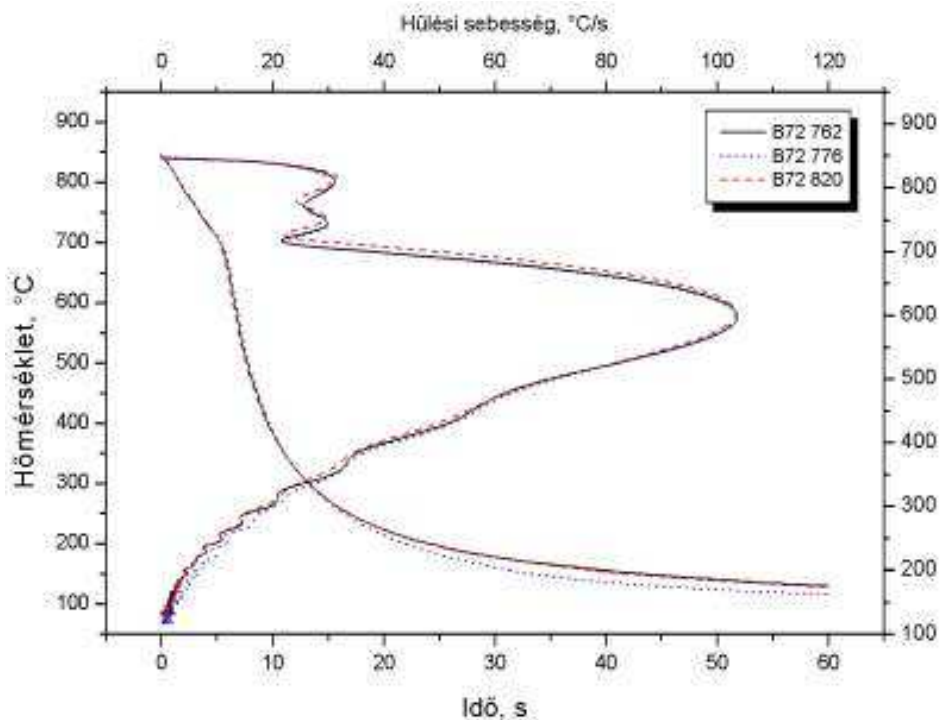
A gyakorlati felhasználást tekintve a minőségfüggvény alkalmazásának előnye elsősorban abban mutatkozik meg, hogy a standard mérési módszerrel felvett hűlési görbék adataiból, vagy az azokból származtatott hőátadási együttható függvényekből közvetlenül előállítható a hűtőközegek edzési teljesítményének jellemzésére alkalmas – adott esetben a keménységet vagy a martenzit tartalmat kifejező – mérőszám.



6.6 ábra A hengeres próbatest középvezetési irányában számított keménység és martenzithányad az 500-400 °C-ra való lehűlés időkülönbségének (a,d), az 500 és 400 °C hőmérsékletek közötti átlagos hűlési sebesség (b,e) és a hőtadási együttható 600-400 °C tartományban vett integráljának függvényében (c,f)

A kifejlesztett módszer alkalmazhatóságát végül egy gyakorlati példán keresztül mutatjuk be. A javasolt új módszer hatékonyságát oly módon demonstráljuk, hogy a két legelterjedtebb - a hűlési görbe-elemzésen alapuló - minősítő eljárással hasonlítjuk össze. A 6.7 ábrán a Burgdorf GmbH által gyártott W72 edzőolaj minősítéséhez egymást követően felvett hűlési görbék, azaz ugyanazon,  $T^{\text{am}} = 30 \text{ °C}$  hőmérsékletű hűtőközre vonatkozóan háromszor megismételt (párhuzamos) mérés eredményei láthatóak. Mind a lehűlési mind, pedig a lehűlési sebesség görbéket elemezve megállapítható: ezek karakterisztikája lényegében azonos, a várakozásnak megfelelően a repetitív módon regisztrált görbék csaknem a teljes lehűlési szakaszban „fedik” egymást. A lehűlési görbékből származtatott jellemző paramétereket, illetve az ipari gyakorlatban leggyakrabban használt két hűtőközeg-minősítő mennyiséget, a  $HP_{\text{olaj}}$  (4.2), illetve a  $HP_{\text{Castrol}}$  (4.4) a 6.5 táblázat tartalmazza.

A korrekt analízis érdekében kiszámítottuk a az egyes paraméterek átlagértékét ( $\mu$ ), szórását ( $S$ ) és relatív szórását ( $S_R(\%)=100 S/\mu$ ). Annak ellenére, hogy a mérések gyakorlatilag azonos közegre, azonos körülményekre érvényes lehűtést reprezentálnak, a  $HP$  értékekre (lásd. 4. fejezet) kapott eredmények szignifikáns eltérést mutatnak. A számított  $HP$  mennyiségek nagymértékű relatív szórása ( $S_R$  értéke) arra az okra vezethető vissza, hogy a forrási és a konvekciós szakaszt elválasztó látszólagos hőmérsékletnek ( $T_{\text{cp}}^{\text{v}}$ ) és a  $400 \text{ °C}$ -on kialakuló hűlési sebességnek a szokásos, grafikus módszerrel való meghatározása [45] meglehetősen bizonytalan, márpedig a  $T_{\text{cp}}^{\text{v}}$  és a  $CR_{400}$  paraméterek értéke a  $HP$  számítására alkalmazott képletekben (azaz 4.2 és 4.4) egyenletekben) meglehetősen nagy súllyal (együtthatóval) szerepelnek.



6.7 ábra A B72 edzőolaj elemzésénél alkalmazott, megismételt mérések lehűlési görbéi

	$CR_{max}, °C/s$	$T_{vp}, °C$	$T_{cp}, °C$	$CR_{400}, °C/s$	$HP_{olaj}$	$HP_{castrol}$
<b>B72 762</b>	103,34	718	316	41	851	53
<b>B72 776</b>	103,20	716	251	42	1096	64
<b>B72 820</b>	103,39	727	284	37	972	58
<b>Átlag, <math>\mu</math></b>	103,31	720,3	283,7	40,0	973,0	58,3
<b>Szórás, S</b>	0,098	5,86	32,5	2,67	122,5	5,51
<b>Relatív szórás <math>S_R(\%)=100S/\mu</math></b>	0,095	0,813	11,46	6,61	12,59	9,44

6.5 táblázat A B72 olajban felvett lehülési görbék karakterisztikus adatai valamint a számított  $HP_{olaj}$  és  $HP_{castrol}$  paraméterek

	$t_{500-400}, s$	$CR_{500-400}, °C/s$	$Ihtc_{600-400}, W/m^2K$	$QF_{HRC}(t_{500-400})$	$QF_{HRC}(CR_{500-400})$	$QF_{HRC}(Ihtc_{600-400})$
<b>B72 762</b>	1,85	54,57	732	56,89	57,317	57,393
<b>B72 776</b>	1,81	55,44	728	57,09	57,431	57,471
<b>B72 820</b>	1,88	53,83	732	56,70	57,215	57,260
<b>Átlag, <math>\mu</math></b>	1,85	54,61	730,7	56,89	57,321	57,375
<b>Szórás, S</b>	0,035	0,806	2,31	0,195	0,108	0,107
<b>Relatív szórás <math>S_R(\%)</math></b>	1,90	1,476	0,316	0,343	0,189	0,186

6.6 táblázat A B72 olajban felvett hűlési görbék értékelése a származtatott minőségfüggvények alkalmazásával

Ezzel szemben a mérési adatok alapján kalkulált, általunk definiált új minőségfüggvények értékeiben (6.6 táblázat) csak csekély mértékű eltérés, azaz kis mérvű szórás tapasztalható, ami kielégíti a párhuzamos mérések eredményivel szemben támasztott jogos elvárásokat.

E vizsgálatok alapján arra következtethetünk, hogy a kifejlesztett új módszerrel származtatott minőségfüggvények alkalmazásával a hűtőközegek hűtőképességének minősítése a hagyományos eljárásoknál jóval pontosabban, megbízhatóbban végezhető [89].



## 7. Összefoglalás

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

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, feltételezésünk azon alapul, hogy azonos geometria, 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 szerint mért hűtőfolyadék felületi hőátadását leíró Fourier egyenlethez tartozó harmadfajú peremfeltétel azonos a hengeres próbatest anyagául szolgáló nikkel bázisú ötvözetre és a vizsgálatinkban 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 meghatározására hivatott, 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 értékelhető, minősíthető.

A hőátadási együttható predikciója és a hűlési görbe elemzése során származtatott paraméterek becslési pontossága döntően függ a mért lehülési görbe „zajosságának” mértékétől. A hűlési görbe zajszűrésére újszerű, a Fourier-analízisre épülő jelsimító és kódoló algoritmust dolgoztunk ki. A javasolt eljárás sajátossága, hogy lehetőséget nyújt a görbék véges (célszerűen korlátozott) számú paraméterrel való leírására, a görbék archiválását megkönnyítő nagyfokú adattömörítésére (adatbázisban való tárolására) és a mért jel mintavételi frekvenciájától és terjedelmétől független, egységes formában történő kezelésére.

A Fourier-analízisre alapozott új módszer hatékonyságát és alkalmazásával járó előnyöket - összehasonlító elemzést végezve a mérnöki gyakorlatban elterjedten használatos két másik simító eljárással – példákkal, számítási eredményekkel is demonstráltuk.

Végtelen hosszúságú, tengely szimmetrikus próbatestet és harmadfajú peremfeltétel mellett megvalósuló radiális irányú hőközlést feltételezve, az inverz algoritmusra alapozott

szoftvert készítettünk, 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 teszteltük, és összehasonlítva a mért lehülési görbék közötti eltérést igazoltuk a javasolt módszer megbízhatóságát, hatékonyságát.

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

Az IPE számítási pontosságának ellenőrzése céljából validációs kísérleteket végeztünk. A kísérletek során különböző hőmérsékletű, olaj és vízbázisú folyadékokban hűlési görbéket vettünk fel, illetve C45 acélminőségből készített próbatesteket hőkezeltünk. Az edzés során kialakult és a számított keménység-eloszlást vetettük össze. A validációs kísérletek eredményei az IPE alkalmazhatóságát támasztották alá és a hűtőképesség jellemzésére kidolgozott módszer alap gondolatául szolgáló hipotéziseket, mintegy közvetett módon igazolták.

A kifejlesztett eljárás a hűtőközegek hűtési képességének minősítésére két lehetőséget kínál: a becsült tulajdonságok, valamint a minőségfüggvények alkalmazásával származtatott számszerű kritériumok alapján való jellemzést. E két módszert alkalmazási példákon keresztül tárgyaltuk. Mindkét esetben egy gyengén ötvözött hipoeutektoidos szerkezeti acél (C45) anyagú hengeres próbatest keresztmetszetében kialakuló martenzit mennyiséget és keménységét, mint előrejelzett tulajdonságokat vettük alapul.

A becsült tulajdonságok szerinti értékelési metodológia a hűtőközeg hűtési teljesítményét befolyásoló paraméterek (közeg hőmérséklete, áramlási viszonyai, koncentrációja) kompenzációs jelenségének vizsgálatát is lehetővé teszi. A becsült adatok arra utalnak, hogy bizonyos paraméter-kombinációk az edzés eredményként adódó tulajdonságok szempontjából „ekvivalensek”, azaz azonos hűtési teljesítmény különböző paraméter-kombinációkkal is megvalósítható. A példák arra mutattak rá, 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.

A hűtőképesség elemzés másik koncepcióját döntően a mérési adatok matematikai statisztikai módszerekkel való elemzése során meghatározott empirikus formulák, azaz minőségfüggvények célszerű alkalmazása képezi. A minőségfüggvény a mért hőmérsékletciklusból, vagy az inverz analízis során becsült  $h_c(T)$  függvényből származtatott mennyiségek és a C45 acél alapanyagú munkadarab edzésénél kialakuló számított tulajdonságok közötti összefüggést írja le. A vizsgálatok során olyan minőségfüggvényeket állítottunk elő, melyekkel a becsült martenzit hányad és a keménység közvetlenül a mért hűlési görbéből vagy a  $h_c(T)$  függvényből becsülhetőek. A minőségfüggvények alkalmazási lehetőségét egy gyakorlati példán keresztül demonstráltuk oly módon, hogy azt a két legelterjedtebb – a hűlési görbe-elemzésen alapuló – minősítő eljárással hasonlítottuk össze.

E vizsgálatok alapján arra következtethettünk, hogy a minőségfüggvények alkalmazásával a hűtőközegek hűtőképességének minősítése a hagyományos eljárásoknál pontosabban végezhető.

Az értekezés új tudományos eredményeit az alábbiakban foglaljuk össze:

1. A ISO 9950 szerinti szabványosított eljárással mért lehülési görbék zajszerűsére, simítására és kódolására egy, a Fourier analízisen alapuló új típusú eljárás dolgoztunk ki. Megmutattuk, hogy a 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 deriváltjának) - előállítására is.
2. Eljárást (algoritmus és szoftvert) fejlesztettünk ki az acélok immerziós edzéséhez használatos hűtőközegek hűtési képességének minősítésére. Az eljárás, amely a hőmérséklettől függő hőátadási együttható inverz módszerrel való meghatározásán valamint az edzési folyamat szimulációján (mikroszerkezet- és tulajdonság-becslésen) alapul, lehetővé teszi, hogy különféle hűtőközegek hűtési teljesítményét közvetett, de kvantitatív módon jellemezzük a C45 ötvözetlen acélból kimunkált hengeres próbatest középpontjában szimulációval számított martenzit hányaddal, illetve keménységgel.
3. Megmutattuk, hogy kifejlesztett eljárás egyúttal célszerűen felhasználható ún. minőségfüggvények definiálására, amelyek révén a hűtőközegek hűtési teljesítménye - egyéni felhasználó igények, és tapasztalatok figyelembe vételével - közvetlen módon is minősíthető. Megmutattuk egyrészt, hogy az Inconel próbatesttel felvett hűlési görbe alapján származtatott 500 és 400 °C-ra való lehülési idők különbsége ( $t_{500-400}$ ) és a C45 minőségű próbatest tengelyvonalában számított keménység, illetve martenzit-hányad között lineáris összefüggés mutatható ki, másrészt igazoltuk, hogy a keménység és martenzit-hányad, valamint az 500 és 400 °C hőmérséklet-intervallumra vonatkozó átlagos lehülési sebesség ( $CR_{500-400}$ ) közötti összefüggést exponenciális függvénykapcsolat jellemzi. Megmutattuk továbbá, hogy hűtőközeg minősítésére bevezetett  $I_{htc_{600-400}}$  paraméter, (amely az Inconel próbatest lehülését 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 igazoltuk, hogy a polimerbázisú hűtőközegek hűtési képességét befolyásoló három alapvető paraméter (a hűtőközeg hőmérséklete, áramoltatási sebessége és az adalék koncentráció mértéke) között létezik egyfajta ún. kompenzációs effektus: nevezetesen e három paraméter célszerűen választott kombinációjával - egy célszerűen definiált értelmezési tartományban - azonos (egyenértékű) hűtési teljesítmény valósítható meg.

## Irodalomjegyzék

1. S. Nukiyama: Maximum and Minimum values heat  $q$  transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, *Journal of Society of Mechanical Engineering in Japan*, 37, (1934), p.: 53-54, 367-374
2. A. Majorek, B. Scholtes, H. Müller, E. Macherauch: Influence of heat transfer on development of residual stresses in quenched steel cylinders, 1994, *Steel research No. 4*, p. 146-151
3. H. M. Tensi, A. Stick : Martens hardening of steel - Prediction of temperature distribution and surface hardness, *Materials Science Forum Vols. 102-104* (1992) p. 741-75
4. H. M. Tensi, B. Liscic, W. Luty: *Theory and Technology of Quenching*, 1992, Springer-Verlag
5. G.E. Totten, C.E. Bates and G.N. Webster, "Quenching", in *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*, G.E. Totten and D.S. MacKenzie Eds. 2002, Marcel Dekker Inc., New York, NY
6. *Metals Handbook*, Ninth Ed., Vol. 4, Heat Treating, ASM International, U.S.A., 1981, 31
7. R.W. Monroe: (1983) *Journal of Heat Treating*, Vol 3, No.2, p.:83-99
8. L. W. Pietrasz: (1959) *Zakaloczneje Sriedy*, Moskow, Maszkiz
9. I. Mansion et al: (1978) *Les Huiles de tempre*, Centre technique des Industries Mecaniques, Senlis
10. K.H. Kopietz, (1969), *Aufbau, Eigenschaften und Anwendung von Ölen für die Wärmebehandlung der Stahl*, Mineralöltechnik, Nr. 4-5
11. W. Keyser, (1972) *Mineralöle in der Hartetechnik*, Werkstatt und Betrieb, Nr. 6, p. 421-426
12. K.H. Kopietz, (1979) *Controlled Quenching of Ferrous Metals in Sodium Polyacrillate Aqueous Solutions*, *Industrial Heating*, June
13. Burgdorf E: (1979) *Eigenschaften und Einsatzgebiete synthetischer Abschrecklösungen*. *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung*, Bd. 74, Nr. 9, p. 431-436

14. R. W. Foreman: (1984) Polymer Quenching Update, Industrial Heating, January, p. 22-29
15. N. Hilder: (1987) The Behaviour of polymer Quenchants, Heat Treatment of Metals, 2, p: 31-46
16. Grossmann, M. Asimow and S.F. Urban, in Hard inability of Alloy Steels. American Society for Metals, 1939, 124-190
17. Bates, C.E. and Totten, G.E., "Application of Quench Factor Analysis to Predict Hardness Under Laboratory and Production Conditions", In Conf. Proceed. Quenching and Distortion Control, Totten, G.E., Ed.; ASM International, Materials Park, OH, 1992; p 33-39.
18. T. Réti, I. Felde, R. Kohlheb, T. Bell: Quenchant Performance Analysis By Using Computer Simulation, Heat Treatment of Metals ,1996. 1. p. 11-14
19. G.E. Totten and C.E. Bates, N.A. Clinton, Handbook of Quenchant and Quenching Technology, 1993, ASM International, p62, 140-144
20. Houghton Abschreckprüfgerät (Houghton Quench Test Apparatus). Brochure from Houghton-Hildesheim, Germany
21. Industrial Quenching Oils - Determination of Cooling Characteristics - Laboratory Test Method,. Draft international standard ISO/DIS 9950, International Organization for Standardization (submitted 1988)
22. Laboratory Test for Assessing the Cooling Characteristics of Industrial Quenching Media, Wolfson Heat Treatment Centre, Birmingham, England, 1982
23. Drasriciti des huiles de nempé. Essai au capteur d 'argent, NFT 60178, Association Française de Normalisation, Paris, France
24. Test method for cooling properties of quenching media, State Bureau of Standards of the People's Republic of China, Beijing, China
25. Japanese Industrial Standard. Heat Treating Oils, JIS K 2242-1980, Japanese Standards Association. Tokyo, Japan
26. Industrial Quenching Oils - Determination of Cooling Characteristics - Laboratory Test Method,. Draft international standard ISO/DIS 9950, International Organization for Standardization (submitted 1988), Laboratory Test for Assessing the Cooling Characteristics of Industrial Quenching Media, Wolfson Heat Treatment Centre, Birmingham, England, 1982

27. B. Liscic, in Proc. 6th Int. Congress on Heat Treatment of Materials. Chicago, U.S.A. 28-30 Sept. 1988, ASM International, U.S.A., 1988, 157-166
28. II. Flv/4es de nempe. Determination de la s lriu de rrempe d'une installation industrielle, NFT 60179, Association Technique de Traitement Thertnique, Paris, France, 1988
29. Quenching Media. Determination of Quenching Severity of an Industrial Facility, Draft international standard submitted by Association Technique de Traitement Thermique France, to the International'. Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHT, 1988)
30. Quenching and Control of Distortion (ed. H.E. Boyer and P.R. Cary), ASM International, U.S.A., 1988, 166
31. N. Shimizu and I. Tamura, Trans. ISIJ, 1977, 17, 469-476
32. N. Shimizu and I. Tamura, Trans. ISIJ, 1978, 18, 445-450
33. K.E. Thelning, Scandinavian J. of Metallurgy, 1978, 7, 252-263
34. H. Lechatelier, Revue de Metallurgic, 1904. 1
35. C. Beaedicks, J. Iron Steel Inst., 1908. 77
36. A. Mathews and H.J. Stagg, Trans. ASME, 1914, 36
37. A.M. Ponevin and M. Garvin, J. Iron Steel Inst., 1919, 99
38. G. Murry, Tament Thermique, 1976, 108, 47-54
39. Deliry, R. El Haik and A. Guimier, Traiumeru Thermique. 1980, 141, 29-33
40. F. Wever and A. Rose, Stahl and Eisen 1954, 74, 749
41. Kulmburg, F. Komtheuer and E. Kaiser, in Proc. 5th Int. Congress on Heat Treatment of Materials, Budapest. Hungary, 20-24 Oct. 1986, Scientific Society of Mechanical Engineers. Budapest, Hungary, 1986, 1730-1736
42. G. Bogen and H. Sidan, Berg- and HJnenmdae. Monauh.. 1972, 117, 250-258
43. M.T. Ives, A.G. Meszaros and R.W. Foreman, in Heat Treatment of Metals, 1988, 15, 11
44. M. Atkins and K.W. Andrews, in BSC Report SP/PiM/6063/-/7/C/

45. S. Segerberg, Heat Treating, Dec. 1988. 30-33,
46. S. Segerberg, in Heat Treatment of Metals, 1990, 1 7, 67
47. Tamura, N. Shimizu and T. Okada, J. Heat Treating, 1984.3, 335-343
48. M. Deck, P. Damay and F. Le Stmt. in Proc. ATIT 90 Internanonaaur de France du Trmtement Thermique, Lc Mans, 19-21 Sept. 1990. Association Technique de Traitement Thermique. Pans. France, 49-70
49. J.W. Evancho, J.T. Staley, Metallurgical Transactions, 5, (1974), p. 43
50. P.A. Rometsch M.J. Starink, P.J. Gregson, Improvements in quench factor modeling, Materials science and Engineering, (2003), p. 255-264
51. [http://www.ims.org/projects/project\\_info/vht.html](http://www.ims.org/projects/project_info/vht.html)
52. G.E. Totten, "Heat Treating in 2020: What are the Most Critical Issues and What will the Future Look Like?", Heat Treatment of Metals, 2004, Vol. 31, No. 1, p. 1-3.
53. J. Beck, B. Blackwell and C. St. Clair, Inverse Heat Conduction - Ill-Posed Problems, Wiley-Interscience, 1985.
54. O. M. Alifanov. Inverse Heat Transfer Problems. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
55. M. N. Ozisik, H. R. B. Orlande, Inverse Heat Transfer Fundamentals and Application, 2000
56. K. Kurpisz, A. Novak: Inverse Thermal Problems, Computational Mechnaics, UK, 1995
57. J.I. Frankel, Inverse heat Conduction and Data-type Issues, Boundary Element Communications, Vol. 11, 4, 2000, pp.37-42
58. J. Clark and R. Tye, Termophysical properties reference data for some key engineering alloys High temperatures – high pressures, 2003/2004, Vol. 35/36. pp 1-14
59. R. Annino, R.D. Driver: Scientific and Engineering Applications with Personal Computers, John Wiley & Sons, New York, (1986)
60. I. Felde, T. Reti, X. Chen: Efficient Data Encoding And Filtering For Quenching Analysis, 3<sup>rd</sup> Conf. on Quenching and Control Of Distorsion, (1999), p. 208-218.

61. I. Felde et al.: 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
62. T. Réti, I. Felde, G.E. Totten: Concept of a Factographic Database for the Characterization and Evaluation of Cooling Performance of Quenching Media, 19<sup>th</sup> International Symposium in Honor of Professor George Krauss, (1999), Cincinnati, OH, p. 584-589
63. I. Felde, Quantitative Evaluation of Quenchants, MicroCAD, (2003), Miskolc
64. L.C.F. Canale, G.S. Sarmiento, G.E. Totten, I. Felde, and R.N. Penha, "Effect of Vegetable Oil Oxidation on The Ability to Harden AISI 1045 and 4140 Steel", 60o Congresso Annual Da ABM, July 25 to July 28, 2005 - Belo Horizonte, Brazil, pp. 3209-3217.
65. Réti T. et al : ASM Handbook, vol 4. Heat Treating, (1981), p. 638-656
66. Gergely M., Réti T., BKL Kohászat, 111 ( 1978 ) No 10. 439-446 old.
67. Réti T. , Gergely M., Heat Treatment of Metals, vol 18 (1991) No 3. 117-119 old.
68. Gergely M., Konkoly T. : Számítástechnika alkalmazása szerkezeti acélok és hőkezelési technológiák kiválasztásához OMIKK (1987)
69. I. Felde : Edzéskor végbemenő átalakulási folyamatok szimulációja, Kohászat, (1997), VII, 221-229,
70. T. Réti, L. Horváth and I. Felde: A Comparative Study of Methods Used for the Prediction of Nonisothermal Austenite Decomposition, JMEPEG, (1997), VI, 433-442
71. T.Réti and I. Felde: A non-linear extention of the additivity rule, Computational Materials Science, Elsevier Science, (1999), 15, p. 466-482,
72. T. Reti, I. Felde, Z. Fried: Multi-phase modeling of austenite transformation processes, 3<sup>rd</sup> Conf. on Quenching and Control Of Distorsion, (1999), p. 157-172.
73. R. Kohlhéb, I. Felde, T. Réti, G. Buza, B. Verő, M. Gergely: Comparative analysis of non-isothermal austenite transformation, Proc. of the 10th Congress of IFHT in Brighton, (1999), p. 630-64



74. I. Felde, T. Réti, R. Kohlhéb, G. Buza, B. Verő, M. Gergely: Application of Computer Simulation in Heat Treating of Steels, Proc. of the 10<sup>th</sup> Congress of IFHT in Brighton, (1999), p. 687-695
75. T. Réti, Z. Fried, I. Felde: Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model, Computational Materials Science, 22, (2001), p. 261-278,
76. T. Réti, I. Felde, Gy. Bagyinszki, B. Verő, T. Bell: Prediction of as quenched hardness after rapid austenitization and cooling in surface hardened steels, Computational Materials Science, Elsevier Science, (1999), 15, p. 101-112
77. Hawbolt E. B., Chau B., Brimacombe J. K. :Metallurgical Transactions, vol 16 A, ( 1985 ) 565 old.
78. Hidenwall B. : Prediction of residual stresses created during quenching, Dissertation No 39, ( 1989 ) Linköping University, Sweden
79. Pumphrey W. T., Jones F. W. : JISI (1948) vol 159, 137-144
80. T. Réti, I. Felde, B. Smoljan, R. Colas: Modeling of non-isokinetic transformations, Proc. Of the 1st International Conference On Heat Treatment And Surface Engineering Of Tools And Dies, (2005), p. 417-424
81. T. Réti, I. Felde, C. H. Gür: Modeling of Reversible g/a Transformations of Low Carbon Steels in the Intercritical Temperature Range, Proc. of the 14th IFHTSE Congress Shanghai, I., p: 702-705
82. I. Felde et al: Numerical Methods for Safeguarding the Performance of the Quenching Process, Proc. of the 14th IFHTSE Congress Shanghai, I., p: 519-521
83. T. Réti, I. Felde, O. Kolankaya, C. H. Gür: A Kinetic Model For Austenite/Ferrite Transformation in Hypoeutectoid Steels in the Ae1-Ae3 Temperature Range, Proceedings Of 12th Int Metallurgy And Materials Congress, 28 Sept-02 Oct, 2005 Istanbul, Paper No. K179
84. S. Segerberg, J. Bodin, I. Felde: A new advanced system for Safeguarding the performance of the quenching process, Heat treatment of metals (2003), vol 2, p. 49-51
85. S. Segerberg, J. Bodin, I. Felde: Hardware/software combo measures performance in quenching, Heat Treating Progress, 4, 3, (2004), p. 28-30
86. I. Felde et al.: 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
87. I. Felde, T. Réti, S. Segerberg, J. Bodin, S. Sarmiento: Numerical methods for safeguarding the performance of the quenching process, *Materials Science Forum*, (2005), 473-474, p. 335-340
88. I. Felde, T. Réti, J. Bodin, G. Sarmiento, B. Smoljan: A novel evaluation method of quenchnats by using computer simulation, *Proc. Of the 1st International Conference On Heat Treatment And Surface Engineering Of Tools And Dies*, (2005), p. 417-424
89. 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