

INDUKCIÓS HEVÍTÉS HŐMÉRSEKLET-IDŐ DIAGRAMJAI

Koncsik Zsuzsanna

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Fodor Béla

tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros

Lukács János

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros

Absztrakt

Napjainkat a felgyorsult technológiai folyamatok jellemzik. A hőkezelési technológiákban az egyik leghatékonyabb eljárás az indukciós hevítés, amelynek révén a klasszikus edzési-megeresztési folyamat időtartama akár tizedére is csökkenhet. Azonban ezt a felgyorsult folyamatot nehéz a szokásos hőkezelési diagramokkal jellemezni, már csak azon egyszerű tény miatt is, hogy nincs maximális kemence hőmérséklet, hanem csak az indukciós tekercs leadott teljesítménye értelmezhető, amely a hőkezelt alapanyagban meghatározott nagyságú hőt kelt. A hőkezelési diagramok segítségével jellemezhető a kialakuló szövetszerkezet és előre jelezhető a mechanikai viselkedés. Jelen cikkben adott geometriájú alkatrész indukciós hevítése közben mérhető maximális hőmérsékleteket vizsgáljuk, hőkamera segítségével és a hevítési, valamint a hűlési idők meghatározásával kísérletet teszünk hőmérséklet-idő diagramok felrajzolására.

Kulcsszavak: indukciós hevítés, hőmérséklet-idő diagram, hőkamera

Abstract

Our days are characterised by accelerated processes. In heat treatment technologies one of the most effective processes is induction hardening. Due to the induction hardening the time range of classic hardening-tempering processes can be decreased to tenth. However, the characterisation of this accelerated process is complicated with the common time-temperature diagrams, because of the simple fact, that there exists no maximal chamber temperature, only the given power of the induction coil can be given, which causes determined heat in the heat-treated base material. Based on heat-treatment diagrams, the forming microstructure can be characterised, and the mechanical behaviour can be predicted. In this paper the maximum temperature of a component with given geometry is examined during induction hardening, applying thermal camera and based on the experimental results and the determined heating and cooling times, time-temperature diagrams are drawn.

Keywords: induction hardening, time-temperature diagram, thermal camera

1. Bevezetés

A 20. és a 21. század fordulójának felgyorsult ipari folyamatai magukkal hozták a hőkezelési technológiák gyorsításának a szükségességét is. Az indukciós hevítés, mint rendkívül hatékony hőkezelési

technológia, a hőkezelési időt jelentősen lecsökkenti, miközben a technológia végeredményeként a hagyományos hőkezelési eljárásokkal azonos állapotú anyag (gyártmány) keletkezik. Az eljárás technológiája teljesen más elven alapul, mint a hagyományos hevítő kemencés eljárásoké.

Az indukciós edzés abban különbözik a többi felületedzési eljárástól, hogy a hőt nem kívülről viszszük be, hanem az magában az alkatrészben keletkezik. Az induktor kialakításával és a technológiai paraméterek célzott beállításával érhető el, hogy a hőfejlődés a darab azon helyén menjen végbe, ahol arra szükség van. Az indukciós hevítés segítségével lényegesen nagyobb teljesítménysűrűség érhető el, mint a többi felületedző eljárás során, ezért a hevítési sebesség igen nagy. Emiatt lényegesen lecsökken a szükséges hevítési idő, ebből következik, hogy az eljárás nagyon gazdaságos és termelékeny. Emellett a folyamat ismételtetősége is kiváló, mivel a villamos paraméterek pontosan és jól szabályozhatók [1], [2].

A darabok sokfélesége és az edzett kéreg tulajdonságainak különbözősége miatt többféle indukciós edzési eljárás alakult ki. Ezen sokféle eljárást két nagy csoportba lehet besorolni, az edzési módszer szerint.

A két nagy csoport a következő:

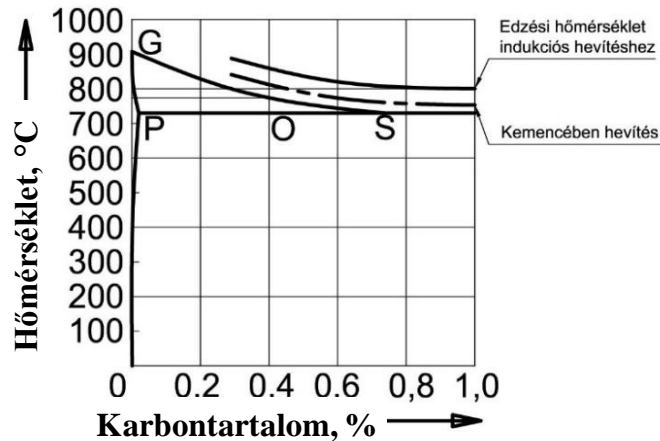
- single-shot hardening (teljes felület egyidejű edzése), ahol álló induktor hevíti a munkadarab egész edzési zónáját, majd az edzési hőmérséklet elérése után gyors lehűtést alkalmaznak;
- scanning hardening (pásztázó edzés), ahol egyszerre csak a munkadarab egy kis részének edzése folyik, az induktor és edzőgyűrű egy szerszámként mozog a darabon és a hevítést követően rögtön megtörténik az edzés is.

Ebből a két alap eljárásból alakultak ki a további eljárásváltozatok, mivel ezek nem fedik le teljes egészében a valóságban szükséges és használatos eljárásokat [3], [4].

Az acélok hőkezelése során bennük átalakulások, szövetszerkezeti változások mennek végbe. A jelenlevő szövetelemek fajtája és mennyisége az ötvözet tulajdonságait döntő módon meghatározza. Ezért fontos az egyes hőkezelések alkalmával lejátszódó fázisátalakulások, a keletkezett szövetelemek ismerete. A hőkezelési hőkiklusok ismeretében a hőkezelés alatt bekövetkező változások követhetők, amennyiben rendelkezésre állnak a megfelelő segédletek. Mint ismeretes, az acélok átalakulása, a keletkezett szövetelemek minősége és mennyisége a vizsgált acél kémiai összetételén kívül a hevítés és a hűtés körülményeitől is függ. A megfelelő hőmérsékletre való hevítés közben kialakuló ausztenit jellemzői (stabilitás, homogenitás, szemcseméret) függenek a hevítés sebességétől, véghőmérsékletétől, a hőntartás idejétől. Az átalakulás közben keletkezett szövetelemeket az ausztenitesítési diagramok jelenítik meg egy adott acélra. A hevítés és hőntartás során kialakult homogén ausztenitből a hűtés viszonyaitól függően különböző szövetelemek keletkezhetnek, amelyekre információt az izotermás, vagy a folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramok szolgáltatnak, egy-egy adott acél összetétel esetén. A gyakorlatban minden egyes acél adagra, összetételre nem áll rendelkezésre sem ausztenitesítési, sem átalakulási diagram; általában egy-egy szabványos acélminőségre rendelkezünk csak információkkal. Az évtizedes tapasztalatok alapján ez a gyakorlat számára megfelelő megbízhatóságú információt ad a fázisátalakulásokról és a kialakult szövetelemek minőségére, mennyiségére, továbbá az adott acél néhány jellemző tulajdonságára (például keménység).

Az indukciós edzés során az anyagban végbemenő folyamat, a vas-karbon anyagokra jellemző átalakulási folyamat. Az acélt először az A₃ vonal feletti hőmérsékletre kell hevíteni. Az indukciós edzés során ugyanaz a folyamat megy végbe, mint kemencében való edzéskor, csak gyorsabban [3]. Kemencében való edzéskor elegendő idő van arra, hogy a szövetszerkezet teljesen ausztenitesedjék. Először a perlit, később a ferrit alakul át ausztenitté a hőmérséklet növekedésével. Ennek a két szövetnek a karbon tartalma különböző (perlit ~ 0,8; ferrit < 0,01). Ez a különbség diffúzióval egyenlítődik ki a hevítési folyamat során. Erre a gyors indukciós edzés során nincs elég idő. Tehát magasabb hőmérsékletre

kell hevíteni (lásd 1. ábra), mivel a diffúzió a hőmérséklet növekedésével egyre intenzívebbé válik. A hevítés következtében az anyagból homogén ausztenit képződik, az előtte kötött karbon az ausztenitben oldott állapotban lesz jelen. A folyamat rendkívül gyors lejátszódása miatt szemcsedurvulásra nem kell számítani.



1. ábra. Hevítési hőmérséklet [5]

Ezután a lehűtést olyan gyorsan kell elvégezni, hogy a karbon a lehűtés után is oldva maradjon. Így keletkezik az edzési szövetszerkezet, a martenzit. Bár az alkalmazott hűtési sebesség csak a felületen tud érvényesülni, ha a lehűtés túl lassú, akkor az ausztenitből perlit és ferrit keletkezik. A martenzitképződés következtében bekövetkező keménységnövekedés csak akkor jelentős, ha az acél karbon-tartalma 0,35%-nál nagyobb volt [2]. A keménység 0,8% karbontartalomig tovább növekszik, a fölött pedig már nem jön létre jelentős keménységnövekedés [2]. A nagy karbontartalom következtében az ausztenit martenzitté alakulása alacsony hőmérsékleten megy végbe, sőt esetleg még szobahőmérsékleten sem megy végbe teljesen. Túlhűtéssel a maradék ausztenit még martenzitté alakítható, azonban, ha ez nem történik meg, akkor a maradék ausztenit idővel többnyire bénitté alakul. Az edzéssel előállított martenzit kemény, de rideg is. Fajlagos térfogata nagyobb, mint a kiindulási szövete. Ez a fajtérfogatnövekedés belső feszültségeket okoz. Ez a felületi edzés során jelentősebb, mivel nem a teljes szövetszerkezet lesz martenzites. Ez a feszültség és a mag és kéreg közötti hőmérsékletkülönbségből keletkező feszültség okozhat a későbbiekben edzési vetemedést vagy a feszültség miatt kialakulhatnak repedések. Erre a problémára a megoldás a megeresztés, amely a martenzit rácsszerkezetében okoz változásokat. Ennek következtében csökken az edzés során létrejött belső feszültség. A megeresztés következtében a technológiai paraméterek függvényében, kismértékű keménységcsökkenéssel kell számolni, míg a mechanikai tulajdonságok (nyúlás, szívósság) kedvezően változnak [2].

2. Kísérleti körülmények

Az indukciós hevítés hőmérséklet-idő diagramjainak felvételéhez autóiipari alkalmazásban is használt, C45 anyagminőségű, 30 mm átmérőjű, 564,5 mm hosszúságú rúd alakú próbatesteket használtunk, amely próbatestek egyik vége fogazott volt, 164 mm hosszon.

Az alkalmazott indukciós hevítési folyamat az ún. scanning hardening, azon belül is előtoló-keringető eljárás. Az eljárás során az induktor geometriája a fogazott rész keresztmetszetét követi, így a fogazat megfelelő egyenletes hevítését lehet biztosítani. A fogazati részen fluxuskoncentrátor van

felszerelve, ezzel a fogazat számára szükséges extra energiát lehet bevinni, így a fogakat teljesen át lehet edzeni. Ezt a nem szimmetrikus induktorformát úgy lehet kiküszöbölni, hogy a teljesen hengeres részek edzése során a fogasléc forog. Az induktorban, annak teljes hossza mentén, hűtőcsatorna található, amelyben az induktor hűtőfolyadékja kering, így hűtve azt. A hevítést a generátor teljesítményével és az induktor előtolási sebességével lehet változtatni. A frekvencia állandó értékű $f = 6,2$ kHz volt. A próbatestet a vizsgálat idejére gondolatban három szakaszra osztottuk. A hengeres részen azonos előtolási sebesség (1700 mm/min) mellett az első szakaszon az induktor teljesítménye 74%-os volt, míg a második szakaszon 55%-os. A fogazott részen az induktor teljesítménye 54%-os volt és álló, scannelő mozgást végzett 800 mm/min-es fordulatszámmal. A próbatesten beállított különböző szakaszok hossza: az első szakasz: 254,5 mm, a második szakasz: 146 mm, míg a fogazat szakasza: 164 mm. A kísérleti vizsgálat beállításai, mind az induktorra, mind az alapanyagra vonatkozóan egy autóiipari gyártásban alkalmazott indukciós hevítés modellezését szolgálták.

A hűtést, edzést egy, az induktor után közvetlenül bekötött edzőgyűrű végzi el, amibe a megfelelő minőségű edzőközeg adagolható. Jelen kísérletekhez ezt az edzőgyűrűt eltávolítottuk, annak érdekében, hogy a maximális hevítési hőmérsékletet mérni tudjuk.

A kísérletek során Jenoptik VarioCAM research 680 típusú hordozható mikrobolométeres hőkamera alkalmazására került sor. A mozgó induktor és forgó darab miatt nem volt lehetőség kontakt elven működő hőmérsékletmérő módszert alkalmazni, és a hőelem, ellenálláshőmérő vezetékezését sem volt lehetőség rögzíteni a hőkezelési folyamat sajátosságai miatt [6], [7]. Emellett, a fogasléc teljes hosszában szükség volt a hőmérsékleteloszlás meghatározására, így a pirométer segítségével nagyszámú mérést kellett volna elvégezni. Mindezekől következően a megfelelő megoldást a hőkamera jelentette.

A hőkamera főbb tulajdonságai a következők [8]:

- képfelbontás: 640×480;
- méréstartomány: -40 ... 1600 °C;
- termikus felbontás: 30 mK;
- mérési pontosság: $\pm 1,5$ °C, értéke független a mérési távolságtól;
- képfrissítési frekvencia: 50 Hz.

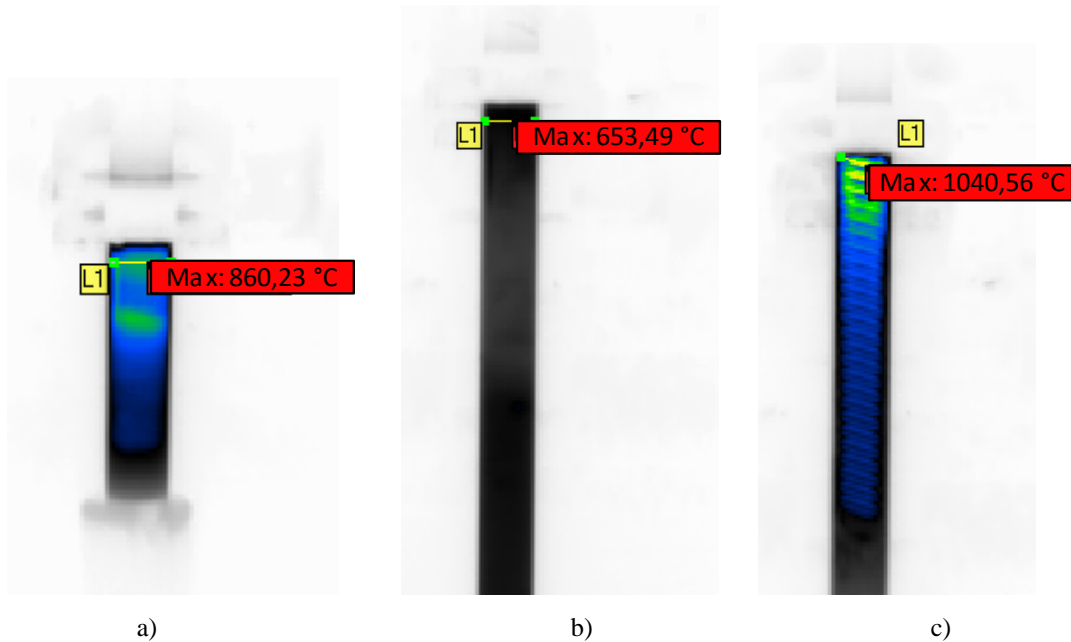
A kamerához több optika is elérhető, a mérések során széles látószögű optika került alkalmazásra. A kamera 2,5 m távolságból rögzítette az adatokat, 16,67 Hz adatrögzítési frekvenciával, három párhuzamos mérést elvégezve.

A mérést megelőzően egy kalibrációs mérésre volt szükség, mivel a vizsgált anyagminőségű próbatest emissziós tényezője, amely a test hősugárzás-kibocsátási képességének mértékét jelenti, ismeretlen volt. Így pontosításra volt szükség a hőkamera által mért értékhez. Emellett kérdéses volt az is, hogy a hőkamera képes-e követni a gyors hőmérsékletváltozást. Ehhez a hőkamera és a Gleeble 3500-as termo-mechanikus fizikai szimulátor segítségével ellenőrző, kalibrációs mérések elvégzése volt szükséges [9].

3. Kísérleti eredmények

A kamera által rögzített hőképek (lásd 2. ábra) kiértékelésére az IRBIS 3 Professional nevű szoftver segítségével került sor. A kiértékelés során, a teljes tengely hevítéséről készült képsorozat alapján, minden szakaszon, az induktor elhaladását követően mérhető maximális hőmérsékleteket határoztuk meg, a fogazott részen külön a fogtetőn és a fogárookban. A mérés során kizárólag a felület hőmérsékletét tudjuk mérni a hőképek alapján, illetve csak azokról a pontokról (pixelekről) kapunk megbízható információt, amelyekre a kamera pontosan merőlegesen „látott rá”, ezért is látszanak pixelesnek a

felvételek. A bármely szögből érkező információk (fog oldallap, fogtó görbülete, fogárok görbülete) óvatossággal kezelendők.



2. ábra. a) Az első szakaszon mért maximális hőmérséklet; b) a második szakaszon mért maximális hőmérséklet, c) a fogazaton mért hőmérséklet

A különböző szakaszokon, három párhuzamos mérés során mért maximális hőmérséklet értékeket az 1. táblázat tartalmazza. A három szakasz eltérő hőmérséklet értékei az egyes szakaszokon alkalmazott különböző induktor-teljesítményből fakad.

1. táblázat. A hőmérséklet-idő diagramok szerkesztéséhez javasolt maximális hőmérséklet tartományok a próbatest különböző szakaszain

Technológiai terület felosztás	Első szakasz	Második szakasz	Fogazat	
			fogárok	fogtető
Hőmérséklet tartományok, °C	860-880	635-680	860-900	1040-1045

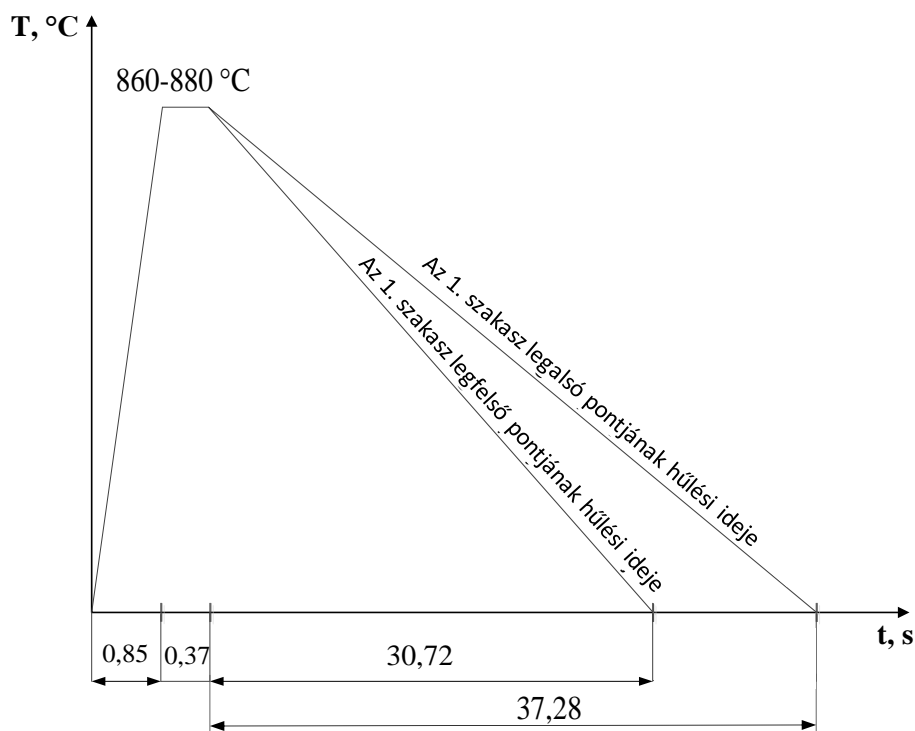
A klasszikus hőmérséklet-idő diagramok szerkesztéséhez nem elegendő a hevítéskor tapasztalt maximális hőmérséklet értékek megadása, hanem ismerni kell a hevítés, a hűntartás és a tényleges edzési folyamat során a hűtés idejét is. Ezen idők megadása az induktor tényleges mozgása alapján történt. A 2. táblázat tartalmazza a kísérleti munka során tapasztalt hevítési, hűntartási és hűtési időket.

2. táblázat. A hőmérséklet-idő diagramok szerkesztéséhez szükséges idő értékek

Technológiai terület felosztás	Hevítési idő, s	Hűntartási idő, s	Hűtési idő, alsó pont, s	Hűtési idő, felső pont, s
Első szakasz	0,85	0,37	37,28	30,72
Második szakasz	0,85	0,37	30,72	26,22
Fogazat	1,8	0,80	24,22	11,22

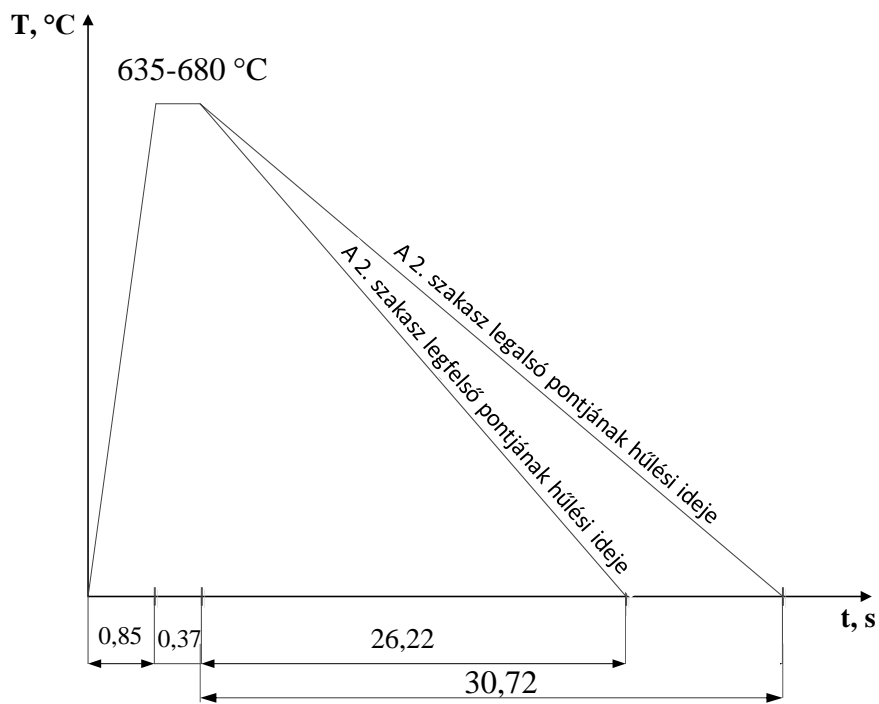
A hevítési idő az az idő, amíg az induktor teljes vastagságában elhalad egy adott pont fölött, vagyis amíg ténylegesen hevít, függ az alkalmazott előtolási sebességtől is. A hőntartási idő az az idő, ami az induktor elhaladása és az edzőközeg felületre érkezése között eltelik (a tényleges indukciós edzés során), az induktor felső vonalának és az edzőgyűrű felső vonalának távolságából számítható, illetve szintén figyelembe kell venni az előtolás sebességét is. A hűtési idő az az idő, amíg az edzőközeg az adott pontot hűti, ez az alsó pontoknál, amelyek hamarabb érintkeznek az edzőközeggel hosszabb, míg a felső pontoknál, amelyek később érintkeznek az edzőközeggel, rövidebb idő.

A mért hőmérsékletek és a számított idők alapján a különböző szakaszokra a hőmérséklet-idő diagramok megrajzolhatók. Az eredményeket a 3-5. ábrák illusztrálják.

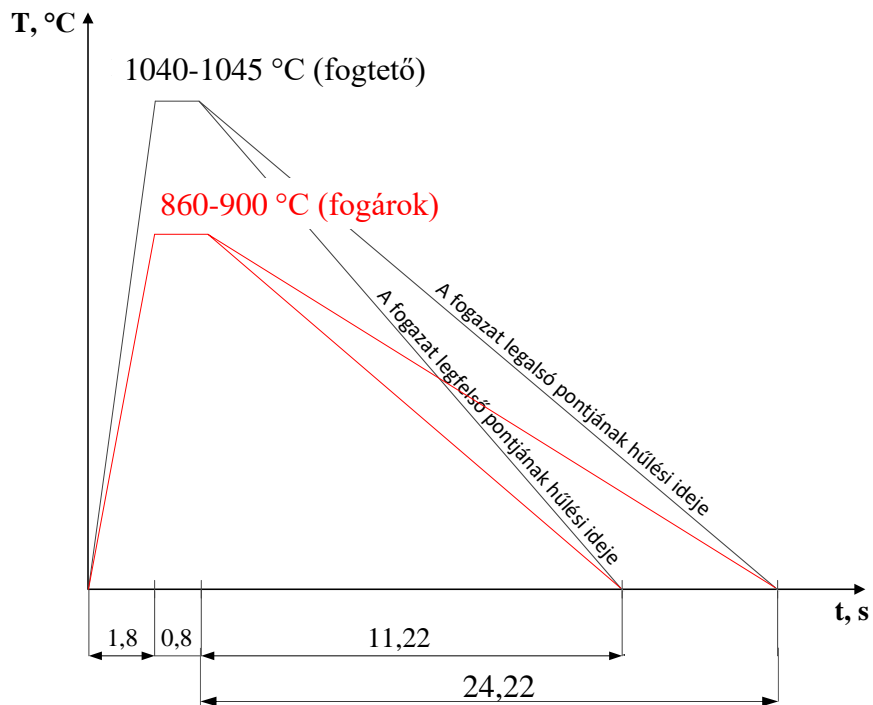


3. ábra. Az első szakasz hőmérséklet-idő diagramja

A 3-5. ábrákon bemutatott diagramok alapján az első szakaszon beállított nagyobb induktor teljesítmény magasabb hőmérsékletet eredményezett, amely a második szakaszon (lásd 4. ábra) a teljesítmény csökkenésével lecsökkent. A fogazat esetében a fogak tetejét és a fogárkok hőmérsékletét tudtuk elemezni. A vizsgált fogak tetejének hőmérséklete alapján az anyag homogén ausztenites állapotban van, sőt még túl is hevül. A fogárokból mért hőmérsékletek is az A_3 hőmérséklet fölötti területre esnek. A fogprofilon, a fogtetőtől a fogárok felé haladva, a felület maximális hőmérsékletének enyhe csökkenésével kell számolni. A fogtető és a fogárok között elhelyezkedő fogprofil pontjaitól, arra közel merőlegesen a fog belső része felé haladva egy közel állandó hőmérsékletű tartományt követően a hőmérséklet csökken. Ebből következik, hogy a keletkezett ausztenit nem feltétlenül homogén, sőt indukciós edzés előtti szövetelemek is maradhatnak az acélban, ha a fogtetőtől és fogprofiltól kellően eltávolodunk.



4. ábra. A második szakasz hőmérséklet-idő diagramja



5. ábra. A fogazat hőmérséklet-idő diagramja

4. Összegzés

A közleményben bemutatott méréstechnika alkalmas a rendkívül gyors lefolyású indukciós hevítés klasszikus hőmérséklet-idő diagramjának meghatározására. A hőkamerás hőmérsékletmérés eredményei és azok alapján rajzolt hőmérséklet-idő diagramok lehetőséget teremtenek a felhevítés során kialakuló szövetszerkezet meghatározására, amelynek ismerete alapvető fontosságú a hőkezelt termék későbbi felhasználása, alkalmazhatósága szempontjából. A hőkezelés során fellépő maximális hőmérsékletek ismerete támpontot nyújthat továbbá a speciális kialakítású geometriák indukciós hevítése során fellépő hőfeszültségeiből adódó problémák megelőzésére, kiküszöbölésére.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L., Black, M.: *Handbook of induction heating*, Madison Heights, Michigan, U.S.A: Marcel Dekker, Inc., 2003., 796. p, ISBN 0824708482
- [2] Dezső, B. S.: *Indukciós hevítés*, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1965., 508. p, ETO 6213655
- [3] Rapoport, E., Pleshivtseva, Y.: *Optimal control of induction heating processes*, 2007., 349. p, ISBN 9780849337543 <https://doi.org/10.1201/9781420019490>
- [4] Berggren, K., Leif, M.: *Induction hardening – A quick guide to methods and coils*, Technol. Pract., vol. 2, (2014) pp. 97-98.
- [5] Benkowsky, G.: *Részlet a vas-szén diagramból*, in *Indukciós hevítés*, 1984, p. 94/3.
- [6] Axiomet, *Hőmérsékletérzékelők és mérési módszerek*. [Online]. Available: <https://hu.axiomet.eu/page/2096/Homersekleterzekelok-es-meresi-modszerek>. [elérhető: 2020. 02. 26.].
- [7] Nunes, R. M.: *ASM Handbook*, Volume 4, Heat Treating. ASM International, 1991., 2173. p, ISBN 0871703793
- [8] Jenoptik VarioCam. <https://www.jenoptik.com/products/cameras-and-imaging-modules/thermographic-camera/handheld-thermographic-camera>. [elérhető: 2020.02.26.].
- [9] Koncsik, Zs., Fodor, B., Kubuk, D., Losonczy, R.: *Hőkezelési hőmérsékletek mérése indukciós hevítés során*, *Gépgyártás*, LVIII. évfolyam, 1-2. szám, (2019) pp. 40-44.