

Hőelemek inhomogenitásának meghatározása Curie-pontos módszerrel

Determination of the thermocouple inhomogeneity using the Curie point method

Turzó-András Emese, Németh Tibor és Szögi Antal

Budapest Főváros Kormányhivatala – Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály (BFKH MMFF)

turzo-andras.emese@bfkh.gov.hu

Összefoglalás — Magas hőmérsékletű (200 °C és 1100 °C között) hőmérsékletméréseknél használatos hőelemek esetében fontos a fokozott hőigénybevétel miatt jelentkező inhomogenitás kimutatása, mert jelentősen növelhető a mérések pontossága és csökkenthető a mérési bizonytalanság. A nemesfémű előállított szabványos hőelem-szál mentén az inhomogenitás meghatározására Curie-pontos módszert használtunk, amely fémek ferromágneses tulajdonságán alapul. A kutatási eredmények elősegítik azon ipari folyamatok megbízhatóbbá és hatékonyabbá tételét, amelyeknél a hőmérséklet meghatározó tényező. Ez a munka a 18PRT03 EMPIR projekt keretében valósult meg [1].

Kulcsszavak: hőelem, inhomogenitás, Curie-pont

Abstract — For thermocouples used in high temperature measurements (between 200 °C and 1100 °C), the detection of inhomogeneity due to increased heat input is important because the accuracy of measurements could be significantly increased and the uncertainty could be decreased. The Curie point method, based on the ferromagnetic properties of metals, was used to determine the inhomogeneity along a standard thermocouple filament made of precious metals. The findings of this research will enhance the reliability and efficiency of industrial processes where temperature plays a crucial role. This work was carried out in the framework of the EMPIR project 18PRT03 [1].

Keywords: thermocouple, inhomogeneity, Curie point

1 BEVEZETÉS

A hőmérséklet egyike a tudományos területen és az iparban leggyakrabban mért fizikai mennyiségeknek. A 18PRT03 EMPIR projekt egyik fő célkitűzése a hőmérsékletméréseknél használatos hőelemek jellemző állapotának meghatározása. Az elért eredmények közvetlen hatással vannak egyes ipari folyamatok minőségére, minimalizálva az energiafogyasztást és elősegítve a 200 °C és 1100 °C közötti hőmérséklettartományban működő folyamatok versenyképességét.

A BFKH-MMFF-nek ebben a kutatási projektben való részvételét az elektromos mérések szakterület és a hőmérséklet mérések szakterület szoros együttműködése

jellemezte. Elektromos mérésekhez kapcsolódó jelenség, hogy ferromágneses fémek adott hőmérsékleten (Curie-ponton) elveszítik mágnességüket, amely állandó hőmérsékletet eredményez. A Curie-ponton alapuló új módszert használtuk fel a hőmérsékletmérések szakterületén a hőelemek vizsgálatára.

A hőelem két eltérő Seebeck-együtthatójú huzalból készült vezetékpar, mely huzalok egyik vége össze van hegesztve, ez a melegpont, ahol a hőmérsékletváltozás történik, a fennmaradó két szabad végződés állandó hőmérsékletű hidegpontba kerül.

A hőelem működésének alapja a Seebeck-effektus, amelynek lényege, hogy hőmérséklet-gradiens hatására az anyagban elektromos térerősség jön létre. Fémhuzalban jelentkező elektromos térerősség (E) függ a Seebeck-együtthatótól (S) és a hőmérséklet-gradienstől:

$$E = S(T, M) \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Ha az egyenletet egy (Δx) szakaszra alkalmazzuk, amelyben (S) állandónak tekinthető, akkor megkapjuk a (ΔT) hőmérsékletváltozás által generált (U) elektromos feszültséget:

$$U = E \cdot \Delta x = S \cdot \Delta T \quad (2)$$

A hőelemek teljesítőképessége akkor megfelelő, ha a hőelemszál a teljes hossza mentén azonos fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkezik. Hő-, kémiai vagy mechanikai igénybevétel hatására a hőelemszál inhomogénvá válik [2].

Rögzített hidegponti hőmérséklet esetén, a hőelem feszültsége elvileg csak a munkavégződés hőmérsékletétől függ. Az inhomogenitás azt okozza, hogy ez az állítás nem lesz igaz, vagyis a keletkezett feszültség függ attól, hogy a hőmérséklet változása a hőelem mely szakaszán következik be. Ha hőmérsékletváltozás hatására a hőelemes áramkör inhomogén szakaszában a többi szakasztól eltérő elektromos feszültség keletkezik, akkor ez mérési hibához vezet.

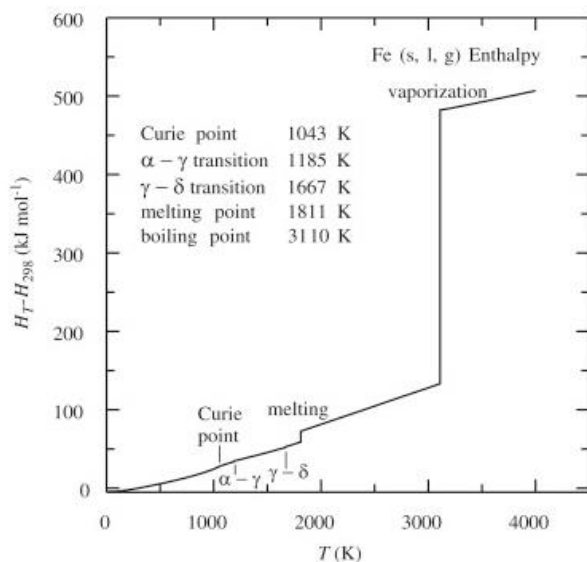
Hőelemek nagy pontosságú, fixpont kemencékben és termosztátokban végzett kalibrálása során, valamint etalon hőelemekkel végzett magas hőmérsékletű nemzetközi körmérések során szükséges az inhomogenitás-tesztek elvégzése. Az erre használatos hagyományos módszer lényege a folyadékos termosztátba merített hőelem bemerülési mélységének változtatása [3]. Ezen módszer hátránya, hogy nehezen megvalósítható. Ezért az iparban helyszíni méréseknél az inhomogenitás veszélyének elkerülése érdekében a hőelem-kötegeket gyakran lecserélik, ezzel biztosítva a mérések minőségének folytonosságát és a termelési folyamatok szabályozásának optimális szinten tartását.

A 18RPT03 EMPIR kutatási projekt fő célkitűzése volt olyan új módszerek kifejlesztése, amelyek lehetővé teszik hőelemek teljesítőképességének minél pontosabb meghatározását.

2 AZ ÚJ MÓDSZER ELMÉLETI ALAPJAI

Hőelemek inhomogenitásának meghatározására kifejlesztett módszer a Curie-pont elvén alapul. A Curie-pont az a hőmérséklet, amelynél egy adott ferromágneses fém elveszíti mágneses tulajdonságait, ezáltal konstans hőmérsékletet hozva létre.

A vas (Fe) Curie-pontját az 1. ábra mutatja be. Egy anyag mágneses szuszceptibilitása (χ) megmutatja, hogy az anyagra ható mágneses tér milyen mértékben mágnesezi át ezt az anyagot.



1. ábra: Ferromágneses anyag Curie-pontja

A mágneses szuszceptibilitás kifejezhető az egységnyi térfogatra eső mágneses momentum (M) és a mágneses tér (H) arányával, valamint meghatározható a Curie-állandó (C) és a Curie-ponti hőmérséklet (T) segítségével.

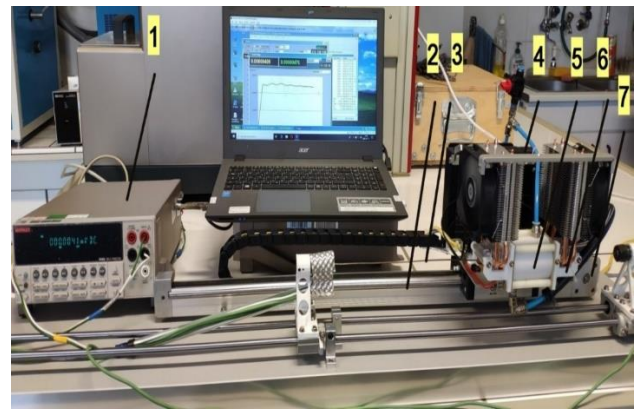
$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{M \cdot \mu_0}{B} = \frac{C}{T} \quad (3)$$

Amikor az adott anyag eléri a Curie-ponti hőmérsékletet, a mágneses permeabilitása és ezáltal a felvett energiája is

nagymértékben lecsökken, ami egy állandó hőmérsékleti értéken tartja. Példák különböző ferromágneses anyagok Curie-ponti hőmérsékletére: gadolínium 20 °C, nikkel 360 °C, vas 760 °C, kobalt 1100 °C. Ha a kemence fémtestje ilyen anyagból készül, akkor a Curie-pontjára jellemző tulajdonsága által megvalósul a kemence önszabályozó képessége.

3 HŐELEMENK INHOMOGENITÁSÁT MONITOROZÓ BERENDEZÉS (TIMF) MEGVALÓSÍTÁSA

A hőelemek tesztelésére szolgáló TIMF berendezés (2. ábra) működési elve, hogy a vizsgálni kívánt hőelem (3) hossza mentén mozgatunk egy miniatűr csökemencét (5).



2. ábra: Mérési összeállítás



3. ábra: Ferromágneses fémtest és fűtő tekercs

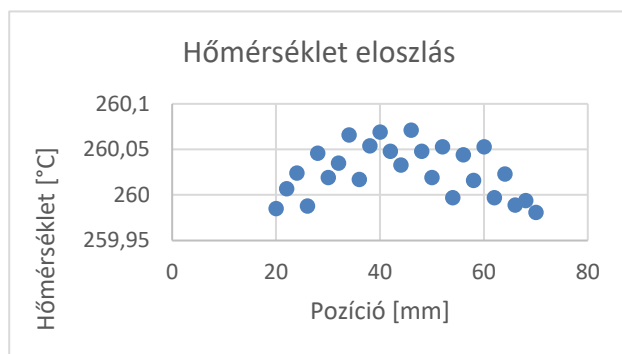
A miniatűr csökemence mozgását léptetőmotor (7) biztosítja egy meghatározott pálya (2) mentén mindkét irányban. A vizsgált hőelem egy multiméterhez (1) kapcsolódik, lehetővé téve a számítógépes adatgyűjtést és a mérések grafikus ábrázolását. A kemence és a hőelem hűtését folyadékos, valamint ventilációs hűtőegységek (4 és 6) biztosítják.

A csökemencétől azt várjuk el, hogy biztosítsa a rajta átfutó hőelem-szakasz stabil és egyenletes hőmérsékletét. E kívánalmak lehető legjobb megközelítésére speciális megoldást választottunk. A kemence magja egy indukciós módon fűtött, ferromágneses anyagból készült fémhenger, tengelyében a hőelemet befogadó átmenő furattal. A kemence a ferromágneses blokk anyagának Curie-pontján üzemel. Ha bármilyen hőt von el a blokkból, és ezért csökken a hőmérséklete, a permeabilitás nőni kezd, és a

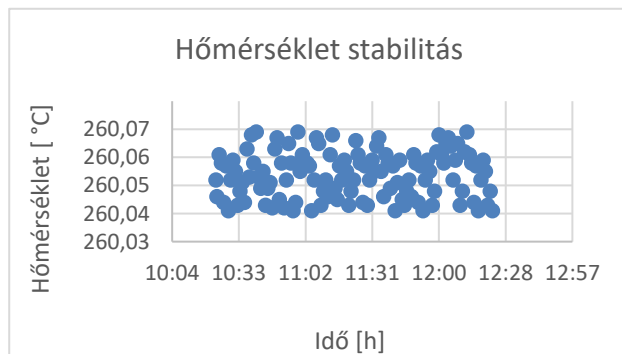
teljesítményfelvétel fokozódik, ezáltal az elvont hő pótlódik.

A csőkemence fémtestjének hossza 50 mm, átmérője 10 mm, furata 2,5 mm (3. ábra), anyaga Invar36, amely 36%-os nikkel ferromágneses ötvözet és Curie-pontja 260 °C-on biztosítja stabilan az állandó hőmérsékletet és a folyamatos önszabályozó működést.

Amint elértük a 260 °C-os Curie-ponti hőmérsékletet, drasztikusan lecsökken a fémtest anyagának permeabilitása, ami által a kemence által felvett energia is, biztosítva az állandó hőmérsékleti platót. Ha a kemence szélei hőt veszítenek, életbe lépteti önszabályozási képességét azáltal, hogy a széleken megnöveli a permeabilitást, kompenzálva az elvesztett hőt. A 4. és 5. ábrán látható, hogy a miniatűr kemence biztosítani tudja a 0,1 °C-os hőmérséklet-eloszlást és a 0,03 °C-os hőmérséklet stabilitást.



4. ábra: Axiális hőmérséklet eloszlás a kemencében



5. ábra: Hőmérséklet-stabilitás a kemencében

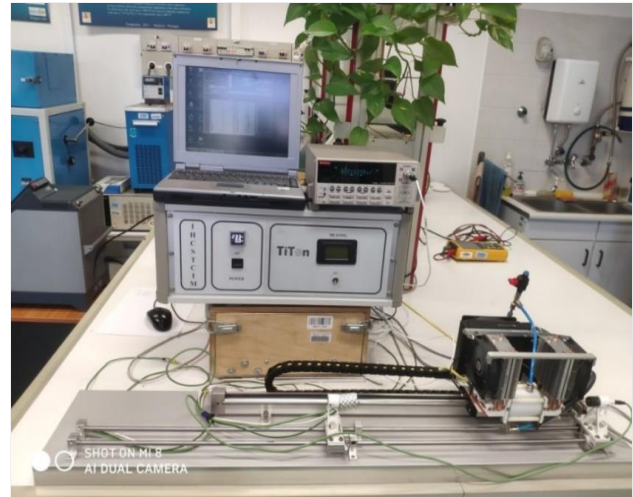
A Curie-pontos jelenséget alkalmazva, az önszabályozó folyamat megvalósításához szükséges az optimális frekvencia-átmérő arány meghatározása, a mi esetünkben az alkalmazott frekvencia 1250 Hz.

A TIMF berendezés úgy viselkedik, mint egy két-gradiensű szkennerek, mivel a hőelemek inhomogenitásának tesztelése a kemence be- és kilépő szakaszán történik, az adott hőmérséklet-gradiens megvalósításával. Ez a hőmérséklet-gradiens a hőelem 4 mm-es szakaszát érinti. A miniatűr Curie-pontos kemence alkalmazásának lényege, hogy biztosítani tudja a pontosan meghatározható méretű és pozíciójú hőmérséklet-gradienst az elemezni kívánt hőelemen.

4 K-TÍPUSÚ KÖPENYHŐELEMENK INHOMOGENITÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Az elvégzett mérések egy részénél K-típusú (Cr-Al) köpenyhőelemeket használtunk, amelyeknek magas a szenzitivitásuk és hőállóságuk. A köpenyhőelemek különleges célokra készülnek. A fém védőcsövet, az aprószemcsés kerámia szigetelést és a hőelem huzalokat egy nagyobb átmérőjű egységből hengerlik vékonyabbra. Így egész vékony (0,2 ÷ 8 mm külső átmérőjű), hajlékony hőelemeket is elő tudnak állítani igen nagy hosszban.

A mérések megkezdése előtt a köpenyhőelemet rögzítjük a berendezés pályája mentén. A hőelem vizsgált szakaszán elhelyezünk egy speciális csőkemencét (6. ábra).



6. ábra: TIMF berendezés

A kemence belépő- és kilépő felületén egy pozitív és egy negatív hőmérséklet gradiens jön létre. Amennyiben a két szakasz Seebeck-együtthatója nem egyezik meg, ez a kimenő elektromos feszültségben jelentkezik. A csőkemencét végighúzzuk a hőelemen és begyűjtjük a pozíció függvényében mért elektromos feszültség adatokat, majd a kísérleti úton kapott feszültség görbéből numerikus módszerrel meghatározzuk az inhomogenitás-függvényt. A csőkemence mozgása automatizált, és a hőelem hossza mentén mindkét irányban megvalósítható.

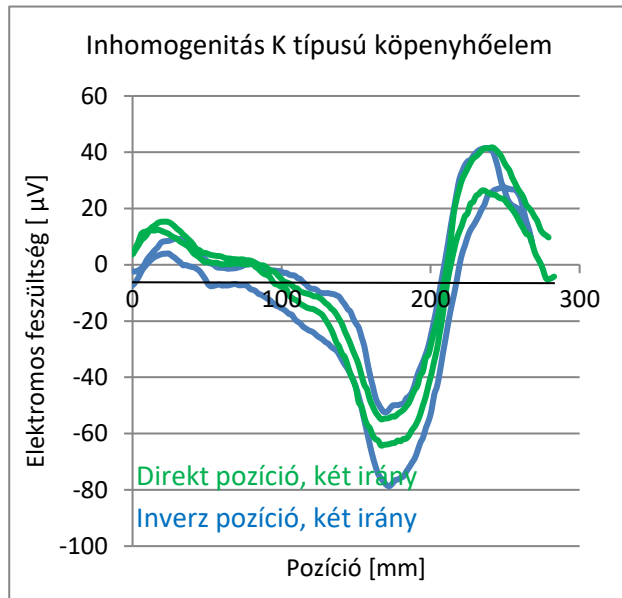
Összekapcsolva és azonos környezeti hőmérsékleten tartva a hőelem melegpontját és hidegpontját, a hőelem által kiadott elektromos feszültség nulla kell hogy legyen. Ebből következik, hogy a hőelem vizsgált szakaszán jelentkező elektromos feszültségváltozást az inhomogenitása okozza. A miniatűr Curie-pontos kemence mozgását, valamint a mérést vezérlő programot és az adatok gyűjtését az ezekre a célokra kifejlesztett szoftverek végzik.

A csőkemencére jellemző egy gyors, 8 perces időtartamú felfűtési idő és képes maximum 2 mm-es átmérőjű köpenyhőelemek vizsgálatára. Az egyes lépéseket követően a hőmérséklet stabilizálódását rövid, 20 másodperces mérési periódusok követik. A hőelem hossza mentén mozgatva a csőkemencét kísérleti úton meghatározható az a diagram, amely az elektromos feszültség változását ábrázolja.

Kezdetben befogjuk a K-típusú köpenyhőelemet a berendezésbe direkt pozícióban, és elvégezzük a hossza mentén az inhomogenitás-vizsgálatot oda-vissza (bal és jobb irány), majd megfordítjuk a hőelemet és inverz pozícióban is végigpásztázzuk oda-vissza.

A TIMF berendezés validálása két feltétel teljesüléséhez kötött. Az egyik feltétel azon mérési eredmények elemzéséből adódik, amelyeket egy adott hőelemen, különböző befogási pozíciókban és tesztelési irányokban végeztünk. A másik feltétel különböző hőelemek méréseinek összevetéséből adódik.

A 7. ábrán látható egy adott K-típusú köpenyhőelemen végzett mérések eredménye.

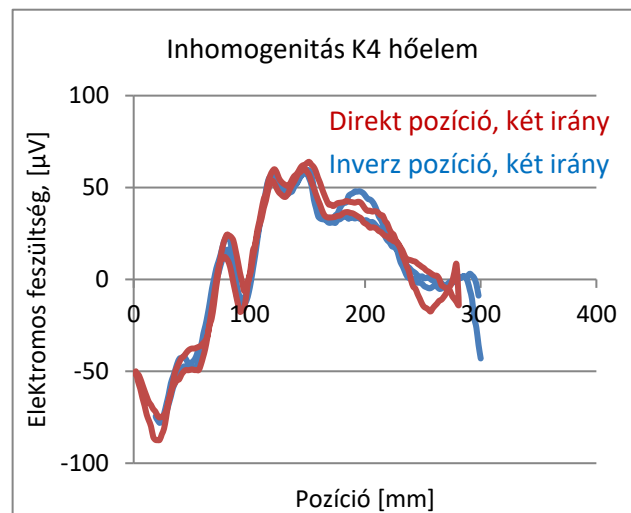


7. ábra: K-típusú köpenyhőelem inhomogenitás mérése

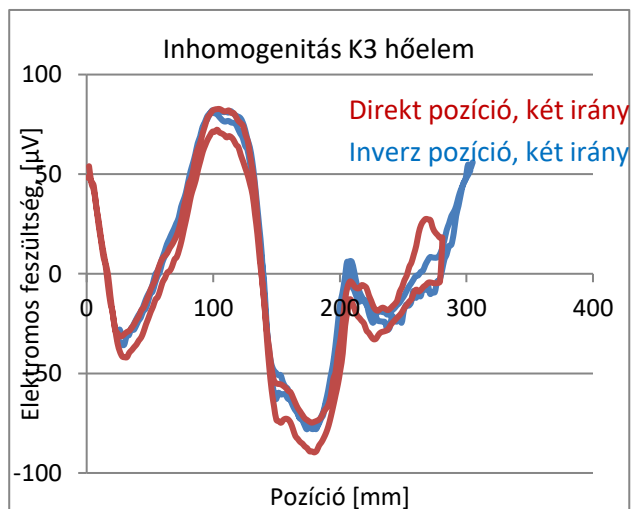
és inverz), és a két különböző tesztelési irányban (bal és jobb) végzett mérések esetén. A második feltétel esetében az ellenkezője elvart, tehát hogy a különböző hőelemek inhomogenitás-görbéinek ne legyen azonos jellegük.

Elemelve a görbék jellegét bármelyik befogási pozícióra vagy tesztelési irányra, jól látható, hogy ezek azonos jellegűek, tehát az első feltételben megfogalmazott elvárásunkat a TIMF berendezés teljesíti.

A 8. és 9. ábrákon két különböző K-típusú hőelemen végzett inhomogenitás-görbék láthatóak, bizonyítva a második feltétel teljesülését is, mivel a két hőelemnek különböző jellegű az inhomogenitás-diagramja, miközben egy adott hőelemre vetítve nem függ annak befogási pozíciójától és tesztelési irányától.



9. ábra: Különböző hőelemek inhomogenitási tesztje



8. ábra: Különböző hőelemek inhomogenitási tesztje

Tekintetbe véve az első feltételt, egy adott hőelemre vonatkoztatva szükséges a görbék egybeesése mind a négy esetben, vagyis a két különböző befogási pozícióban (direkt

5 KÖVETKEZTETÉSEK

Az alkalmazott egyedi módszer lényege különböző anyagoknak a Curie-pontban tanúsított viselkedése, vagyis a kapott plató hőmérséklete függ attól, hogy a csökkenése melyik ferromágneses anyagból készült. Különböző hőmérsékletű platók különböző Curie-pontú anyagból készült fémtömbbel valósíthatók meg.

A Curie-pontos kemencének, az önszabályozó képességnek köszönhetően, a gyors felfűtést követően túllövésmentesen beáll az egyensúlyi hőmérséklete, megfelelő hőmérséklet-eloszlást és stabilitást biztosítva. Ezért úgy tekinthető, mint egy olyan különleges kemence, amely úgy működik, mintha számtalan zóna-fűtése lenne, azonnali jelfeldolgozással. Az eddig használt fixpontos módszerhez képest, amely a fémek fázisátalakulásához köthető hőmérsékleti platón alapul, a Curie-pontos módszernek számos előnye van. Az egyik ilyen előnye, hogy egyszerűbb, olcsóbb és szélesebb körben alkalmazható az ipari felhasználók által, így jelentősen megkönnyíti az S- és K-típusú szabványos hőelemek vizsgálatát. A másik fontos előnye, hogy a párórás hőmérsékleti plató helyett végtelen hosszú platót biztosít. Ezenkívül az is nagy előnye, hogy használat közben az

alkalmazott fém szilárd marad, ezáltal sokkal kevésbé érzékeny a szennyeződésre és a nyomásváltozásra.

Mivel a hőelemeket nagyon magas hőmérsékletek mérésére használjuk, akár 1600 °C-ig, a fokozott hőigénybevétel miatt elveszíthetik homogenitásukat. Ezért fontos vizsgálni az inhomogenitást a hőelem hossza mentén, ezáltal jelentősen növelhető a mérések pontossága és csökkenthető a mérési bizonytalanság.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Arifovic N, Sestan D, Zvizdic D, Hozic N, Turzo-Andras E, Cohodarevic S, Strnad R, Opel K, Neagu D, Bordanu C, Spasova S and Vukicevic T, A new EMPIR Project “MetForTC” for Developing Traceable Measurement Capabilities for Monitoring Thermocouple Performance, 19th International Congress of Metrology, Article 18006, 2019
- [2] Machin G, Anhalt K, Battuello M, Bourson F, Dekker P, Diril A, Edler F, Elliott C J, Girard F, Greenen A, Knazovicka L, Lowe D, Pavlasek P, Pearce J v, Sadli M, Strnad R, Seifert M, Vuelban E, The European project on high temperature measurement solutions in industry (HiTeMS) - A summary of achievements, Measurement 78, 168–179, 2016
- [3] Del Campo D, García Izquierdo C, Jose Martin M, Euramet.T-S3 Calibration of thermocouples from freezing point of Zn to melting point of the Pd-C eutectic by the temperature fixed point and comparison methods Final Report, BIPM, 2020