

Szívóssági korlátok megismerése átmeneti hőmérsékleten

The need to know the toughness limits at transition temperature

BOCZ ANDRÁS – KISS BALÁZS – MÁRKUS DÉNES – NARANCSIK ZSOLT – VAINEL VIKTOR

Dunaferr Labor Nonprofit Kft.

A Charpy-féle ütővizsgálat 1901 óta gazdagítja ismereteinket az acélok szívós tulajdonságairól [8], a műszaki életben dolgozók vagy műszaki oktatásban résztvevők nagy valószínűséggel találkoztak már vele. A magyar nyelvű szakirodalom az ütővizsgálatnál szinte mindig megemlíti az átmeneti hőmérséklet jelenségét is, ezeket látványos „S” alakú diagramokon jelenítik meg. A példaábrák többségükben „megrajzolt” elvi görbék, tényleges mérési adatok nélkül és a megtalált irodalmi források nem tárgyalják teljes mélységben ezt a témakört.

A szívós–rideg átmenet a fémeknél és acéloknál gyakran megfigyelhető jelenség, amely a fémek törési viselkedésében a magas hőmérsékleten kialakuló képlékeny (stabil) törésről alacsony hőmérsékleten törékeny (instabil) törésre való változásának felel meg. A törési mód változása általában egy bizonyos hőmérséklet-tartományban történik, amelynek középpontjában egy adott hőmérséklet áll, amelyet szívós–rideg átmeneti hőmérsékletnek vagy az angol nyelvű irodalomban DBTT-nek (Ductile–Brittle Transition Temperature) neveznek. A magyar szakirodalomban a TTKV jelölés vált ismertté (TT: Transition Temperature, K az ütőérték V bemetszésű próbán) [1].

A különböző rácsszerkezetű fémek eltérően viselkednek. A térközepes köbös (BCC: body-centered cubic) kristályszerkezetű fémek jellemzően szívós–rideg átmenetet mutatnak, mivel nem rendelkeznek olyan egymásra épülő csúszási síkokkal, amelyek lehetővé teszik a diszlokációk könnyű vándorlását, ezért ezekben az anyagokban a diszlokációk mozgása termikus aktiválást igényel. Az alacsony hőmérsékleten drasztikusabb mechanizmusok – például kötéstörés – indulnak be az alkalmazott feszültség hatására [1].

Nukleáris szerkezeteknél, hegesztett kötéseknel, nyomástartó edényeknél fontos ismerni a szerkezetbe épített anyagok átmeneti hőmérsékletét, mert a tervezéskori méretezés az alapanyagra történik. Ezért már nagyon korán felmerült az igény az anyagok szívóssági korlátainak megismerésére [2].

Ez a cikk azért született, hogy áttekintést adjon az átmeneti hőmérsékletről és a nemzetközi szakirodalomból ismeretes modellezéséről a saját méréseink bemutatásával.

Kulcsszavak: szívóssági korlátok, átmeneti hőmérséklet

Charpy's impact test has been enriching our knowledge of the toughness properties of steels since 1901 [8], and anyone working in engineering or involved in engineering education is likely to have encountered it. In Hungarian literature, the phenomenon of transition temperatures is almost always mentioned in the impact test, and these are represented in spectacular 'S' diagrams. Most of their examples are 'plotted' theoretical curves without actual measurements and the literature sources available do not cover this subject in full depth.

The ductile-to-brittle transition is a commonly observed phenomenon in metals and steels, corresponding to the change in fracture behaviour of metals from ductile (stable) fracture at high temperatures to brittle (unstable) fracture at low temperatures. The change in fracture mode usually occurs over a range of temperatures centered on a specific temperature, known as the Ductile–Brittle Transition Temperature or DBTT in English literature. In Hungarian literature, the term TTKV (TT: Transition Temperature) has become known [1].

Different metals with different lattice structures behave differently. Metals with a body-centered cubic (BCC) crystal structure typically display ductile-to-brittle transition properties, as they do not exhibit close-packed planes that allow for easy migration of dislocations and therefore the movement of dislocations in these materials requires thermal activation. At low temperatures, more drastic mechanisms, such as bond breaking, are triggered by the applied stress [1].

For nuclear structures, welded joints and pressure vessels, it is important to know the transition temperature of the materials incorporated in the structure, because the design is scaled to the base material. Therefore, the need to know the toughness limits of materials arose very early [2].

This article has been written to give an overview of the transition temperature and its modelling in international literature by presenting our own measurements.

Keywords: toughness limits, transition temperature

1. Az átmeneti hőmérséklet és háttere

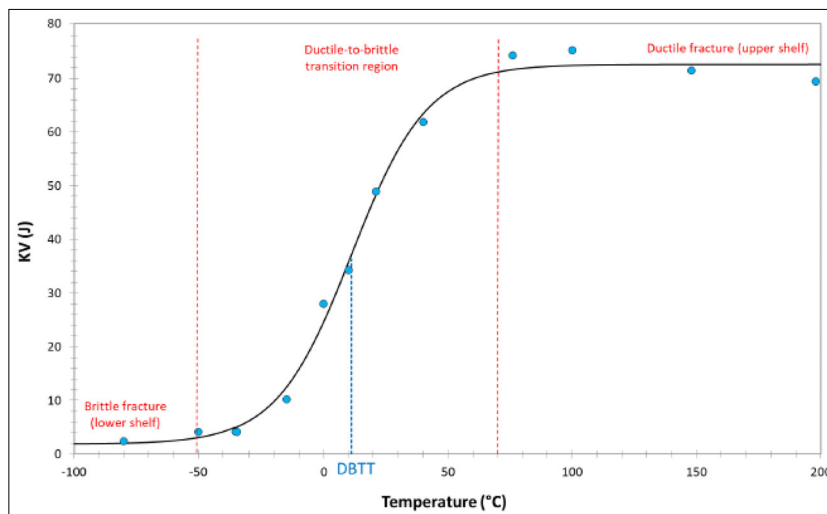
1.1. Szívós–rideg átmenet

A szívós–rideg átmenet a fémeknél és acéloknál gyakran megfigyelhető jelenség, amely a fémek törési viselkedésében a magas hőmérsékleten kialakuló képlékeny (stabil) törésről alacsony hőmérsékleten törékeny (instabil) törésre való változásának felel meg. A törési mód változása általában egy bizonyos hőmérséklet-tartományban történik, amelynek középpontjában egy adott hőmérséklet áll, amelyet szívós–rideg átmeneti hőmérsékletnek vagy az angol nyelvű irodalomban DBTT-nek neveznek. A magyar szakirodalomban egységesen a TTKV jelölés honosodott meg.

A szívós–rideg átmenet jelensége azért következik be, mert egyes fémekben a képlékeny zóna kialakulása hőmérsékletfüggő folyamat. Az 1. ábrán látható „upper shelf (US)” szívós alakváltozási hőmérsékleten elegendő hőenergia van a kristályszerkezetben ahhoz, hogy megkönnyítse a diszlokációk [12] mozgását külső feszültség hatására. Ez lehetővé teszi a plasztikus zóna kialakulását a repedés csúcán, elő-

a szívós–rideg átmenet, alacsony hőmérsékleten is megőrzik szívósságukat. A kristályszerkezetükben található csúszási síkok nagy száma alacsony hőmérsékleten is lehetővé teszi a diszlokációs mozgás létrejöttét.

- ❑ A legtöbb hexagonális rácsszerkezetű fém (HCP: hexagonal close packed crystal structure), beleértve a magnézium- és α -titanótvözeteket, szintén nem mutat átmeneti viselkedést.
- ❑ A térközepes köbös (BCC: body-centered cubic) kristályszerkezetű fémek jellemzően szívós–rideg átmenetet mutatnak, mivel nem rendelkeznek olyan egymásra épülő csúszási síkokkal, amelyek lehetővé teszik a diszlokációk könnyű vándorlását, ezért ezekben az anyagokban a diszlokációk mozgása termikus aktiválást igényel. Az alacsony hőmérsékleten drasztikusabb mechanizmusok – például kőtörés – indulnak be az alkalmazott feszültség hatására [1].

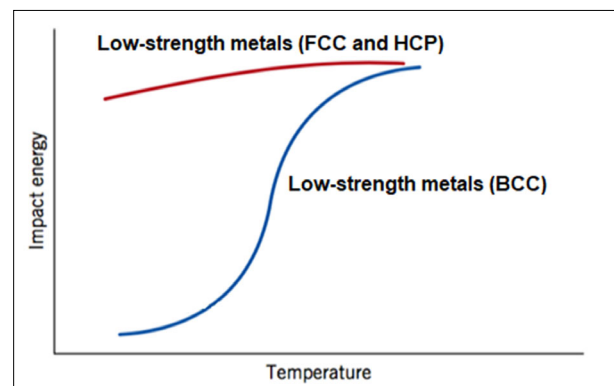


1. ábra. Kis szilárdságú acél átmeneti hőmérsékleti diagramja

segítve ezzel a repedésképződést és a képlékeny (stabil) törés terjedését. A hőmérséklet csökkenésével azonban a diszlokáció mozgását elősegítő hőenergia csökken, ami megnehezíti a képlékeny zóna kialakítását a bemetszés vagy a már meglévő repedés csúcán, lásd az ábra „lower shelf (LS)” részét. A DBTT alatt a diszlokáció mobilitása és a plasztikus zóna mérete gyorsan csökken, ami a törési szívósság jelentős csökkenését eredményezi. Miután a diszlokáció elcsúszása gyakorlatilag lehetetlen, a fém törékeny (instabil) repedésterjedés következtében eltörik [1].

A különböző rácsszerkezetű fémek eltérően viselkednek:

- ❑ A lapközepes köbös (FCC: face-centered cubic) kristályszerkezetű fémeknél nem jellemző



2. ábra. Átmeneti hőmérséklet sematikus ábrája a lapközepes FCC, hexagonális HCP és a térközepes BCC rácsszerkezetű fémeknél

Nukleáris szerkezeteknél, hegesztett kötéseknel, nyomástartó edényeknél fontos ismerni a szerkezetbe épített anyagok átmeneti hőmérsékletét, mert a tervezéskori méretezés általában a szívós állapotú alapanyagra történik. Ezért már nagyon korán felmerült az igény az anyagok szívóssági korlátainak megismerésére [2].

A szakirodalom szerint a törésmechanikai vizsgálatok drágák és időigényesek, és túl nagy próbatestméret szükséges hozzájuk, ami például a nukleáris iparágban nem kivitelezhető. A törésmechanikai szimulációkhoz a „V” bemetszésű próbatestek Charpy-féle ütővizsgálat eredményeit használják fel, a viszonylag kis próbatestmérettel jól használható a szívósság hőmérsékletfüggő változásának méréséhez.

A reaktorok üzemidejének előrehaladásával a vele egyidős, besugárzott minták száma véges. Néhány kutató extra kisméretű ütőpróbatestekkel végez kísérleteket, mások a folyáshatár és a műszerezett ütővizsgálat erő–idő adataiból próbálnak következtetéseket levonni az anyag szívóssági határára. Többen az átmeneti hőmérséklet adatait matematikailag modellezik. Ezek a modellek a kis mennyiségű mérési eredmény birtokában becslést adhatnak az anyag felhasználhatóságára.

A kisméretű, nem szabványos ütővizsgálatokkal és az anyag folyáshatárából történő becsléssel nem foglalkozunk, de a matematikai modellek közül ötöt részletesen bemutatunk.

1.2. Modellek és William Oldfield

William Oldfieldnek 1975-ben, az ASTM szabványosítási újságban jelent meg a „Curve fitting impact test data: a statistical procedure” című cikke. Oldfield véleménye szerint a szívósság az anyagnak az a képessége, hogy ellenálljon a repedés kialakulása által okozott meghibásodásnak [2]. A fémek szívóssági tulajdonságait leggyakrabban a Charpy-féle „V” ütővizsgálattal határozzák meg. Az ingás ütőgép a „V” alakú bemetszéssel gyengített hasáb alakú próbatestet eltöri. A töréshez felhasznált energia az ütőérték.

A térközepes rácsszerkezetű fémeknél – ahogy azt az 1.1. pontban tárgyaltuk – a törési munka értéke (az acél szívóssága) hőmérsékletfüggő, ezért a vizsgálatokat vagy egy adott minimum-ütőérték elérésének ellenőrzése, vagy az alapanyagra jellemző átmeneti hőmérséklet meghatározása céljából végzik el.

Az átmeneti hőmérsékleti diagram felvételét a szívós alakváltozás hőmérsékletétől elindulva, különböző hőmérsékletre hűtött, legalább 3-3 darab próbatestet eltörésével végzik, az ütőértékek átlagát a hőmérséklet függvényében ábrázolják. A diagram egy szigmoid függvény, közel szimmetrikus viselkedést mutat az induló és a megállapodó tartományban. Van egy kezdeti monoton felfutási szakasza, egy középső, változást mutató szakasza, majd egy újabb monoton szakasz következik. Ezek a szakaszok egy „S” betűre, vagy a görög kis szigma betűjelére emlékeztető grafikon képét alkotják [7].

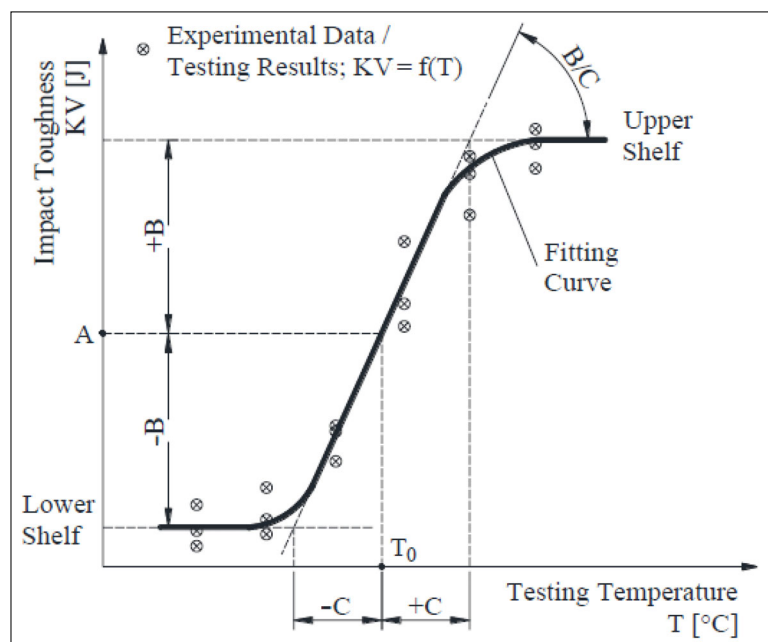
Az ütési energián kívül (KV, J) két további utólagos mérést is végezhetünk az eltört mintákon:

- **Kitüremkedés, laterális expansió (LE, mm):** a próbadarab vastagságának növekedése, amelyet a törés által kiváltott képlékeny deformáció okoz. Az expansiót a törött mintafeleken a képlékeny deformáció magasságaként kell mérni [4].
- **Szívós töret mérése (SFA: Shear Fracture Appearance, %):** a szívós töret területének aránya a teljes területhez viszonyítva. Az LS tartományban várhatóan az SFA értéke 0%, az US tartományban 100% az 1. ábra szerint.

Mindhárom mérés (KV, LE és SFA) az 1. ábrán láthatóhoz hasonló átmeneti viselkedést mutat a BCC fémeknél.

1.2.1. Szimmetrikus hiperbolikus tangens modell, HT – Symmetric [2]

Mint ahogy írtuk, az átmeneti hőmérsékleti diagram egy szigmoid függvény, jól modellezhető hiperbolikus tangens (tanh) függvénnyel vagy normál integrállal.



3. ábra. Oldfield nemlineáris regressziós modellje

Oldfield javaslata a szimmetrikus hiperbolikus tangens modell használatára:

A 3. ábrán látható diagramból az alábbi egyenlet írható fel:

$$Y = A + B \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right). \quad (1)$$

Az (1) képletben Y az ütési energia/munka, T a hőmérséklet, az A , B , T_0 és C pedig regressziós eljárással meghatározott, beállítható paraméterek.

A nemlineáris regressziós görbék illesztésére számos más megoldás is létezik. Jól használható a Taylor-soros linearizációs megközelítés. Az (1) egyenletet Taylor-sorokkal kibontva az alábbi összefüggéseket kapjuk:

$$Y = A + B \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right) + \frac{\partial Y}{\partial T_0} \delta T_0 + \frac{\partial Y}{\partial C} \delta C, \quad (2)$$

azaz

$$Y = A + B \tanh x \left(\frac{B}{C}\right) \delta T_0 \operatorname{sech}^2 x + \left(\frac{B}{C}\right) \delta C x \operatorname{sech}^2 x. \quad (3)$$

A sech a szekáns hiperbolikus függvény. Az $x = (T - T_0)/C$, a δT_0 és δC a T_0 és C olyan változatai, amelyek legjobban illeszkednek az adatokhoz. A regressziós lépéseket egymás után végrehajtva az (1) egyenletet kapjuk vissza.

1.2.2. Aszimmetrikus hiperbolikus tangens modell, AHT – Asymmetric [1]

A modell az előző HT modellből származik, T_0 helyett már a DBTT jelölést használja. Új elemként

tartalmazza a D paramétert, amelynek értéke meghatározza, hogy a regressziós görbe alakja mennyiben tér el az alsó és felső régiókban egymástól. Az AHT modell matematikai egyenlete:

$$Y = A + B \tanh\left(\frac{T - DBTT}{C + DT}\right), \quad (4)$$

amely az alábbi alakban is felírható:

$$Y = \frac{LS + US}{2} + \frac{US - LS}{2} \tanh\left(\frac{T - DBTT}{C + DT}\right). \quad (5)$$

A további a D paraméter a regressziós görbe aszimmetriáját számszerűsíti. Ha $D = 0$, a görbe szimmetrikussá válik, és egybeesik HT modellel. Ha $D < 0$, a görbület az alsó átmeneti tartományban nagyobb lesz, mint a felső átmeneti tartományban, és az ellenkezője történik, ha $D > 0$.

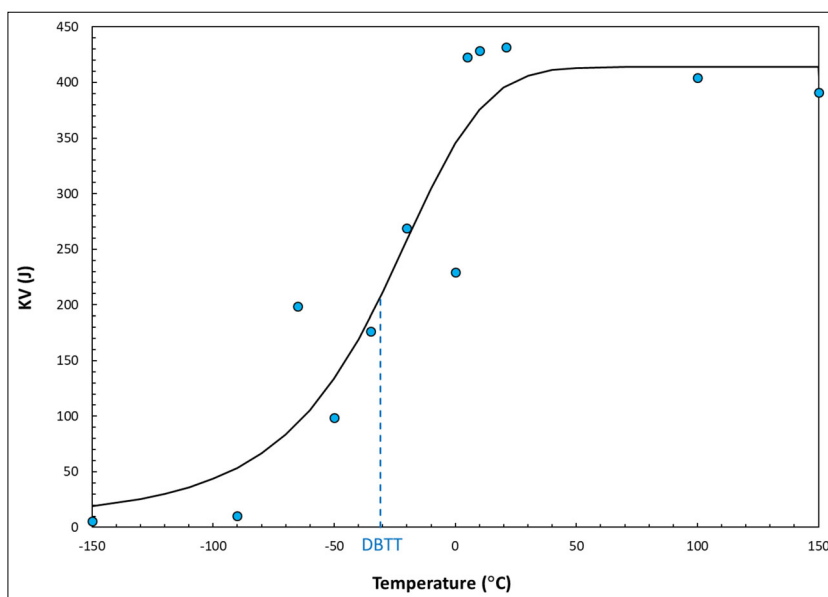
1.2.3. Aszimmetrikus BURR-modell, BUR – Asymmetric [1]

A valószínűségelméletben, a statisztikában és az ökonometriában használják a Burr-eloszlást, amely egy nemnegatív valószínűségi változó folytonos valószínűségi eloszlása.

A BUR-modellt a következő egyenlet definiálja:

$$Y = LS + (US - LS)[1 + e^{-k(T - T_0)}]^{-m}, \quad (6)$$

ahol az utolsó tagban szereplő $[1 + e^{-k(T - T_0)}]^{-m}$ a tényleges BURR-eloszlás. Az LS és az US mellett a regressziós eljárással meghatározandó paraméterek a következők:



4. ábra. Példa az AHT átmeneti görbére, ahol $D < 0$

- k – az eloszlás skálaparamétere ($k \geq 0$),
 m – az eloszlás alakparamétere ($m \geq 0$),
 T_0 (°C) – egy helyparaméter, amely meghatározza a görbe helyzetét a hőmérsékleti tengely mentén, és általában nem felel meg a DBTT-nek.

A BUR átmeneti görbére egy példa látható az 5. ábrán.

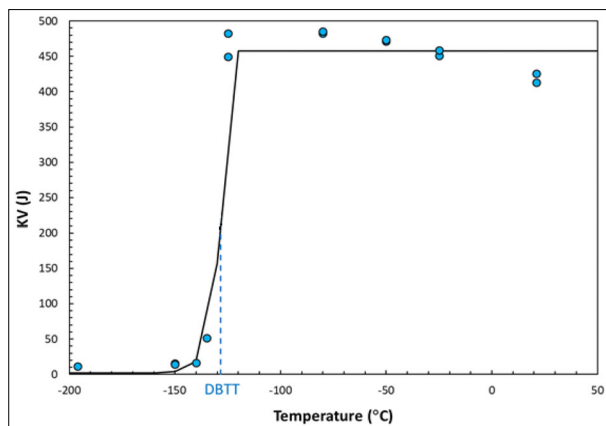
1.2.4. Arcus tangens modell, ACT – Symmetric [1]

Kohout egy viszonylag egyszerű regressziós modellt javasolt a széles körben népszerű HT modell alternatívájaként. A modell az arcus tangens trigonometrikus függvényen alapul, a következő formában:

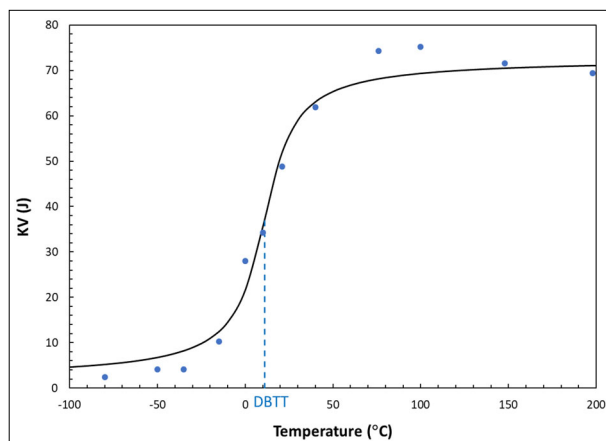
$$Y = \frac{LS + US}{2} + \frac{US - LS}{2} \arctan \left[\frac{\pi}{2C} (T - DBTT) \right], \quad (7)$$

ahol a C és a DBTT paraméterek jelentése ugyanaz, mint a HT modellnél.

A legjelentősebb különbség a HT és az ACT modellek között az, hogy az utóbbi átmeneti görbe gör-



5. ábra. Példa a BURR átmeneti görbére



6. ábra. Példa az ACT átmeneti görbére

bülete az alsó és felső átmeneti régiókban sokkal nagyobb, mint a HT modellben. Ezenkívül az alsó és a felső tartományok gyakran enyhén csökkenő/növekvő trendeket mutathatnak, amint az a 6. ábra ACT görbén látható.

1.2.5. Aszimmetrikus Kohout-modell, – Asymmetric KHT [1]

Egy másik regressziós modell, amelyet Kohout a 2012-es jelentésében javasolt, egy aszimmetrikus modell, amely a következő „kétrészes” formájú:

$$Y = LS + \left(\frac{US - LS}{1 + p} \right) \exp \left\{ \frac{1 + p}{2C} (T - T_0) \right\}, \quad T \leq T_0, \quad (8)$$

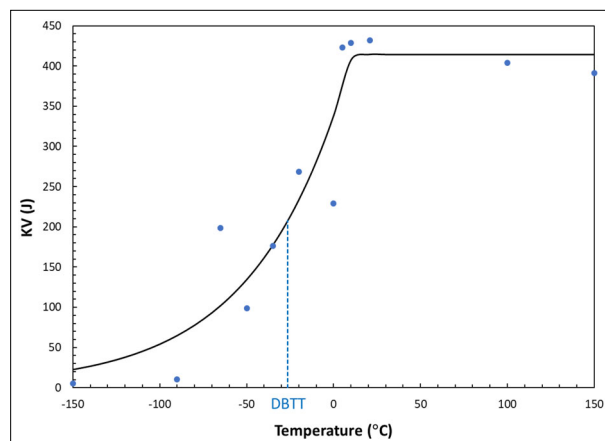
$$Y = LS - p \left(\frac{US - LS}{1 + p} \right) \exp \left\{ \frac{1 + p}{2C} (T - T_0) \right\}, \quad T > T_0. \quad (9)$$

Itt p az aszimmetria paramétere, és megfelel a regressziós görbe görbületei közötti aránynak a felső és az alsó átmeneti tartományban (ha $p > 1$, a görbület az alsó átmeneti tartományban nagyobb, mint a felső átmeneti tartományban). A BUR-modellhez hasonlóan a T_0 a görbe helyparamétere az x tengelyen, és általában nem felel meg a DBTT értékének. A C viszont ugyanazt jelenti, mint a HT, AHT és ACT modellekénél.

1.2.6. Egyéb regressziós modellek

Más irodalmi források a fentiektől eltérő regressziós modelleket használnak, ezek közül megemlítenek néhányat:

- exponenciális görbék,
- hibafüggvények,
- Boltzmann-eloszlás,
- Weibull-eloszlás,
- Avrami-egyenleten alapuló modell [1].



7. ábra. Példa az KHT átmeneti görbére

2. Mérések és modellek

2.1. NIST [1]

A National Institute of Standards and Technology (NIST) 1901-ben alakult, és jelenleg az Egyesült Államok Kereskedelmi Minisztériumának része, az USA egyik legrégebbi fizikai tudományos laboratóriuma. Elsősorban méréssel, mérési technológiák kidolgozásával és szabványosítással foglalkozik. Egyik programjuk a Charpy-féle ütőgépek „távellenzése”, amellyel az általuk küldött próbatesteket a felhasználók megvizsgálják, majd az eredményét visszaküldik nekik. A NIST az eredmények alapján jelzi, hogy a berendezés jól működik-e, vagy valamilyen beavatkozás szükséges.

A NIST honlapján több program található az ütőeredmények grafikus ábrázolására és nemlineáris regressziós görbék illesztésére is. A szoftverek segítségével a felhasználó a saját mérési adatait felhasználva el tudja végezni a modellek megfelelő számításait és a görbeillesztést. Az alkalmazások közül mi az MS Excelben [9] megírt programjukat választottuk, ezek eredményeit ismertetjük.

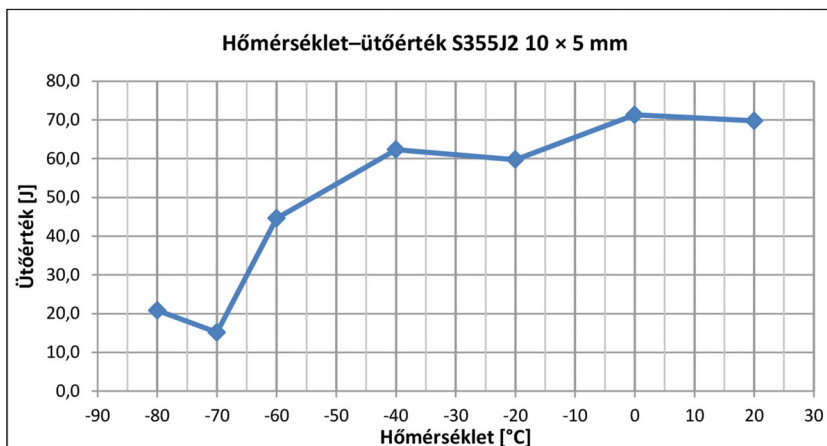
1. táblázat. Kémiai összetétel tömegszázalékban és mechanikai eredmények

S355J2						
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Cr %
0,174	0,558	0,226	0,010	0,011	0,154	0,101
Ni %	Al %	Mo %	Nb %	V %	Ti %	N %
0,043	0,047	0,009	<0,001	0,002	0,021	0,0031
R _{eH} MPa	R _m MPa	A ₅ %				
365	484	32,9				

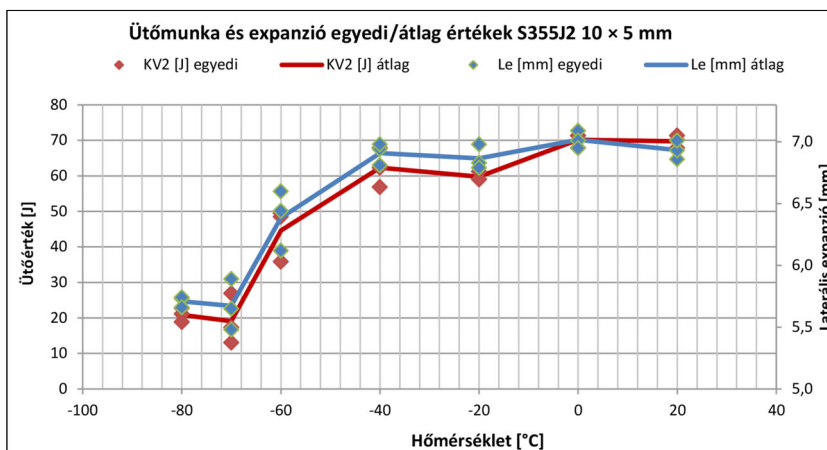
2.2. Próbatestek gyártása

A próbatestsorozatokat négy eltérő időpontban fellelhető alapanyagból gyártottuk. Három sorozat anyaga S355J2 minőségű volt, a negyedik HARDOX® 450. Az alapanyagok kémiai összetételét – és ahol lehetett – szakítóvizsgálatát elvégeztük.

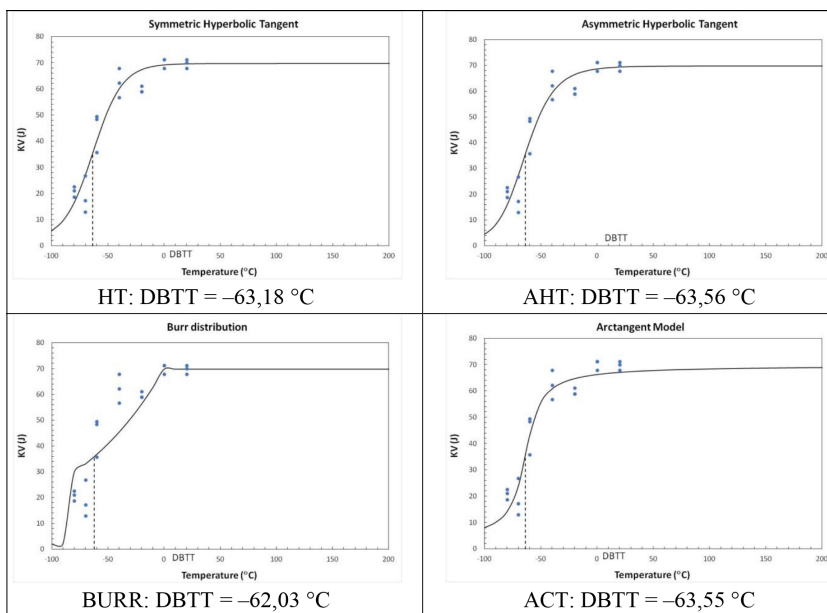
A próbatesteket CNC marógépen készítettük elő, a „V” bemetszés elkészítéséhez váltólapkás szögmarót használtunk. A próbatestek és „V” bemetszések méretét optikai úton ellenőriztük, minden próbatest



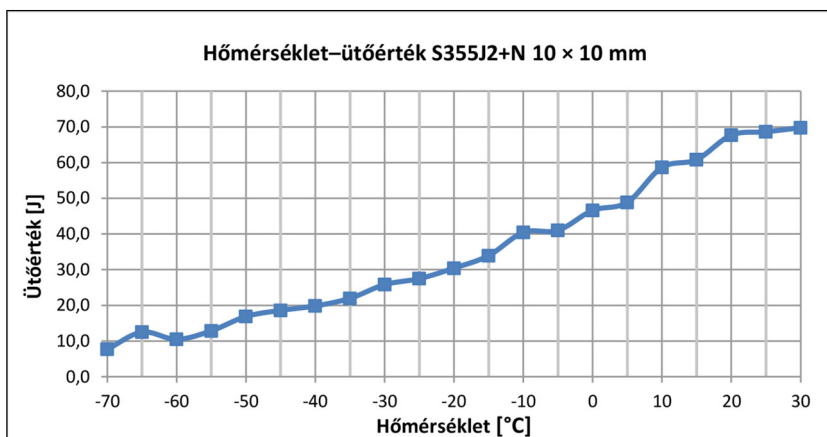
8. ábra. S355J2 10 × 5 mm ütőérték átlagok



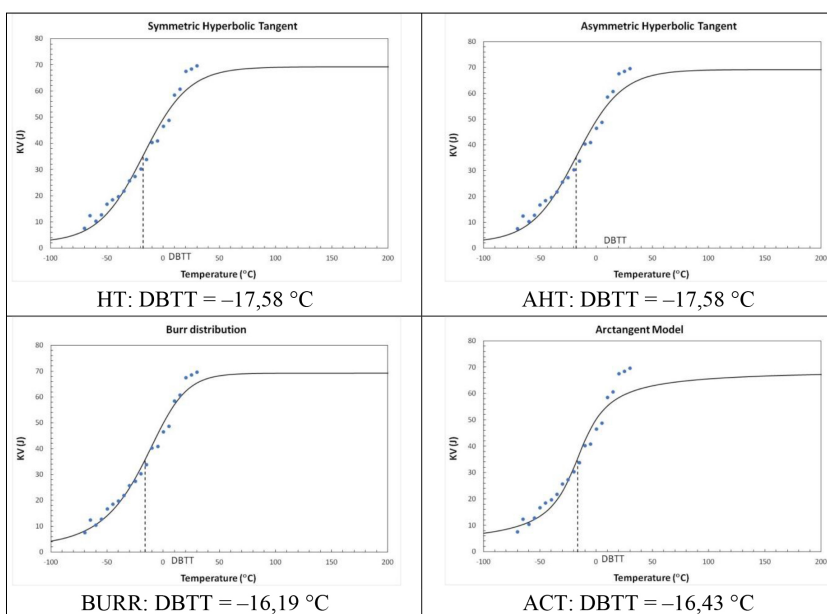
9. ábra. S355J2 ütőérték egyedi értékek és átlagok, a laterális expanzió értékei



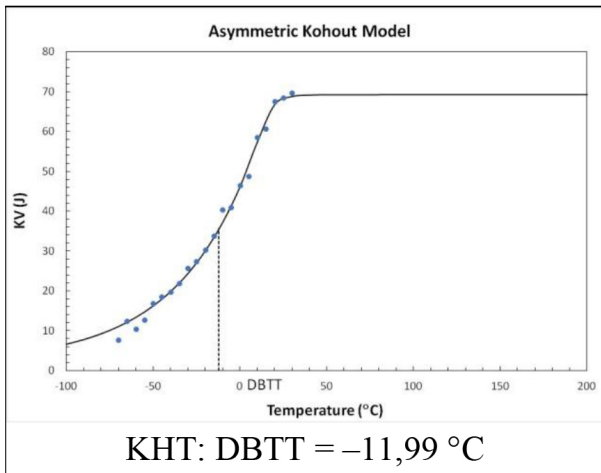
10. ábra. S355J2 ütőértékek HT, AHT, BURR és ACT modelljei



11. ábra. S355J2+N ütőértékátlagok



12. ábra. S355J2+N ütőértékek HT, AHT, BURR és ACT modelljei



13. ábra. S355J2+N ütőértékek KHT modellje

megfelelt az MSZ EN ISO 148-1:2017 szabvány előírásainak.

2.3. S355J2 minőségű acéllemez vizsgálata [10]

Elsőként 6 mm vastagságú táblalemezből munkáltunk ki próbatesteket. Az ütőértékek átlaga szerepel a 8. ábrán. Az 1. táblázat tartalmazza a lemez kémiai összetételét tömegszázalékban és a szakítóvizsgálati eredményeit.

A laterális expanzió és az ütőérték egyedi és átlagolt értékeit tartalmazza a 9. ábra. A két diagram alakja jól egyezik egymással, természetesen a függőleges léptékek eltérnek.

A NIST Excel [1] alkalmazásának eredménye a 10. ábrán látható. Négy számítási modell adott értékelhető eredményt az eredménySORra, mind a négy hasonló átmeneti hőmérsékletet határozott meg, ezek -62,03 °C és -63,56 °C közötti értékek.

2.4. S355J2+N minőségű acéllemez vizsgálata [10]

A második vizsgálati sorozatunkhoz S355J2 + N típusú, 18 mm vastagságú lemezt kaptunk. A lemezből 10 × 10 mm méretű, szabványos ütőpróbatésteget készí-

2. táblázat. Kémiai összetétel tömegszázalékban és mechanikai eredmények

S355J2+N						
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Cr %
0,15	1,34	0,16	<0,004	0,013	0,18	0,10
Ni %	Al %	Mo %	Nb %	V %	Ti %	N %
0,11	0,021	0,019	<0,001	0,047	<0,001	0,005
R _{eH} MPa	R _m MPa	A ₅ %				
395	544	27,0				

3. táblázat. Kémiai összetétel tömegszázalékban és mechanikai eredmények

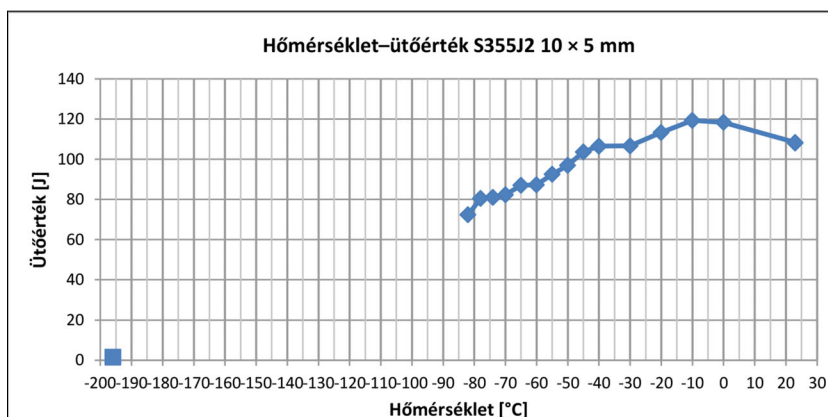
S355J2						
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Cr %
0,14	0,90	0,19	0,012	0,012	0,33	0,07
Ni %	Al %	Mo %	Nb %	V %	Ti %	N %
0,19	0,020	0,044	<0,001	0,040	0,002	0,012
R _{eH} MPa	R _m MPa	A ₅ %				
424	497	30,9				

tettünk. Kémiai összetétele és szakítóvizsgálati eredménye a 2. táblázatban szerepel.

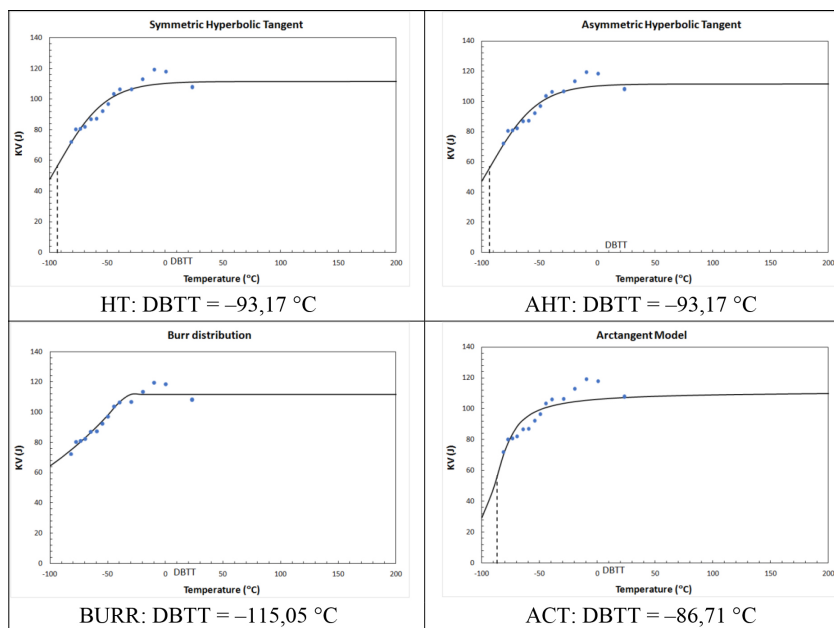
A 11. ábrán a mérési eredmények átlaga látható. A 12. ábrán négy modell -16 °C és -18 °C közötti értékre határozza meg az átmeneti hőmérsékletet, a 13. ábrán szereplő ötödik modell eredménye ezekből eltér, -12 °C.

2.5. S355J2 minőségű acéllemez vizsgálata [10]

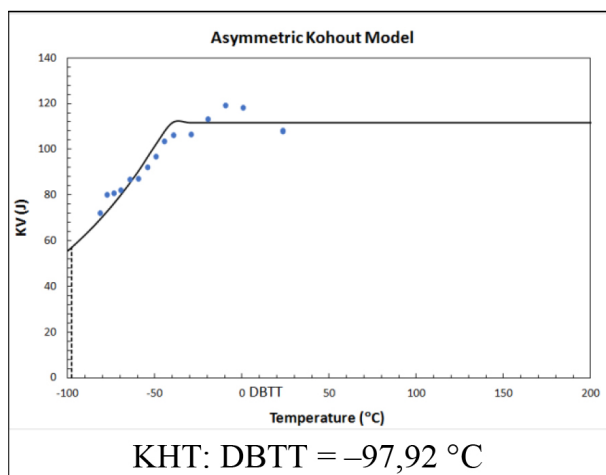
A harmadik vizsgálati sorozatunkhoz S355J2 típusú, 6 mm vastagságú lemezt választottunk. A lemezből 10 × 5 mm méretű, szabványos ütőpróbatésteget készítettünk. Kémiai összetétele, szakítóvizsgálati eredménye a 3. táblázatban, az ütőértékek diagramja a 14. ábrán látható.



14. ábra. S355J2 ütőértékátlagok



15. ábra. S355J2 ütőértékek HT, AHT, BURR és ACT modelljei



16. ábra. S355J2 ütőértékek KHT modellje

A meghatározott átmeneti hőmérsékletek a -115 °C és -87 °C közötti tartományba esnek (15., 16. ábra).

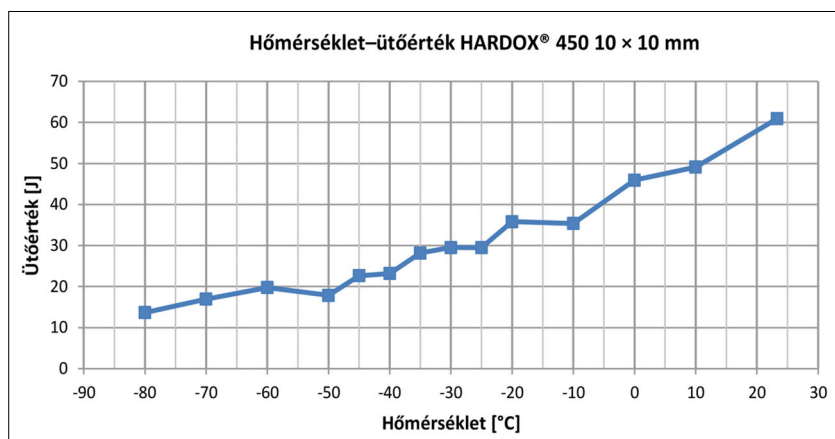
4. táblázat. Kémiai összetétel tömegszázalékban

HARDOX 450						
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Cr %
0,13	0,78	0,75	<0,004	0,007	0,21	0,41
Ni %	Al %	Mo %	Nb %	V %	Ti %	N %
0,22	0,048	0,15	<0,001	0,002	0,020	0,0044

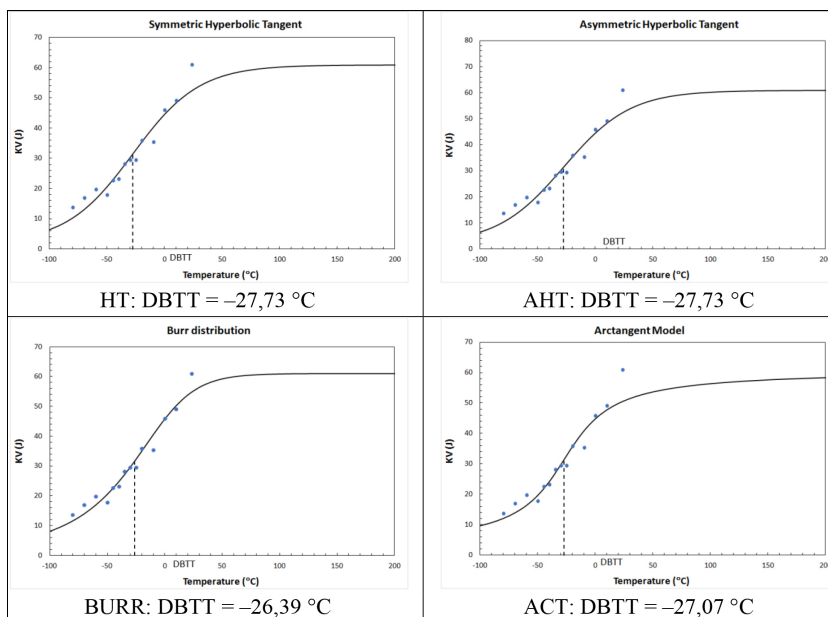
2.6. HARDOX 450 minőségű acéllemez vizsgálata [11]

A negyedik sorozatunk HARDOX 450 típusú, 10 mm vastagságú lemez volt. A lemezből 10×10 mm méretű, szabványos ütőpróbatesteket készítettünk. Kémiai összetétele a 4. táblázatban látható.

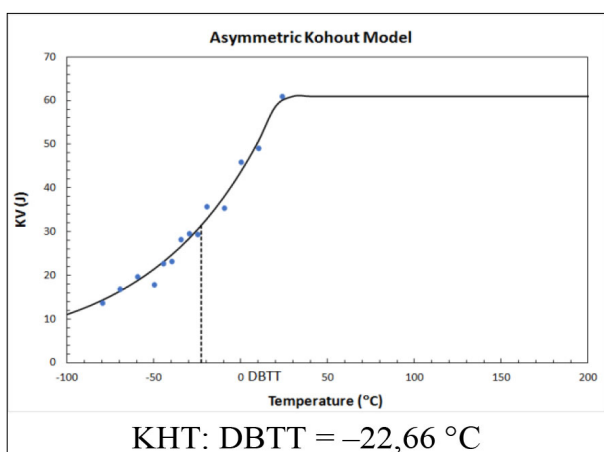
Az ütővizsgálati méréseket -80 és $+23$ °C tartományban végeztük. A mérési eredményeket a szokásos módon a NIST alkalmazásában vizsgáltuk meg. Az átmeneti hőmérsékletet -23 °C és -28 °C közé



17. ábra. HARDOX® 450 ütőértéktáblagok



18. ábra. HARDOX[®] 450 ütőértékek HT, AHT, BURR és ACT modelljei



19. ábra. HARDOX[®] 450 ütőértékek KHT modellje

határozták meg a modellek, ezek láthatók a 17., 18., 19. ábrán.

2.7. Bővített vizsgálat

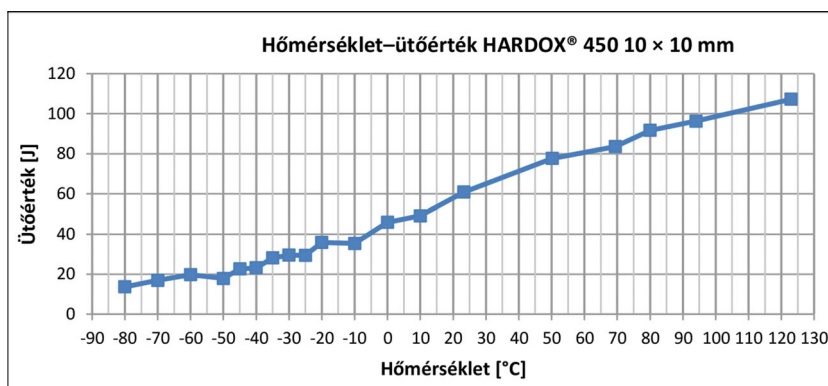
A rendkívül ritka alapanyag miatt a negyedik sorozatunk vizsgálati mennyiségét (2.6. pont HARDOX[®] 450 $T = -80\text{ °C} - +23\text{ °C}$) tovább bővítettük. Több

mérési pontot szerettünk volna elemezni a pozitív hőmérsékleti tartományban, ezért a próbatesteket a szobahőmérséklet feletti állapotban is vizsgáltuk. A kiegészítő méréseket egészen $+123\text{ °C}$ -ig végeztük el, az összes eredmény átlagát ábráztuk, ez látható a 20. ábrán.

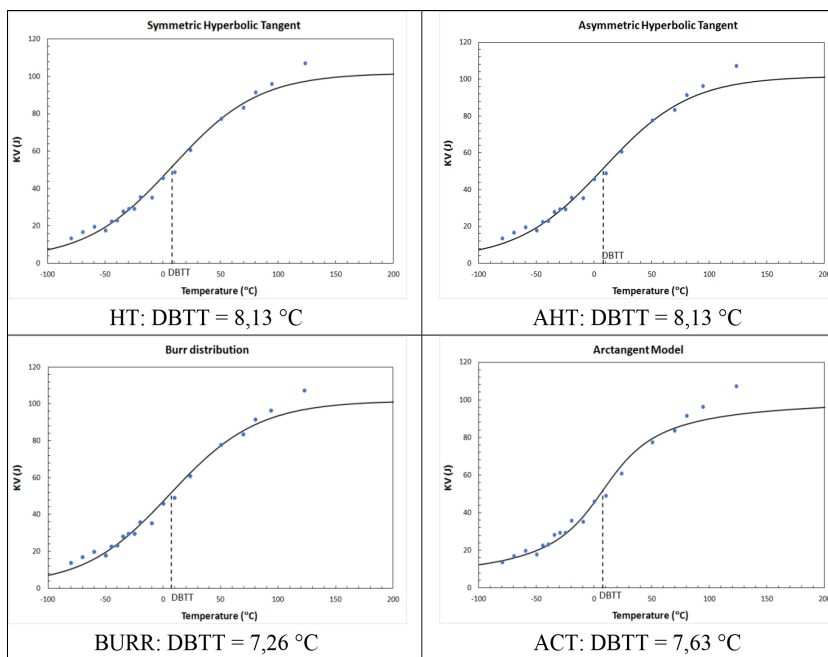
A mérési eredményeket ismét beírtuk a NIST alkalmazásba. Az átmeneti hőmérsékletet $+7\text{ °C}$ és $+13\text{ °C}$ közé határozták meg a modellek, ezek láthatók a 21., 22. ábrán.

2.8. Összehasonlítás

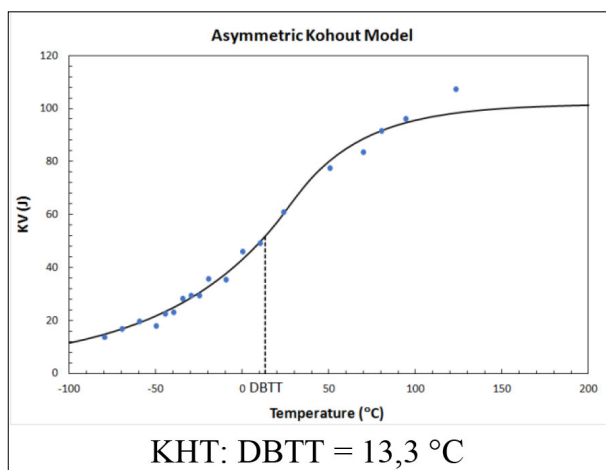
A 2.6. és 2.7. pontban tárgyalt mérési sorozatokat összehasonlítottuk. A modellek a több mérési pont esetén eltérő értékű regressziós görbéket határoztak meg, mint a kevesebb mérési pontnál, ez az eltérés jól látható a 23., 24. ábrán. Az eltérő görbék eredménye az eltérő értékű DBTT. A két sorozatban máshová határozódtak meg az átmeneti hőmérsékletek, az egyiknél jellemzően -28 °C , a másiknál $+8\text{ °C}$ volt az eredmény.



20. ábra. HARDOX[®] 450 ütőértékátlagok



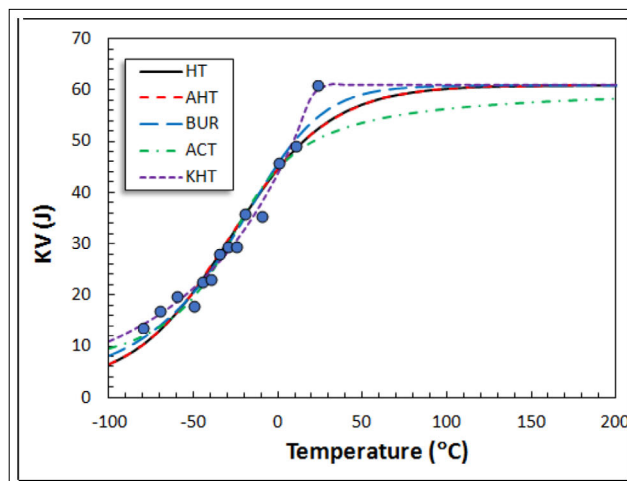
21. ábra. HARDOX® 450 ütőértékek HT, AHT, BURR és ACT modelljei



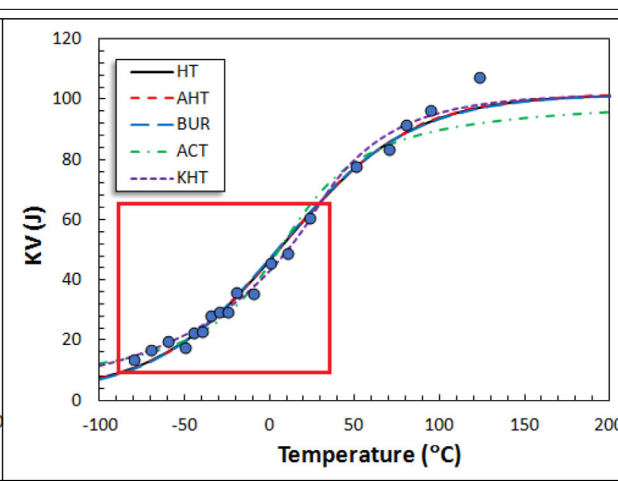
22. ábra. HARDOX® 450 ütőértékek KHT modellje

3. Összefoglalás

- A nemzetközi szakirodalom egy részének bemutatásával – reméljük – sikerült általánosabb képet adni a szívós–rideg átmenet hőmérsékletéről és annak néhány modelljéről. A modellek használata helyett az anyag megfeleltetésére az ISO 148-1 vizsgálati szabvány „D” melléklete minimumhatárok rögzítését javasolja az ütőértékre, az expanzióra vagy a szívós töretarányra vonatkozóan, amelyeket az anyagminőség függvényében célszerű szállítási feltételként előírni [4].
- Az azonos alapanyag szűkebb vagy bővebb mérési eredménySORAI alapján a modellek eltérő eredményeket adnak, ez jól látható a 2.6. és 2.7. pontban. Az ideálisan sok mérési pontra



23. ábra. Eredmények +23 °C-ig




24. ábra. Eredmények +123 °C-ig

végzett regresszió eredménye jelentősen eltér, és eltérhet a kevés mérési pontra végzett számításoktól. A modelleket éppen a kevés mérésből következtethető anyagtulajdonság miatt alkoták meg, így elgondolkodtató a modellek által meghatározott eredmények bizonytalansága és felhasználhatósága.

Köszönjük dr. Gémes György Andrásnak a lektorálást, Várady Tamásnak az angol összefoglaló szerkesztését.

IRODALOM

- [1] National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://www.nist.gov/programs-projects/charpy-machine-verification-program>; Lucon E., Splett J., Koepke A., Newton D.: NIST Technical Note 2158 – NIST Software Package for Obtaining Charpy-Transition Curves. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2158>
- [2] Oldfield W. (1979): Fitting curves to toughness data. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, 7/6, 326–333.
- [3] Hajro I., Tasić P., Burzić Z., Vuherer T.: Fitting curves and impact toughness transition temperature of quenched and tempered steel welds. ISSN 2303-4521.
- [4] MSZ EN ISO 148-1:2017 Fémek. Charpy-féle ütévizsgálat. 1. rész: Vizsgálati módszer (ISO 148-1:2016) „D” melléklet
- [5] DeepL Translate: [deepl.com](https://www.deepl.com)
- [6] Free Online OCR: [onlineocr.net](https://www.onlineocr.net)
- [7] Sigmoid függvények: https://hu.wikipedia.org/wiki/Sigmoid_f%C3%BCggv%C3%A9nyek
- [8] Tóth L.: A törésmechanika és az anyagvizsgálat története.
- [9] Microsoft Corporation. Microsoft Excel: <https://office.microsoft.com/excel>
- [10] MSZ EN 10025-2:2020 Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 2. rész: Ötvözetlen szerkezeti acélok műszaki szállítási feltételei.
- [11] HARDOX® 450: SSAB – Svédország: <https://www.ssab.com/hu-hu/h%C3%ADrek/2019/06/hu-hardox>
- [12] Diszlokáció: <https://idegen-szavak.hu/diszlok%C3%A1ci%C3%B3>; [https://hu.wikipedia.org/wiki/Diszlok%C3%A1ci%C3%B3_\(krist%C3%A1llytan\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Diszlok%C3%A1ci%C3%B3_(krist%C3%A1llytan))



3B | **3B Hungária Kft.**
 H-8900 Zalaegerszeg, Wlassics Gyula u. 13. • Tel.: +36 92/549-033
 info@3bh.hu • www.3bh.hu

HIVATALOS MAGYARORSZÁGI  **metso** KÉPVISELET

