

# **CrMo4 anyagtipusok izotermikus átalakulási folyamatainak elemzése és összehasonlítása VEM alapú fázis elemeket tartalmazó TTT diagramok alkalmazásával**

## **Ginsztler J.**

Tanszékvezető egyetemi tanár, Anyagtudomány és Technológia Tanszék,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,

H-1111. Budapest, Goldmann Gy. tér 3. I. em. 153. Tel: (1) 463 2954, e-mail: [matsci@eik.bme.hu](mailto:matsci@eik.bme.hu)

## **Dudás Z.**

Egyetemi adjunktus, Anyagtudomány és Technológia Tanszék,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,

H-1111. Budapest, Goldmann Gy. tér 3. I. em. 153. Tel: (1) 463 2853, e-mail: [dudas@eik.bme.hu](mailto:dudas@eik.bme.hu)

## **Összefoglalás**

*A VEM alapú fázis elemek alkalmazása kiválóan alkalmas az izotermikus (TTT) fázisátalakulási diagramok folyamatainak értékelésére és matematikai modellezésére.*

*A CrMo 4 anyagminőségű acélok különböző izotermikus átalakulási diagramjainak összehasonlítása azt mutatja, hogy ezzel a modellezéssel finom különbségek értékelése is lehetséges.*

*Az izotermikus átalakulási diagramokhoz tartozó adatok felhasználásával többváltozós regressziós számítások elvégzésére is mód van.*

## **1 Bevezetés**

Az utóbbi években az alapkutatások elsősorban a diffúzió alapú ausztenites átalakulások folyamatainak matematikai leírásával foglalkoztak, ahol az alap matematikai eljárások a hagyományos Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) modellre épülnek. Ezeknél a megoldásoknál a cél a modell paraméterek meghatározása olyan módon, hogy a kiadódó hőmérsékletfüggő matematikai függvények minél jobban megközelítsék az izotermikus átalakulási diagramok mért átalakulási görbéit.

A korábbi irodalmakban [1-4] már bemutatott VEM alapú fázis elemeken alapuló modell egy olyan alternatív módszer, ahol a cél már az izotermikus átalakulási diagramok valódi mérési adatai között elhelyezkedő tartományok minél jobb megközelítése.

Mivel a fázis elemek csomópontjai az izotermikus diagramok mért eredményeit tartalmazzák, a módszer elsősorban azoknak a komplex technológiai folyamatoknak a matematikai modellezésére alkalmas, amelyekhez az izotermikus diagramok felvétele is készült.

Azonos anyagtipus körbe tartozó, de különböző kémiai összetételű anyagok, kimért átalakulási diagramjainak komplex kezelésénél (az adott esetben a CrMo4 anyagtipusra bemutatva) a többváltozós regressziós számítások nyújtanak arra lehetőséget, hogy a fázisok mennyiségei a nem mért kémiai összetételű tartományokban is jó közelítéssel meghatározhatók legyenek.

## **2 A VEM típusú fázis elemekből felépített átalakulási diagramok alkalmazása**

A bemutatott izotermikus átalakulási diagramok alapelemeit adó fázis elemek csomópontjainak koordinátáit a hőmérséklet és az idő logaritmusai alkotják. A

csomópontokban a különböző fázisok mért mennyiségei azok a paraméterek, amelyeknek értékei minden egyes csomópontban a mért adatoknak felelnek meg, és amelyeknél az egyes csomópontok között a változás közelítése lineáris.

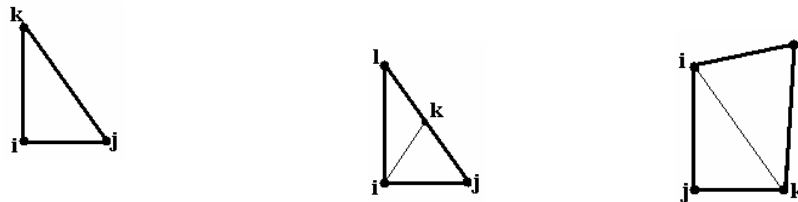
A csomópontokban jelenlévő fázisok összes mennyisége minden esetben 100%.

A hőmérséklet és időfüggő technológiák során egyes fázisok eltűnhetnek, más fázisokká alakulhatnak és/vagy új fázisok is keletkezhetnek.

Az egyidejűleg jelenlévő fázisok tulajdonságai az egyes fázisok mennyiségének megfelelő arányban érvényesülnek. A fázisok mennyiségének változásával a csomópontokban reprezentált szövetelemek tulajdonságai is arányosan megváltoznak. Ilyen módon a fázis elemek alkalmazása a kevert anyagállapotok aktuális tulajdonságainak figyelembevételére is módot ad.

## 2.1 Az izotermikus átalakulások számításához alkalmazott fázis elemek

Az 1. ábrán olyan háromszög és négyszög alakú fázis elemek láthatók [1-4], ahol a csomópontok csak azok csúcspontjaiban helyezkednek el.



1. ábra Az izotermikus átalakulások számításához alkalmazott fázis elem típusok

## 2.2 A fázis elemek gyakorlati alkalmazása

A gyakorlatban különböző átalakulások kombinációinak alkalmazása fordul elő a leggyakrabban. Ilyenek például az ausztenitesítési átalakulási folyamat után elvégzett edzési folyamat, és az azt követő megeresztési folyamat, az acélok esetében, vagy a képlékeny alakítási-, az újrakristályosodási- és kiválásos folyamatok egyidejű folyamatai. Az ilyen komplex technológiai folyamatok közül néhány látható a korábban publikált irodalomban [2-4].

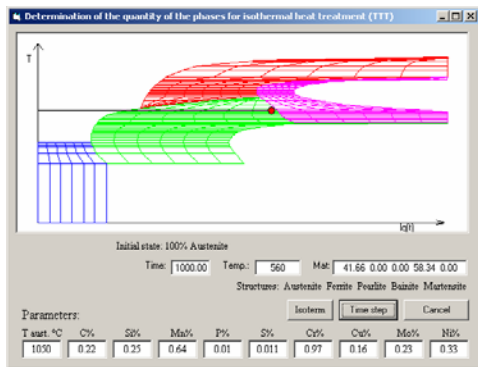
## 2.3 A bemutatott izotermikus átalakulási diagramok képein látható objektumok értelmezése

A CrMo 4 típusú anyagok izotermikus átalakulási diagramjai hasonlóak egymáshoz. Közülük az 1050°C ausztenitesítési hőmérsékletekhez tartozó, fázis elemekkel felépített izotermikus diagramok képei láthatók a 2. ábrán.

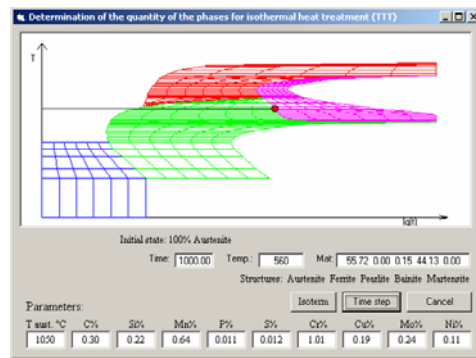
A képeken a különböző fázistartományokhoz tartozó fázis elemek képei különböző színűek. A ferrit tartomány elemeinek színe piros, a perlit elemeké lila. A bainit tartomány színe zöld, a martenzit területe kék színű.

Az 560°C hőmérsékletű izotermikus hőmérsékletvonalakat a képekben fekete vízszintes vonal jelöli.

A  $\lg(t)$  tengely kezdő értéke a 2. ábrában látható diagramok esetében:  $10^{-1}$  azaz 0,1 s. A  $\lg(t)$  tengely legnagyobb időértéke  $10^6$  s. A függőleges tengely hőmérséklet tartománya: 0-900°C.



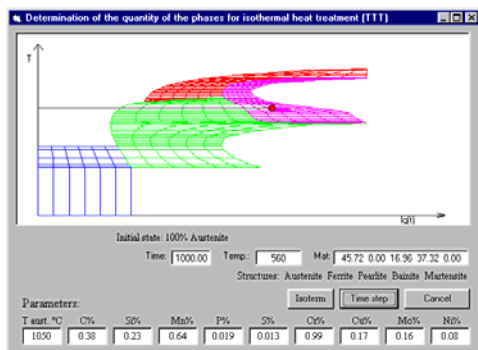
a.)



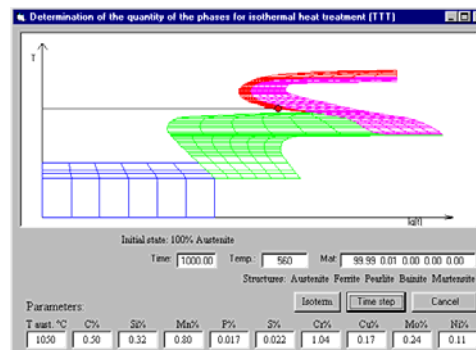
b.)

25 CrMo 4 (Sorszám: 2)

34 CrMo 4 (Sorszám: 4)



c.)



d.)

42 CrMo 4 (Sorszám: 6)

50 CrMo 4 (Sorszám: 8)

**2. ábra** Az anyagok izotermikus diagramjai fázis elemek alkalmazásával ( $T_A = 1050^\circ\text{C}$ ), a  $T = 560^\circ\text{C}$  izotermikus hőmérsékletek bejelölésével

Az aktuális  $T$ ,  $\lg(t)$  pont helyzetét a vízszintes vonal végén elhelyezkedő piros kör középpontja jelöli ki. Az aktuális időérték számszerűen a fázis elemek alkotta diagramok alatt látható „Time” címkéjű szövegdobozból olvasható ki. Az aktuális hőmérsékletérték a „Temp” címkéjű szövegdobozban látható (A bemutatott esetben:  $560^\circ\text{C}$ ). Az idő- és hőmérséklet értékek mellett jobbra olvashatók ki az aktuális fázisok mennyiségeinek értékei. (Balról jobbra szöveggel elválasztva az ausztenit, a ferrit, a perlit, a bainit és a martenzit mennyisége). Alattuk a fázisok neveinek felsorolása látható.

Az ábrák alján elhelyezkedő szövegdobozokban balról jobbra az ausztenitesítési hőmérséklete és a számításoknál figyelembe vett ötvözők mennyisége (C, Si, Mn, P, S, Cr, Cu, Mo, Ni) van feltüntetve százalék értékben.

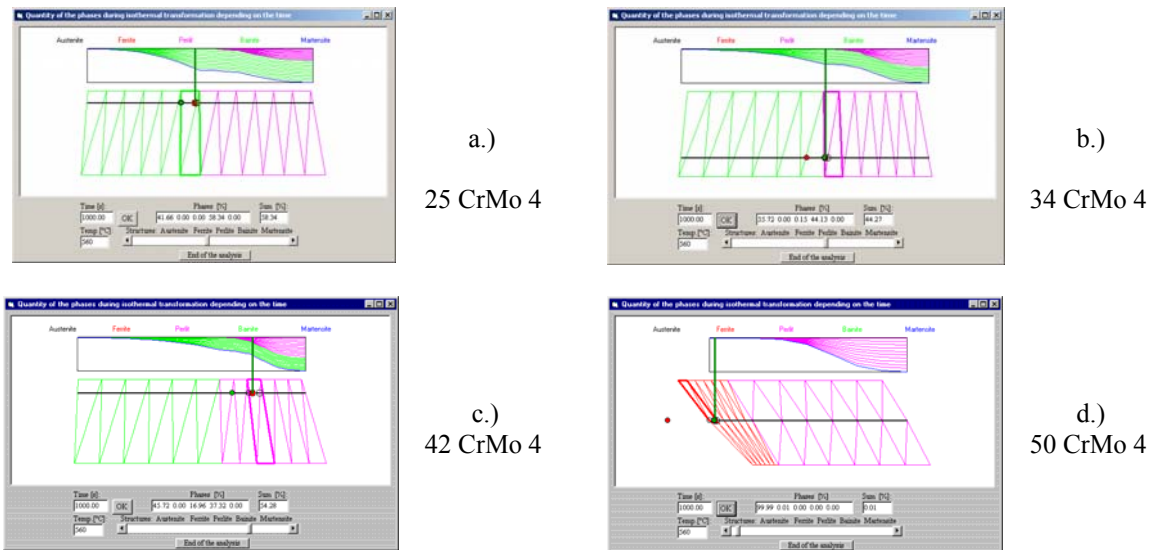
## 2.4 A fázis elemek alkalmazása négy különböző CrMo 4 típusú acél izotermikus diagramjainál

Az 1-4 táblázatban szereplő adatok két különböző ausztenitesítési hőmérséklettel és négy különböző összetétellel rendelkező CrMo 4 típusú acél nyolc kimért izotermikus átalakulási diagramjából [5] készült fázis elemeket tartalmazó diagramokon végzett műveletek eredményei.

A nyolc diagram alapadatait az 1. táblázat tartalmazza.

A 3. ábra a 2. ábrában látható izotermikus diagramoknál kialakuló fázismennyiségek változásának jellegét mutatja be a vizsgált  $560^\circ\text{C}$  hőmérsékleten, a vizsgált hőmérséklet

környezetében lévő fáziselemek feltüntetésével és az 1000 s időponthoz tartozó mennyiségek adatainak számszerű megadásával.



**3. ábra** A fázisok mennyiségi változásainak jellege 560 °C hőmérsékleten és a mennyiségek számszerű értékeinek bemutatása 1000 s időértéknél

A 2. táblázat az ausztenit, a ferrit, a perlit és a bainit mennyiségi értékeit szemlélteti 560°C hőmérsékleten 1000 s idő esetében a 3. ábrán szemléltetett mért eredmények, az (1) egyenlet alapján kiszámított értékek és a 0-100% mennyiség tartományra korrigált értékek bemutatásával.

A mért eredmények a fázis elemek alkalmazásával kiadódó értékek.

A 4. táblázatban az 560°C hőmérsékleten jellemző átalakulási időértékek és a jellemző időértékekhez tartozó fázismennyiségek láthatók.

**1. táblázat** A vizsgált CrMo 4 típusú anyagok jellemző adatai

Sor-szám	Acél megnevezése	T <sub>aust.</sub> [°C]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]
1	25 CrMo4	875	0.22	0.25	0.64	0.010	0.011	0.97	0.16	0.23	0.33
2	25 CrMo4	1050	0.22	0.25	0.64	0.010	0.011	0.97	0.16	0.23	0.33
3	34 CrMo4	850	0.30	0.22	0.64	0.011	0.012	1.01	0.19	0.24	0.11
4	34 CrMo4	1050	0.30	0.22	0.64	0.011	0.012	1.01	0.19	0.24	0.11
5	42 CrMo4	860	0.38	0.23	0.64	0.019	0.013	0.99	0.17	0.16	0.08
6	42 CrMo4	1050	0.38	0.23	0.64	0.019	0.013	0.99	0.17	0.16	0.08
7	50 CrMo4	850	0.50	0.32	0.80	0.017	0.022	1.04	0.17	0.24	0.11
8	50 CrMo4	1050	0.50	0.32	0.80	0.017	0.022	1.04	0.17	0.24	0.11

**2. táblázat** A vizsgált fázisok mért-, a számított- és a korrigált mennyiségei 560°C hőmérsékleten 1000 s időértéknél

Sor-szám	Austenit [%]			Ferrit [%]			Perlit [%]			Bainit [%]		
	Mért	Számított	Korrigált	Mért	Számított	Korrigált	Mért	Számított	Korrigált	Mért	Számított	Korrigált
1	48.41	41.19	41.19	0	0.53	0.53	5.6	4.03	4.03	45.99	54.24	54.25
2	41.66	48.88	48.35	0	-0.53	0	0	1.57	1.57	58.34	50.09	50.08
3	33.36	40.15	40.15	0.56	0.96	0.96	5.32	4.06	4.06	60.76	54.81	54.83
4	55.72	48.94	48.69	0.15	-0.25	0	0	1.26	1.26	44.13	50.07	50.05
5	31.77	34.57	34.57	18.73	18.42	18.42	0	1.33	1.33	49.49	45.66	45.68
6	45.72	42.92	41.59	16.96	17.27	17.27	0	-1.33	0	37.32	41.15	41.14
7	97.48	94.34	94.31	2.34	1.77	1.77	0.18	1.55	1.55	0	2.37	2.37
8	99.99	103.13	99.43	0	0.57	0.57	0.11	-1.26	0	0	-2.37	0

### 2.5 A CrMo 4 típusú acélok izotermikus átalakulással keletkező mennyiségeinek meghatározása többváltozós regressziós számítással

A 2. táblázatban látható számított adatok többváltozós lineáris regressziós számítás eredményei. A 2. táblázat számított eredményei a 3. táblázatban látható regressziós tényezőket alkalmazó (1) regressziós egyenlettel számított értékek. A regressziós számítást fázisonként elvégezve a korábbi összes mennyiség értéke általában nem marad állandó. Ezért kell a számított eredményeket az összes mennyiségnek megfelelő értékre korrigálni.

A 3. táblázat a 2. táblázat számított eredményeihez tartozó regressziós tényezőket mutatja be.

$$Y = b_{TA} * T_{aust} [^{\circ}C] + b_C * C[\%] + b_{Si} * Si[\%] + b_{Mn} * Mn[\%] + b_P * P[\%] + b_S * S[\%] + b_{Cr} * Cr[\%] + b_{Cu} * Cu[\%] + b_{Mo} * Mo[\%] + b_{Ni} * Ni[\%] + Const \quad (1)$$

**3. táblázat** A vizsgált fázisok regressziós tényezőinek értékei 560°C hőmérsékleten 1000 s időértéknél.

Fázisok	Sor-szám	$b_{TA}$	$b_C$	$b_{Si}$	$b_{Mn}$	$b_P$	$b_S$	$b_{Cr}$	$b_{Cu}$	$B_{Mo}$	$B_{Ni}$	Const
Austenit	1-8	0.04393	-241.2	844.9	-298.5	5109.3	3252.3	-4.907	-133.4	585.0	-157.7	-107.6
Ferrit	1-8	-0.01403	-347.2	252.8	-25.41	4076.9	1901.5	39.62	-51.70	197.4	-123.0	-50.94
Perlit	1-8	-0.00604	1097	-1254	315.5	-15226	-4277.0	-108.6	311.2	-1076	453.7	228.7
Bainit	1-8	-0.02369	-1780	826.3	41.16	20584	7959.1	221.5	-231.4	814.2	-584.5	-231.9

**4. táblázat** Az 560°C hőmérsékletéhez tartozó jellemző idő és fázismennyiség értékek

Sor-szám	T [°C]	t <sub>Ferrit</sub> kezdet [s]	t <sub>Bainit</sub> kezdet [s]	t <sub>Perlit</sub> kezdet [s]	t <sub>Perlit</sub> vég [s]	Ferrit [%]	Perlit [%]	Bainit [%]
1	560	1.30	3.21	1594	18318	5.60	40.00	54.40
2	560	-	3.32	1265	534052	0	36.78	63.22
3	560	0.80	3.74	881	36200	5.32	33.92	60.76
4	560	-	4.28	970	50772	0	55.87	44.13
5	560	-	1.86	367	9511	0	50.51	49.49
6	560	-	2.53	332	6487	0	62.68	37.32
7	560	539.26	-	797	10720	0.18	99.82	0
8	560	926.90	-	1739	17022	0.11	99.89	0

### 3 Összefoglalás

A fázis elemek alkalmazása jó alternatív módszer izotermikus átalakulási diagramok kezeléséhez. A módszer az összes mennyiség megfelelő korrekciójával alkalmas olyan izotermikus fázisátalakulások kezelésére is ahol a többváltozós regressziós megoldások alkalmazására lehetőség van.

### REFERENCES

1. Dudás Z., Ginsztler J. (2002), „Phase elements for coupled simulation of TTT and CCT diagrams” in: *Gépészet 2002 Proceedings of the Third Conference on Mechanical Engineering*, BUTE, May 30-31, 149-153.
2. Dudás Z., Ginsztler J. (2002), „Some examples of the use of phase elements for coupled simulation of TTT and CCT diagrams” in: *Gépészet 2002 Proceedings of the Third Conference on Mechanical Engineering*, BUTE, May 30-31, 154-158.
3. Dudás Z. (2003), “Application of phase elements for FEM simulation of TTT diagrams” *EUROMAT 2003*, 1-5 September 2003, Lausanne
4. Dudás Z. (2003), " Comparing the isothermal transformation processes of the material 50 CrV 4 using different TTT diagrams and FEM based phase elements " in *Hungarian Conference and Exhibition on Materials Science Testing and Informatics*, Balatonfüred, 2003. október 12-14, 154-155.
5. A. Rose (1956), „Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle”, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf