



ACÉLGYÁRTÁS

BUCAVAS KÉSZÍTÉS, MARTENZITES ÁTALAKULÁS,
FÁZISDIAGRAMOK ÉS KAPCSOLATUK AZ ANYAGSZERKEZETTEL,
VAS-SZÉN FÁZISDIAGRAM, ACÉLGYÁRTÁS

*Egyetemi jegyzet az
„Alkalmazott fizika I (Korszerű műszaki alkalmazások alapjai)”
című kurzushoz*

***ELTE TTK, Fizikai Intézet,
Anyagfizikai tanszék***

DR. ISPÁNOVITY PÉTER DUSÁN, egyetemi adjunktus előadásait felhasználva

A JEGYZETET KÉSZÍTETTE:

NAGY MÁRIA,

EPB94F,

Fizika-matematika tanári MA

Budapest, 2017.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés	4
2.	Szemléleti megalapozás.....	5
2.1.	Mi az acél?	5
2.1.1.	Az acél fizikai jellemzői	6
2.2.	Az ötvözők	6
2.3.	Acéltermelő országok	9
2.4.	A vasérc (az acélgyártás alapja)	10
3.	Fizikatörténeti megközelítés	13
3.1.	Az acélgyártás fejlődése	13
4.	Az acélgyártás érdekes fizikai folyamatai	20
4.1.	Az acélgyártás fizikai-kémiai folyamata	20
4.2.	A nyersvas és az acél	23
4.3.	Bucavas készítés	24
4.3.1.	Bucavas-gyártás.....	24
4.3.2.	Bucakemence.....	25
4.4.	Kovácsolás	27
4.5.	Martenzites átalakulás	28
4.5.1.	A martenzit	28
4.5.2.	A martenzites átalakulás kristálytana.....	32
4.5.3.	A martenzites átalakulás termodinamikai jellemzése	36
4.6.	A nagyolvasztó.....	39
4.7.	Damaszkuszi acél	42
4.7.1.	A damaszkuszi acél története	42
4.7.2.	A damaszkuszi acél jellemzői	43
4.7.3.	A damaszkuszi acél készítésének technológiája.....	44
4.8.	Modern acélok.....	46
4.8.1.	A Rozsdamentes acél jellemzői	46
4.8.2.	A leggyakoribb ötvözők.....	46
5.	Fázisdiagramok és kapcsolatuk az anyagszerkezettel.....	47
5.1.	A fázisdiagram.....	47
5.2.	Példák	51
5.2.1.	Cukros víz fázisdiagram	51

5.2.2.	Réz-nikkel fázisdiagram.....	51
5.2.3.	A dermedés folyamata a fázisdiagramon	52
5.2.4.	Ólom-ón fázisdiagram.....	53
5.2.5.	Réz-cink fázisdiagram	56
5.2.6.	Vas-szén fázisdiagram.....	56
5.2.7.	Példák hűtésre	61
6.	Hivatkozások	63

1. BEVEZETÉS

Az acél felhasználásának és gyártásának története távoli időkre nyúlik vissza, mindig a vasgyártással együtt említendő, hiszen az acél a vas egyik legfontosabb ötvözete.

Az első használatos vastárgyakról azt feltételezik, hogy meteoritvasból készültek. A régészek Egyiptomban, el-Girzában, az i. e. 3500-tól i. e. 3200-ig terjedő időszakból származó meteoritvas anyagú gyöngyöket, a Kheopsz-piramisnál pedig vasszerszámokat találtak. Mivel a vas idővel elrozsdásodik, a maradványok elvesznek számunkra, így a vasgyártás több mint 6000 éves múltja csak feltételezés. [17], [18] Az előbbieket mellet *nincs semmilyen pontos adat arról, hogy a vas érceiből való kinyerése mikor, milyen körülmények közt, milyen eljárási módszerekkel kezdődött meg.*

A vaskorra gondolva azonban azt egyértelműen kijelenthetjük, hogy az emberiség technikai fejlődése szempontjából kiemelkedő jelentősége van a vas megjelenésének az emberi kultúra történetében. [8]

A vas felhasználására irányuló ipar fejlődésének fontos eleme volt az is, hogy megfelelő szakembereket képezzenek. Mária Terézia királynő 1762. október 22-i rendeletével indult be -a világon elsőként- a bányász-kohász akadémiai szintű képzés, ez a selmeci tanintézetben történt. Az 1867-es osztrák-magyar politikai kiegyezéssel ez, a Selmeci Akadémia magyar állami intézmény lett. [7]

Azonban nemcsak fizikatörténeti szempontból izgalmas tárgyalni ezt a témakört. Bár fontos az integrált – interdiszciplináris – holisztikus szemlélet fejlesztése tanítványainknál (többször a tanár szakosoknál is). És abszolút kijelenthető, hogy ez a témakör kifejezetten alkalmas a fizika, a történelem, a kémia és a matematika összekapcsolt tanulására, és a pedagógiai transzfer megvalósítására.

A vas és az acél témakörének tárgyalásakor nagyon érdekes és látványos fizikai folyamatokkal is találkozhatunk, mint például a bucavasgyártás és a bucakemence, a kovácsolás, a martenzites átalakulás, az acélgyártás folyamata, a damaszkuszi acél és a modern acélok.

A jegyzetben részletesebben szerepelnek az acélgyártás metódusainak és történetének főbb szegmensei. Az írás az „Alkalmazott fizika I (Korszerű műszaki alkalmazások alapjai)” című előadás tartalmának [1] felhasználásával készült. A kiadvány műfaja alapvetően a tudományos ismeretterjesztő írások kategóriájába sorolható.

A tananyag feldolgozása mellett javaslok Prof.Dr. Tichy Géza e témáról szóló, 4 oldalas cikkének [2] elolvasását, tanulmányozását is, mely segítheti a szemléletformálást.

2. SZEMLÉLETI MEGALAPOZÁS

2.1. MI AZ ACÉL?

Nem egységesek az acél meghatározására vonatkozó definíciók [8]. Néhány ilyen:

1. DEFINÍCIÓ (DIN EN 10020):

Fémötvözet, amiben legnagyobb arányban a vas van jelen (azaz fő alkotórésze a vas). A vas egyik legfontosabb ötvözete, fő ötvözője a szén, melyből mindenképp 2% alatti (tömegszázalékban értendő) mennyiséget tartalmaz; ez alól kivételek a korlátozott számú króm acélok.

2. DEFINÍCIÓ (Jelenlegi kohászat):

Ide sorolandó minden műszaki vas-szén ötvözet, melyre

- a széntartalom aránya (tömegszázalékban) 0% és 2,06% közti,
- valamint a többi elem lényegesen alacsonyabb arányban van jelen benne a vasnál.

Ez a meghatározás közvetlenül a *vas-szén fázisdiagramból* származik.

Ebben nincs definiálva általános határvonal a vas-szén ötvözetek kategóriába sorolásához.

Továbbá, sok acél van, melyek a szén mellett más elemeket is relatíve nagy arányban tartalmaznak. Ennek a halmaznak legismertebb képviselő:

- a rozsdamentes és saválló acélok, melyek króm tartalma mintegy 13%,
- a martenzites acélok,
- és forró munka acélok.

3. „DEFINÍCIÓ” (Köznyelv):

Szinte az összes vastartalmú ötvözetet köznyelven acélként említik. A vas és acél kifejezést gyakran használják szinonimaként. Tehát **nem differenciálódik a vas és acél fogalma**. Továbbá szintén acélnek nevezik sokszor a nehézfémeket is (mert vizuálisan nehezen különböztethetők meg). Ez **további fogalmi tévképzetként** kezelendő.

Az „acél” szóhasználat és annak általános meghatározása a 20. század elején még magában foglalta az akkoriban alig termelt kovácsoltvasat is (holott ennél nem szükséges (szénnel való) ötvözés). **A kovácsoltvas sokban hasonló ugyan az acélhoz, de nem azonos vele.**

A forrás magyar nyelvű formája egy ilyen **furcsa definíciót** is említ:

4. „DEFINÍCIÓ”:

„Olyan vasalapú ötvözet, amelyet képlékeny alakítással lehet megmunkálni (kovácsolni, hengerelni stb.). Ebben a megfogalmazásban nem kritérium a szén jelenléte, noha a szén a vas legáltalánosabb ötvöző anyaga.”

A szén mellett sok más elemet is használnak ötvözőként, így jönnek létre a különböző célokra megfelelő acélfajták. Az idő során számottevően fejlődött ez az ipar, így manapság nagyon sokféle kémiai összetétel hozható létre. **Az acél tulajdonságai változtathatók az ötvözők mennyiségének és minőségének (fajtáinak) módosításával**; például ilyen tulajdonságok [8]:

- keménység,
- rugalmasság,
- hajlékonyság,
- alakíthatóság,
- szilárdság,
- hőállóság,
- savállóság,
- korróziómentesség/korrózióállóság,
- hegeszthetőség.

Tehát az egyéb ötvözők *például növelik az acél szilárdságát, és egyúttal csökkentik képlékenységét.*

2.1.1. AZ ACÉL FIZIKAI JELLEMZŐI¹

- Sűrűség: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Hőtágulási együttható: $\alpha = 0,000012 \text{ 1/K}$ (ferrit-perlites szerkezetű acélra)
- Hővezetési tényező: $\lambda = 58 \text{ W/mK}$
- Rugalmassági modulus: $E = 206\,000 \text{ N/mm}^2$
- Poisson-tényező: $\nu = 0,30$

2.2. AZ ÖTVÖZŐK

A kémiai elemek közül 20-25 db van, melyet elterjedten használnak az ötvözés során, és gyakorlati jelentőségük van az acél-iparban, például [8]:

- Ni (nikkel)
 - növeli az acél szilárdságát és keménységét,
 - növeli az olvadáspontot
 - hőálló acélt eredményez (hőálló acél = magasabb hőmérsékleten szilárdsága jobb)
- Mn (mangán) szintén előbbiekre alkalmas.

¹ Forrás: [8]

- V (vanádium)
 - növeli az acél keménységét
 - javítja a kifáradással szembeni ellenállást
- nagy mennyiségű Cr és Ni
 - rozsdamentessé teszi az acélt (rozsdamentes = alacsony hőmérsékleten korrózióálló)
 - savállóvá is teszi
- Cr (króm)
 - nagy hőmérsékleten is kevésbé oxidálódóvá teszi az acélt, ami hőálló acéloknál jelentős.
 - szép felületet eredményez: az ilyen acélok felületén hibátlan rácsú, tömör *spinell-réteg* képződik (például FeCr_2O_4 alakjában).
- Al (alumínium) szintén előbbire alkalmas.
- Si (szilícium) szintén ld. előbb.
- W (volfrám) az ún. gyorsacélok létrejöttét biztosítja (a gyorsacélok alkalmasak pl. nagy teljesítményű forgácsolószerszámok készítésére)

Szilárdtestfizika szempontjából az ötvözők további (még nem szerepelt) funkciói [8]:

- Az ötvözőelemek segítségével lehetséges, hogy a vas **dermedése és allotrop átalakulásai**² olyankor menjenek végbe, mikor „hőmérséklet-köz” van éppen (ld. [vas-szén diagramnál](#)).
- Alapvetően az ötvözők mindegyike csökkenti a vas olvadásának és dermedésének „hőmérséklet-közét” (de mellesleg vannak más átalakulások, amikor ezt az ötvözők ellentétesen módosítják).
- **Bizonyos ötvözők elősegítik a lapcentrált köbös (szabályos kocka alakú) allotrop módosulat (kristályrács-módosulat) létrejöttét;** ezek az ún. **ausztenitképzők**³, ilyen például:
 - C (szén)
 - Co (kobalt)
 - Mn (mangán)
 - Ni (nikkel)
 - stb.

Ausztenites acél pl. a 8% Ni-t és 18% Cr ötvözőt tartalmazó saválló acél.
- **Bizonyos ötvözők kedveznek a tércentrált köbös (szabályos kocka alakú) allotrop módosulat (kristályrács-módosulat) kialakulásának;** ezek az ún. **ferritképzők**⁴, mint például

² Szilárd anyagoknál ezen a kristályszerkezet különböző módosulatainak megjelenését értjük, a kristálystruktúra átalakulását.

³ „Az ausztenit/gamma-vas ($\gamma\text{-Fe}$): a vas 912°C és 1394°C közötti hőmérsékleten stabil, lapközepes köbös szerkezetű kristálmódosulata. Ebben az állapotban kb. 2%-nyi szén oldódhat. **Paramágneses** tulajdonságú. Az acél fontos alkotórésze. Különböző **rozsdamentes acéleszközök** készítéséhez használják.” [31] Részletesebben ld. a forrásban.

⁴ „A ferrit vagy alfa-vas ($\alpha\text{-Fe}$): az anyagtudományban használt fogalom a vasra vagy az elemi vas tércentrált köbös szerkezetű kristálya. A ferrit az acél és öntöttvas fő alkotórésze, ez adja a **mágneses tulajdonságait**. A ferrit a **ferromágnesség** klasszikus példaanyaga.” [32] Részletesebben ld. a forrásban.

- Al (alumínium)
- B (bór)
- Cr (króm)
- Mb (molibdén)
- Nb (nióbium)
- Si (szilícium)
- Sn (ón)
- Ti (titán)
- V (vanádium)
- W (volfrám)
- stb.

Az ötvözéshez nem/nem jól használható elemek [8]:

- A vas nem ötvöződik periódusos rendszer elemei közül az alábbiakkal:
 - nemesgázok
 - halogének
 - alkáli fémek
 - alkáli földfémek
 - némely kis forráspontú fém:
 - Hg , Cd, Mg, Ag
- A vas nehezen elegyíthető a következőkkel:
 - Bi
 - Pb
 - Zn, ha 20%-nál kisebb koncentrációban szeretnénk ezt hozzáadni.
- Törékennyé teszik az acélt, ezért az alábbi szennyezőket legtöbbször eltávolítják az acélgártás során:
 - Ni
 - S
 - P

Napjainkban leginkább használt ötvözőkről és a rozsdamentes acélról a jegyzet végén még említés kerül, a „[Modern acélok](#)” részben; itt **megtekinthető az is, hogy a leggyakrabban használt ötvözőelemek miként hatnak az átalakulási hőmérsékletekre.**

Európai acélokból **több, mint 2500 típust** regisztrálnak. A Szén és Acélközösség, **a bányászat és a kohászat már régóta a fő pillére a nehéziparnak**, és alapja lehet a politikai hatalomnak is. **Világszerte évente mintegy 1,6 milliárd tonna acélt gyártanak [10], így az acél messze a legelterjedtebb fémes anyag.** (A 25 legjelentősebb acéltermelő ország termelési mennyiségeit ld. [„Acéltermelő országok”](#) részben alább.)

2.3. ACÉLTERMELŐ ORSZÁGOK

Az acél az ipar egyik legfontosabb anyaga, előállításával az *acélkohászat* foglalkozik; képlékeny alakítással (kovácsolás, hengerlés, kisajtolás stb.) hidegen és melegen megmunkálható, tulajdonságai hőkezeléssel tovább alakíthatók. [9] Acéltermelés 42 országban történik [8], ezek közül a 25 legnagyobb mennyiségben termelő ország adatai az alábbi táblázatban láthatók (1. táblázat). A táblázatban nyomon követhetjük az ipar időbeli fejlődését is.




Acéltermelés országonként az egyes években, ezer tonnában megadva								
Helyezés	Ország\Év	1970	1980	1990	2000	2007	2010	2013
1.	Kína	18.144	37.121	66.349	128.500	573.567	731.040	821.990
-	EU	192.588	208.000	192.129	194.154	139.300	168.580	166.208
2.	Japán	93.322	111.395	110.339	106.444	87.534	107.232	110.595
3.	USA	119.307	101.456	89.726	101.803	58.196	88.695	86.878
4.	India	6.276	9.514	12.963	26.924	63.527	77.264	81.299
5.	Oroszország	65.835	84.040	87.735	59.136	60.011	70.426	68.856
6.	D-Kórea	481	8.558	23.125	43.107	48.572	69.073	66.061
7.	Németország	50.466	51.146	43.980	46.376	32.670	42.661	42.645
8.	Törökország	1.312	2.536	9.443	14.325	25.304	35.885	34.654
9.	Brazília	5.390	15.337	20.567	27.865	26.506	34.524	34.163
10.	Ukrajna	41.012	52.353	54.655	31.767	29.855	32.975	32.771
11.	Olaszország	17.277	26.501	25.467	26.759	19.848	27.252	24.080
12.	Tajvan	350	3.417	9.748	16.896	15.873	20.664	22.282
13.	Mexikó	3.881	7.156	8.734	15.631	14.132	18.073	18.208
14.	Franciaország	23.774	23.176	19.016	20.954	12.840	15.609	15.685
15.	Irán	0	550	1.425	6.615	10.908	14.463	15.422
16.	Spanyolország	7.394	12.643	12.936	15.874	14.358	13.639	14.252
17.	Kanada	11.200	15.901	12.281	16.595	9.286	13.507	12.415
18.	Egy. Királyság	27.833	11.277	17.841	15.155	10.079	9.579	11.858
19.	Ausztria	4.079	4.623	4.291	5.707	5.662	7.421	7.953
20.	Lengyelország	11.750	19.485	13.633	10.498	7.128	8.358	7.950
21.	Dél-Afrika	4.757	9.067	8.619	8.481	7.484	6.938	7.254
22.	Belgium	12.607	12.422	11.453	11.636	5.635	7.301	7.093
23.	Egyiptom	450	882	2.240	2.838	5.541	6.627	6.754
24.	Hollandia	5.042	5.272	5.412	5.666	5.194	6.879	6.713
25.	Vietnám	0	0	102	306	2.700	5.298	5.474

1. táblázat: Acéltermelés országonként, az egyes években, ezer tonnában megadva [8]

2.4. A VASÉRC (AZ ACÉLGYÁRTÁS ALAPJA)

A vas a földkéreg második leggyakoribb eleme (tömeg szerint) [1]. A vas a Föld kérgének kb. 4,7 %-át alkotja, és több mint száz vasásvány formájában van jelen. Ám a fémek többségéhez hasonlóan, elemi állapotban nem található meg [8].



A vas **ércásványai közül legfontosabbak az oxidok**, mint például az alábbiak (2. táblázat).

<ul style="list-style-type: none"> • 1. ábra⁵: a magnetit (mágnés-vasérc) kémiai neve: vas(II)-vas(III)-oxid összegképlet: Fe_3O_4 50-70% vastartalom 	
<ul style="list-style-type: none"> • 2. ábra⁶: a hematit (vörösvasérc, ferri-oxid) kémiai neve: vas(III)-oxid összegképlet: Fe_2O_3 35-65% vastartalom 	
<ul style="list-style-type: none"> • 3. ábra⁷: a limonit (barnavasérc) összegképlet: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O}$ 25-50% vastartalom Több olyan ásványfaj összefoglaló neve, amelyek az adott megjelenési formában nem különíthetők el egymástól. Legjellemzőbb alkotói a goethit, lepidokrokrit, hematit, ferrihidrit. [11] 	

⁵ Kép forrása: [12]

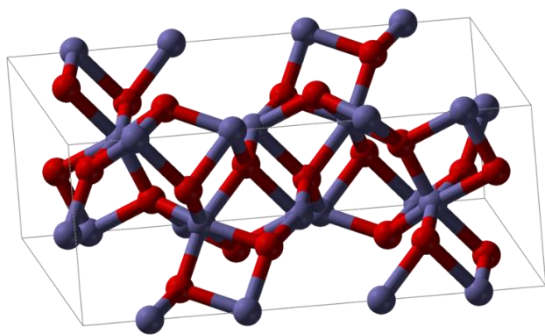
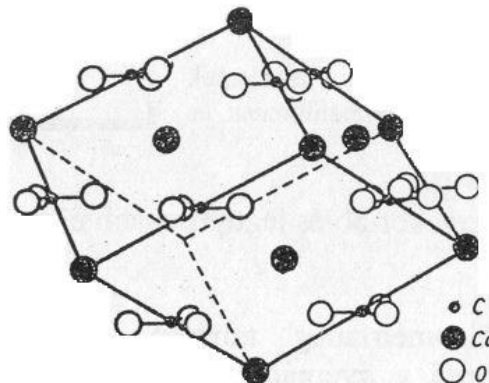
⁶ Kép forrása: [13]

⁷ Kép forrása: [14]

<ul style="list-style-type: none"> • 4. ábra⁸: a karbonát alapú sziderit (vaspát) kémiai neve: vas(II)-karbonát összegképlet: FeCO_3 25-40% vastartalom 	
<ul style="list-style-type: none"> • 5. ábra⁹: a goethit (bársonyvas-érc, tűzvasérc) összegképlet: FeO_2H Megnyúlt tűszerű vagy rostos kristályhalmazokban a rombos rendszerben kristályosodik. Gumós halmazokban is megtalálható. Prizmás lapos kristályai gyakoriak. [19] 	

2. táblázat: a vas legfontosabb ércásványai

A legfontosabb vasérc elemi celláit az alábbi ábrákon tekinthetjük meg (6 és 7. ábra).

6. ábra¹⁰: A hematit elemi cellája7. ábra¹¹: A sziderit elemi cellája a kalcittal egyező rács

⁸ Forrás: [15]

⁹ Forrás: [20]

További szép képek a galériában: <http://monstone.hu/Asvany/Kepek/Oxidok/Goethit/goethit.html>

¹⁰ Forrás: [47]

¹¹ Forrás: [48]

Az ércetek darabos kőzet formájában lehetők fel a természetben, szép kristályformát csak a megmunkálást követően vesznek fel. Az ércfeldolgozás főbb folyamatai az őrlés, a dúsítás, és a zsugorítás [6].

A vasat az ércből redukcióval¹² állítják elő: oxigént vonnak el tőle (eltávolítják a teljes oxigéntartalmat).

A redukciót szénrel és szén-monoxiddal valósítják meg, például:



¹² „Olyan kémiai folyamat, amelyben valamely vegyületből egy másik testnek behatása folytán a negatív komponensek (legtöbbször oxigén, kén, klór, stb.) részben vagy egészen elvonatnak; és ennek következtében az illető vegyületből egy kevésbé összetett rendszer áll elő.” [16] Részletesebben ld. a forrásban.

3. FIZIKATÖRTÉNETI MEGKÖZELÍTÉS

3.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS FEJLŐDÉSE

Korábban szerepelt, hogy **az acélgártás története a vasgyártásával együtt tárgyalandó.**

A legelső, ember által készített egyszerű vastárgyak megjelenése hosszú évszázadokkal megelőzi a vas előállításának képességét:

A régészek **meteoritvasból (8. ábra) készült golyókat, gyöngyöket** találtak egyrészt az **észak-iráni** területen, a Tepe Sialk-ban, a Kr.e. 4600-4100 körüli időszakról, másrészt ilyen leletek származnak a **gízai piramisokból** is a ~ Kr.e. 3000-2700 évekből. A **Kheopsz-piramisnál** pedig **vasszerszámokat** találtak.

Továbbá **vastárgyak** maradtak hátra a ~ Kr.e. 3-2. évezredből Anatóliából, Mezopotámiából, Egyiptomból, Szíriából és Görögország területéről is. [22]



8. ábra¹³: vasmeteorit

A **vaskorra** gondolva azonban azt egyértelműen kijelenthetjük, hogy **az emberiség technikai fejlődése szempontjából kiemelkedő jelentősége van a vas megjelenésének az emberi kultúra történetében.** [9]

A vas olvadáspontja 1538 °C, az acél pedig szénttartalmának függvényében már **ennél kisebb hőmérsékleten** is halmazállapot-változásra képes. Ilyen hőmérséklet **elérhető volt többnyire már az ókori technológiával is**, így elmondható, és **tárgyi bizonyítékokkal alátámasztható** (9. és 10. ábra), hogy a vasat **legalább 6000 éve felhasználja az emberiség.** [8]

¹³ Forrás: [22]



9. ábra¹⁴: Fonás ábrázolása a Várhelyen talált urnán (Naturhistorisches Museum, Bécs)



10. ábra¹⁵: Fegyverek a kora vaskorból

Idővel megkezdődött a vaskohászat kialakulása is, majd az iparág folyamatosan fejlődve kiforrtá magát mai állapotáig.

Az **első vaskohók** még csak **kis gödrök** voltak, melyekben **faszénnel izzították a vasércet** [9]. Ebben a *redoxi folyamatban a szén redukálta a vasércet* (elvonta oxigéntartalmát).

Az idő során **fejlődött ez az eljárás: nagyobb gödröket** használtak, illetve **agyagbélést** is készítettek beléjük, valamint a **tűz táplálását természetes huzattal** oldották meg. Ekkor a **gyártott termék alig olvadt meg, a szén pedig alig ötvözta a vasat** – a viszonylag kis hőmérséklet miatt. A röviden leírt eljárás során **az ércből elkészült a salakkal szennyezett acélszerű termék**. Ekkor viszont még nem volt felhasználható a produktum: **még el kellett távolítani a termékről a salakot**; erre megfelelő eljárás volt a **kovácsolás**. Ezt követően már fel lehetett használni **acélként a kapott mintát**. [9]

A fejlődés tovább folytatódott: a kemencék méretét tovább növelték, valamint ezekben a kohókban lehetővé tették az ún. **bőrtömlős levegőbefúvás** technikáját is. Ezek voltak a **bucakemencék**, amiket évszázadokon át használtak. [21] A következő fejezet egyik pontja kitér a **„Bucavas készítés és bucakemencék”** témájára.

Azonban **az ipar fejlődése során problémával** is meg kellett küzdenie a kohászoknak: **Az anyag teljes mértékben megolvadt, és nagyobb mértékben ötvöződött a szénnel** (a kohászok szóhasználatában a szén karbon néven szerepelt). Ennek az volt az oka, hogy a kemencékben elérhető hőmérséklet magasabb lett a nagyolvasztók és vízkerekes fűjtetés alkalmazása által.

¹⁴ Forrás: [23]

¹⁵ Forrás: [24]

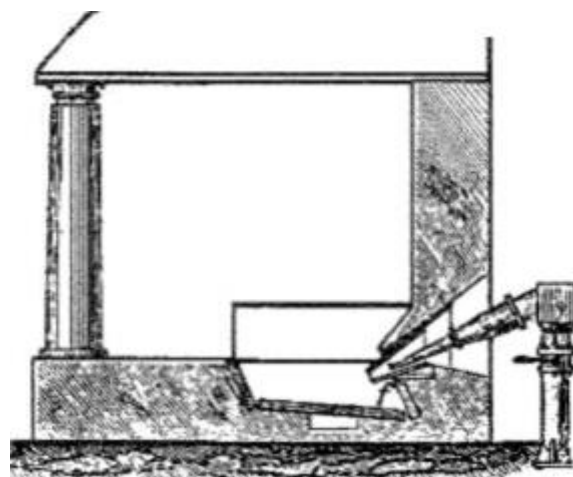
Ebben a folyamatban létrejött **termék kovácsolhatatlan volt, rideg minta adódott**; ezt nevezzük **nyersvasnak** vagy **disznóvasnak**¹⁶. [17]

Értelemszerűen **újfajta eljárásokat, metódusokat/módszereket kellett konstruálni az acélgyártáshoz, melyek segítségével használható termék adódik** [9], [17], [22]:

Fontos megjegyzendő, hogy az eddig említett acélgyártási módszereknél az acél nem folyékony állapotban jelent meg, viszont az ezután szereplő új technológiáknál már folyékony acéllal dolgoztak.

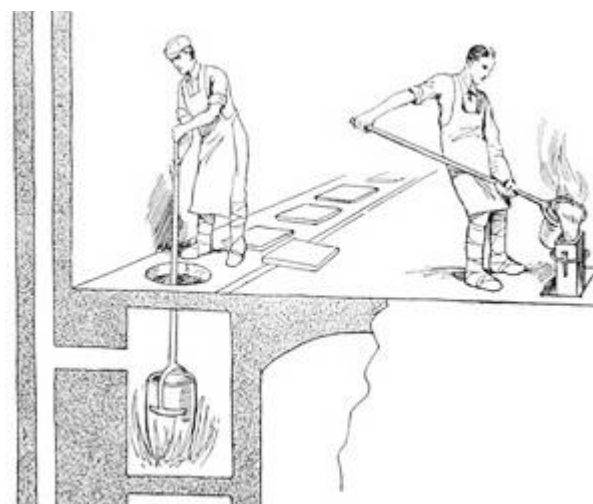
A korábbi procedúrákkal készült acél az ún. **forrasztott acél**, míg az újabb módszerek eredményeként készült az ún. **folytacél**.

- A **frisztűzi acélgyártás** (11. ábra) volt az első ilyen, újfajra szisztéma. A technika során **kiégették a nyersvas kísérő elemeit**; ehhez faszénnel **fűtött kemencét** és **oxigénben dús atmoszférát** alkalmaztak. Ez a módszer hosszú ideig, évszázadokig használatban maradt, például Svédországban még a 20. század elején is állítottak elő acélt ilyen eljárással.



11. ábra¹⁷: A frisztűzi acélgyártás

- Egy másik, újfajta módszer volt a **tégelyacélgyártás** (12. ábra); ezt Benjamin Huntsman dolgozta ki, 1740-ben. Ebben a technológiában **fedett tégelyben olvasztották a nyersvasat**; a folyamathoz **szükséges hőmennyiséget energiahordozók eltüzelésével** biztosították: eleinte **faszént** és **kokszt**, később **gáztüzelést** használtak. **Fontos módszerről beszélünk, ugyanis ez az ötvözött acélok gyártásának megkezdését jelentette.**



12. ábra¹⁸: A tégelyacélgyártás

¹⁶ Ebből származik a nyersvas angol neve: pig iron, és orosz neve: csugunnaja szvinyka [9].

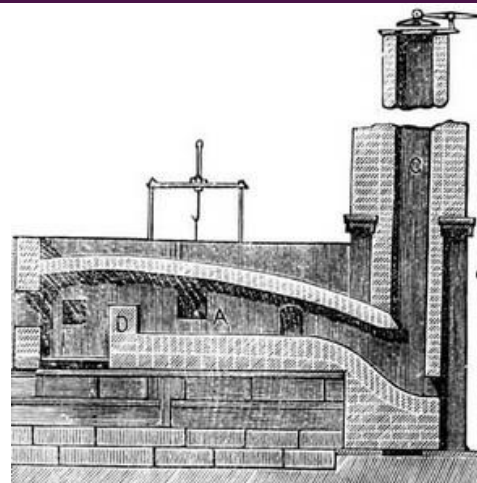
¹⁷ Forrás: [22]

¹⁸ Forrás: [22]

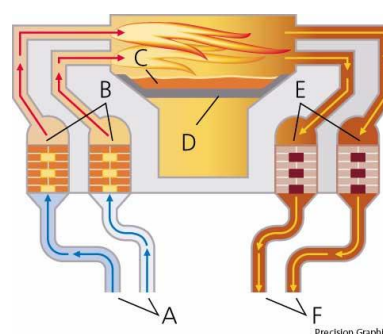
- Egy további, újfajta metódus volt a **kavaró acélgártási eljárás** (13. és 14. ábra); ezt *Henry Cort* fejlesztette ki, 1784-ben. A módszer használatakor **az olvadt nyersvas csak azzal az oxigénben dús füstgázzal találkozott**, ami a kőszén elégetéséből származott; ezt **lángkemence** használatával tették lehetővé. A **szisztéma elnevezése** is utal a metódus folyamataira: **az eljárás során hosszú vasrudakkal kavargatták a folyékony anyagot (fürdőt), így folytonosan újabb szegmens érintkezhetett az előbbieken említett füstgázzal.** [17]

A módszer előnyei:

- nagyobb termelékenység
- olcsó tüzelés (a kőszén miatt)
- jobban alakítható



13. ábra¹⁹: A Cort-féle acélgártás



14. ábra²⁰: Kavarófrissítési eljárás

A metódust csak a **19. század közepén** váltották fel **újabb technológiák** [9], melyek **kiszorították az iparból az addigra elavult módszert**: a **Bessemer-konverteres-**, a **Thomas-konverteres-** és a **Siemens-Martin-eljárások** vették át helyét.

- Egy fejlettebb, újabb módszer volt a **szélfrissítési Bessemer-konverteres eljárás** (15. és 16. ábra, a következő oldalon), melyet *Henry Bessemer* talált fel, 1855-ben. A metódus alkalmazásakor a **folyékony nyersvasat egy körte formájú konverterbe öntik, és levegőt fújtatnak át alulról ezen a nyersvasrétegen; az átfújatás során (a levegő oxigéntartalma miatt) az anyagból kiég a szén, a szilícium és a mangán.**

Kiemelendők a módszer előnyei:

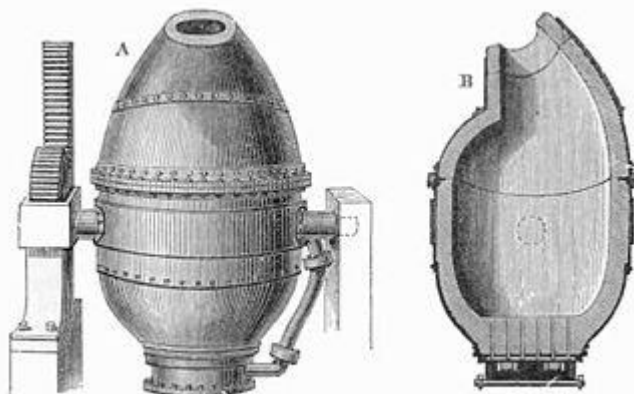
- Nem igényel külön tüzelőanyagot, mert a részvevő folyamatok exotermek (hőt ad le/hőtermelő).
- Igen nagy teljesítményű: nagy mennyiségű termék „keletkezik”.

¹⁹ Forrás: [22]

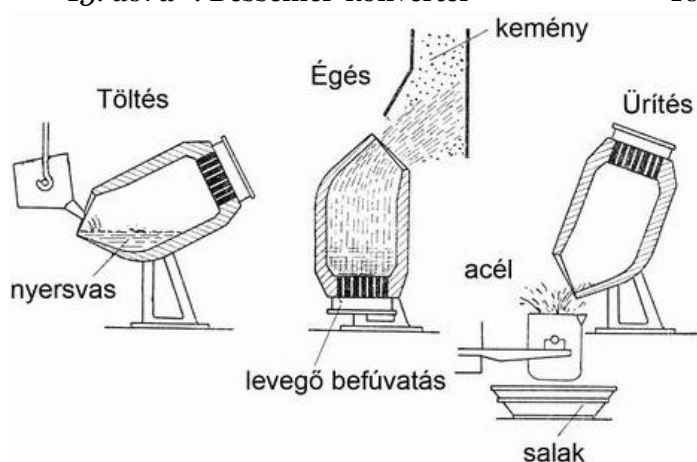
²⁰ Forrás: [1]



15. ábra²¹: Bessemer-konverter



16. ábra²²: Bessemer-konverter

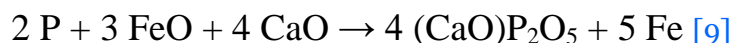


17. ábra²³: Bessemer-konverter vázlat



18. ábra²⁴: Thomas-konverter

- Másik fejlettebb, újabb módszer volt **a szélfrissítéses Thomas-konverteres eljárás** (17. és 18. ábra); ezt *Sidney Gilchrist Thomas* szabadalmaztatta, 1878-ban. A metódusban alkalmazott **konverter falai bázikus (magnezit és dolomit) tűzálló téglákból készültek** (ezen kívül szerkezete teljesen hasonló volt ahhoz, ami Bessemer-féle eljárásban használatos). A különleges falak miatt **az eljárás megfelelő volt a betét foszfortartalmának csökkentéséhez**: a folyamat során egyrészt bázikus salakképzőt (általában égetett meszet) adagotnak a reakcióba, másrészt a képződött vasoxid is szerepet játszott a foszfortalanításban; itt **többlepcsős kémiai folyamatokról** volt szó, melyek egyesített reakcióegyenlete a következő:



Az eljárás sikeres mivoltának bizonyítéka, hogy **foszfor-műtrágyaként** használták a megőrölt salakot és falazatot.

²¹ Forrás: [22]

²² Forrás: [9]

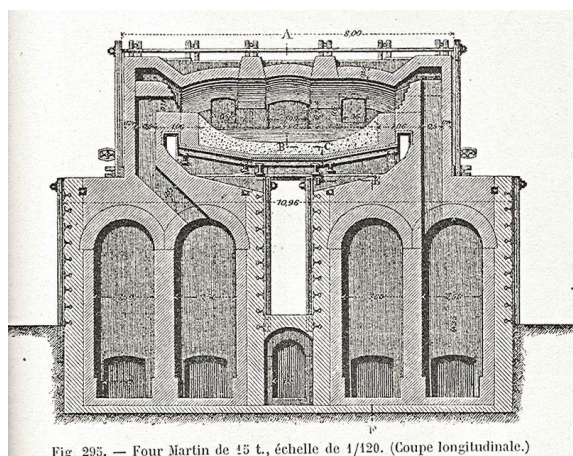
²³ Forrás: [29]

²⁴ Forrás: [22]

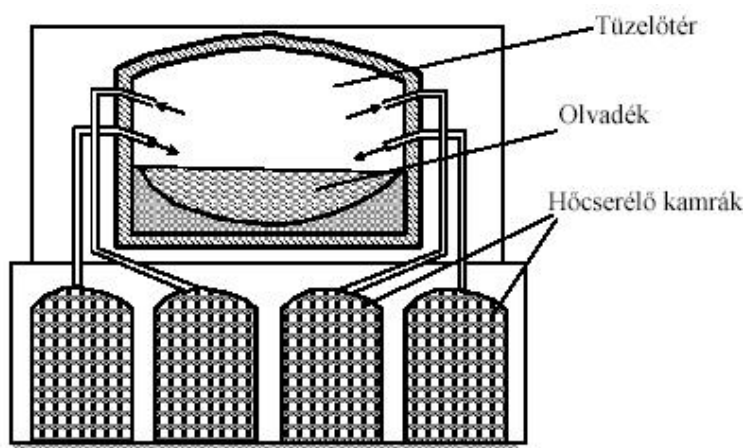
- A következő fejlettebb, újabb módszer a **Siemens-Martin-eljárás** (19. és 20. ábra) volt; ezt *Pierre-Émile Martin* francia mérnök konstruálta meg, 1864-ben. A technológia kialakításakor *Martin* felhasználta *Carl Wilhelm Siemens* elméletét (magyarázatát), mely a váltakozó lángjárású regeneratív tüzelési rendszerre vonatkozott. A módszer fontos érdekessége, hogy **lehetővé tette a folyékony nyersvas és az ócskavas felhasználását is, valamint kiindulásként szilárd betéttel is lehetett dolgozni.** Ez volt az az eljárás, melynek révén megvalósulhatott az igen változatos ötvözöttségű acélok gyártása.

A módszer gyártási folyamata 2 részből áll:

1. **oxidáló (frissítő) szakasz:** ez a fázis hosszabb volt, mint a szélfrissítési eljárásoknál, emiatt az adagidő is elhúzódott;
2. **redukáló (kikészítő) szakasz:** ekkor végezték el az oxidálódott vas visszaredukálását, valamint például itt került sor az ötvözésre is.



19. ábra²⁵: Siemens-Martin-kemence egykori rajza. Fent látható a teknő alakú kemence, alul a levegő és a fűtőgáz előmelegítésére való regenerátorok



20. ábra²⁶: Siemens-Martin-kemence

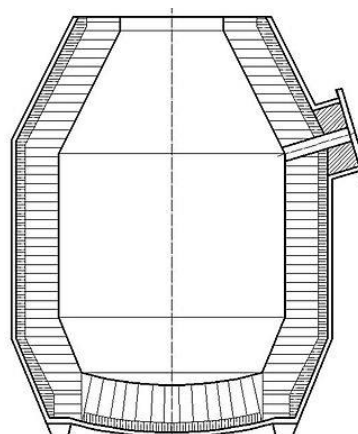
Ez az eljárás majdnem száz évig vezető módszere volt az acélgégyártásnak, azonban az oxigén konverteres eljárások megjelenésével egyre inkább háttérbe szorult.

Napjainkra az oxigénbefúvós módszer maradt meg a konverteres acélgégyártási módszerek közül.

A technológia első képviselője a **LD (Linz-Donawitz)-konverter** (21. és 22. ábra) volt; ezt más, hasonló módszerek követték. Az LD-konverter módszerét a svájci *Robert Durrer* szabadalmaztatta, 1948-ban. Az LD elnevezés az ausztriai *Linz-re* és *Donawitz-re* utal, melyek az eljárás kidolgozásának helyét jelölik.

²⁵ Forrás: [9]

²⁶ Forrás: [22]

21. ábra²⁷: LD-konverter22. ábra²⁸: LD-konverter metszete

A módszerben a következőképp történik az acélgyártás:

1. **„Beadagolás”**: A legalább 1000°C-os konvertert megdöntik, és beadagolják a nyersvasat és az acélhulladékot (ha hulladékkal is dolgoznak – ez esetben a nyersvas el kell fedje a hulladékot).
2. **„Oxigén-fúvatás”**: A konvertert visszaállítják függőleges helyzetbe, leengedik az oxigénlándzsát, és oxigént fújatnak a nyersvasra és az acélhulladékra (először távolabbról kezdik a fúvatást). A fúvatás ideje megközelítőleg 12–20 perc.
Ebben a módszerben az oxigénbefúvás felülről történik, de vannak alsó befúvások, hasonló technikák is.
3. **„Salakképző hozzáadása”**: A rendszerhez égetett meszet (CaO), folyapátot (CaF₂), és esetleg vasércet adagolnak salakképző gyanánt.
 - Az égetett mészh hozzájárul a foszfortalanításhoz és a falazat védelméhez is.
 - A folyapát funkciója a mészh oldódásának elősegítése.
 - A vasérc hozzáadásával több salak képződik.

Ezek révén megkezdődik a redoxi folyamat, oxidálódni kezdenek a kísérőelemek: a vas, a szilícium és a mangán.

Folyamatosan van salakképződés, a salak anyagi összetétele a folyamatokkal konzekvensen változik.

4. **„Lándzsa lejjebb engedése”**: Fokozatosan lejjebb engedik a lándzsát. Eközben exoterm (hőtermelő) folyamatok játszódnak le a rendszerben, így a fürdő hőmérséklete megemelkedik.
Ha a hőmérséklet túl magas, akkor csökkenését acélhulladék adagolásával érik el.
5. **„Csapolás”**: A konvertert megbillentik, és lecsapolják a kapott terméket.
6. **„Ötvözők hozzáadása”**: Az ötvözőket sok esetben nem a konverterben adagolják hozzá a rendszerhez, hanem gyakran a csapolás után, az üstben ötvöznek; ez az ún. **üstmetallurgia**.
Ám természetesen lehetséges a konverterben történő ötvözés is: ekkor az ötvözőket az adagkészítés 2. részében adagolják a konverterbe, még a csapolás előtt.

A módszer előnyei:

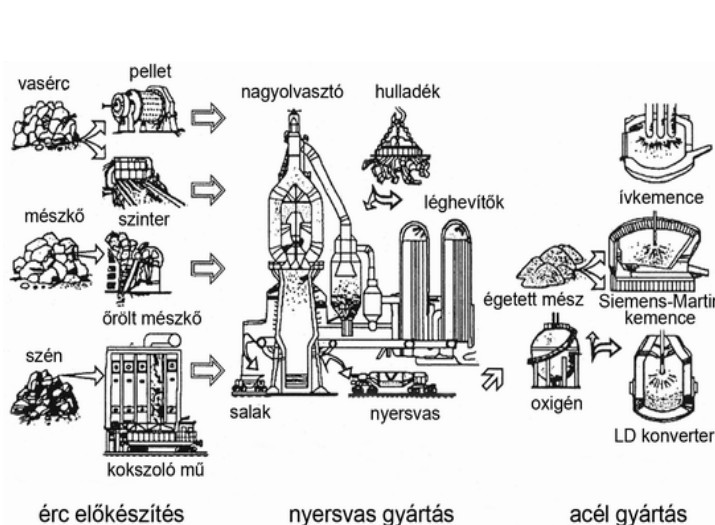
- Olcsóbb a Siemens-Martin-eljárásnál.
- Egyszerűbb, mint az előbbi eljárás.
- Nagyobb hatékonyságú, több végtermék „keletkezik”.

²⁷ Forrás: [22]

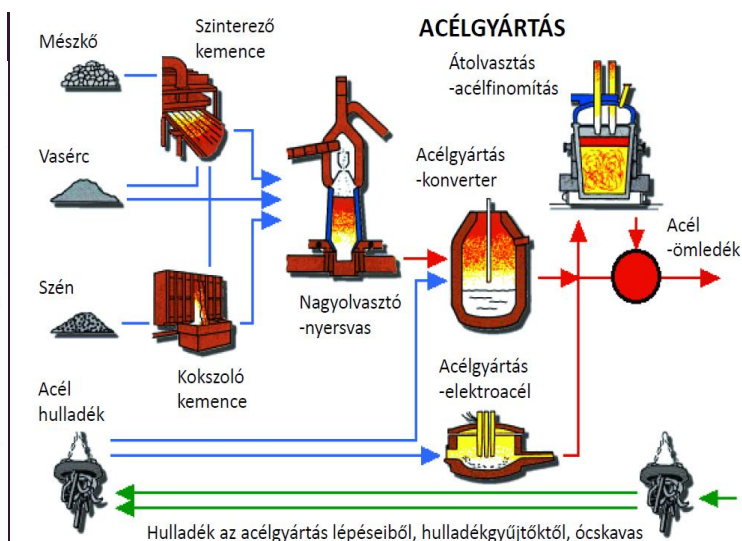
²⁸ Forrás: [9]

4. AZ ACÉLGYÁRTÁS ÉRDEKES FIZIKAI FOLYAMATAI

4.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS FIZIKAI-KÉMIAI FOLYAMATA



23. ábra²⁹: Acélgártás folyamata 1.

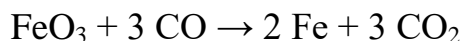
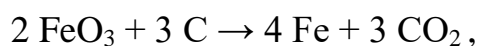


24. ábra³⁰: Acélgártás folyamata 2.

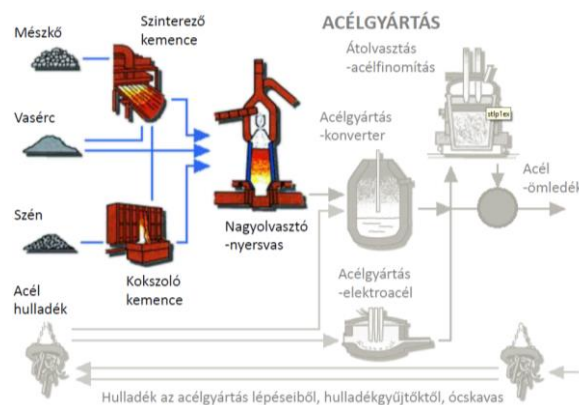
Az acélt 2 lépésben gyártják, az általános gyártástechnológia nyomán. Az acélgártás folyamata (23. és 24. ábra) során a következő történik [8],[9],[1]:

1. Nyersvasgyártás (25. ábra):

Ahogy az már a „2.3. A vasérc (az acélgártás alapja)” részben szerepelt, a vasat az ércből **redukcióval**³¹ állítják elő: **oxigént vonnak el tőle (eltávolítják a teljes oxigéntartalmát)**. A redukciót szénnel és szén-monoxiddal valósítják meg, például:



A nyersvas-előállítás **nagyolvasztóban** történik, ebben valósul meg az előbb leírt redukció végrehajtása. A fejezet egyik későbbi pontja kitér „A nagyolvasztó” tárgyalására. A **nyersvas képlékenyen nem alakítható, mert túl magas a kARBONTARTALMA**; ez arra vezethető vissza, hogy a folyékony vas jól oldja a szenet, így jól ötvöződnek.



25. ábra³²: Az acélgártás első lépése, itt tartunk most

²⁹ Forrás: [29]

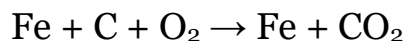
³⁰ Forrás: [6]

³¹ Olyan kémiai folyamat, amelyben valamely vegyületből egy másik testnek behatása folytán a negatív komponensek (legtöbbször oxigén, kén, klór, stb.) részben vagy egészen elvonatnak; és ennek következtében az illető vegyületből egy kevésbé összetett rendszer áll elő.” [16] Részletesebben ld. a forrásban.

³² Forrás: [6]

2. Acélgártás: Ez **oxidációs** folyamat (a nyersvasgyártással ellentétben), ld. alább:

- **Kiinduló anyag:** a **nyersvas** és az **ócskavas**,
- Nem használandó, „**káros**” **kísérőelemek eltávolítása** a kiinduló anyagból: Képlékeny acélra a van szükség végtermékként, ehhez el kell távolítani a fölösleges szenet és egyéb „szennyezőt” a rendszerből. Ebben a szakaszban **kiegyenlítik a C-, Si-, Mn-, P- és S-tartalmat a rendszerből; ez oxidációs folyamat³³: oxigént adnak (juttanak) a vashoz az alábbi kémiai reakcióban**



Az oxigén rendszerbe juttatásának módjai:

- Kavarófrissítés (régén)
- Martin kemence (kb. 50-100 éve)
- Konverter: kibuborékolatás (most)
- **Ötvözés** „hasznos” elemekkel **és a megfelelő mikroszerkezet kialakítása:** Ezáltal adódnak a sokoldalúan felhasználható, különböző minőségű acélfajták.
- A **folyékony acél kiöntése** folyamatos öntőgépbe vagy kokillába³⁴.
- **Kikristályosítás.**
- Az kész acél **tulajdonságai tovább alakíthatók hőkezeléssel és hideg vagy meleg képlékeny alakítással** (kovácsolás, hengerlés, kisajtolás stb.) egyaránt.

Hőkezelésen az alábbi értendő:

- Edzés: hirtelen lehűtés hideg vízben
- Megeresztés: visszamelegítés és várakozás.

Ezek által kemény és szívós szerkezete lesz.

Az alábbi ábrán tekinthetjük, hogyan változik a szerkezet a hőmérséklet és az ötvözők függvényében, az edzés (balra) és a megeresztés (jobbra) során (26. ábra, köv. old.).

Az acélgártás folyamata **igen gazdaságos eljárás:**

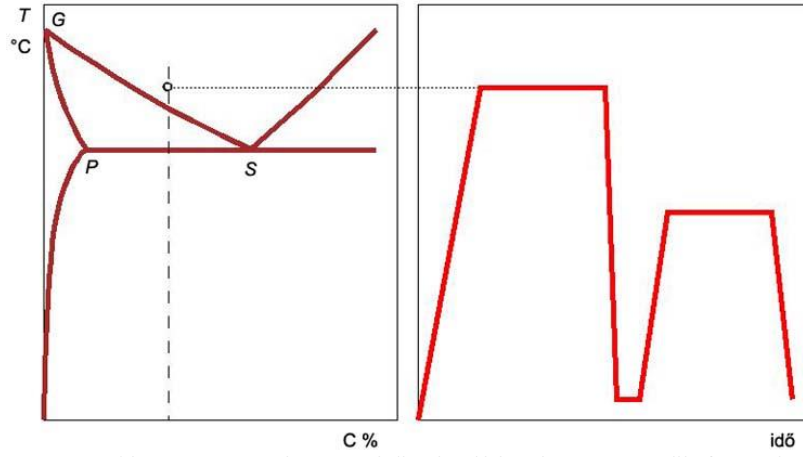
- Klasszikusan 4 hevítésből áll (olvasztás, acélgártás, öntés, hengerlés)
- Míg manapság 1 hevítés van jelen.
- Minden folyamat 1 helyen történik.

³³„Az a kémiai folyamat, melyben a testek vagy ezeknek alkotó részei oxigénnel egyesülnek; ilyen kémiai folyamat az égésnek mind a két nemes (lassu és gyors égés), az állati szervezet anyagcseréje, a korhadás stb., mert e folyamatokban szereplő testekből a levegő oxigénjének rovására különféle oxigéntartalmu vegyületek (viz, széndioxid stb.) képződnek. Az a testet, mely az O.-t létre hozza, oxidáló szernek nevezzük. Az O.-nak úgy szólván ellentettje a redukció” [25]

„A régebbi értelmezés szerint oxigénfelvétel, ill. hidrogénleadás. Ma ennél kiterjedtebb az oxidáció fogalma: minden olyan folyamatot, amelyben atomok, molekulák v. ionok elektront adnak le oxidációnak nevezünk (az elektronfelvétel a redukció). oxidáció csak akkor mehet végbe, ha egy másik anyag (atom, molekula. ion) az elektronokat felveszi, azaz redukálódik.” [26]

Részletesebben ld. a forrásokban.

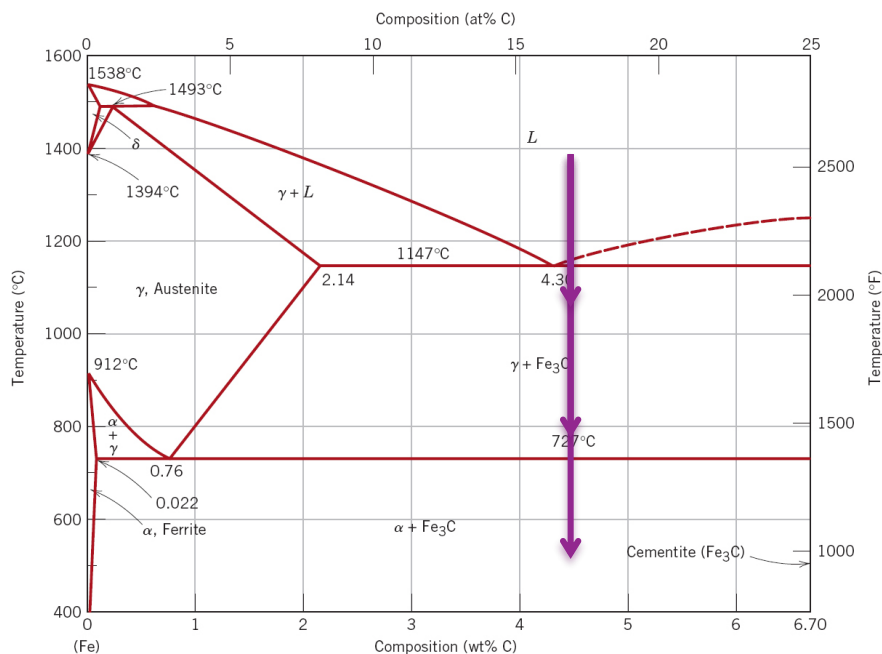
³⁴„A kokillába öntés mára erősen visszaszorult, az acél jelentős részét folyamatos öntéssel kristályosítják. Kokillába a kovácsolásra, csőhengerlésre szánt tuskókat, a különleges acélminőségeket öntik. A tuskók régebben használt elnevezése az öntecs volt.” [9]



26. ábra³⁵: A szerkezet a hőmérséklet és az ötvözők függvényében

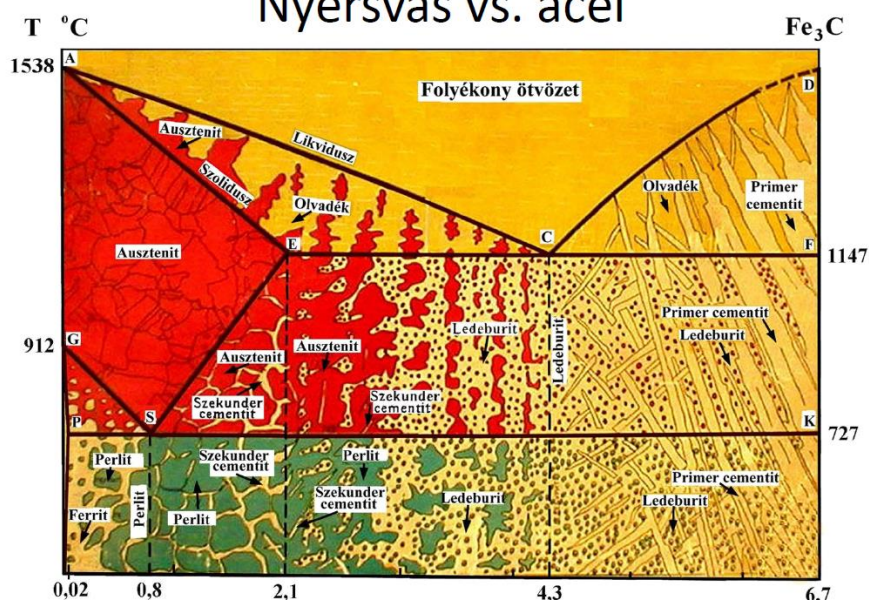
4.2. A NYERSVAS ÉS AZ ACÉL

Már szerepelt, de ismét kiemelendő, hogy a nyersvas nem azonos az acéllal, de a nyersvasból acél készíthető megfelelő folyamatokban; ezt az alábbi ábrák is szemléltetik (27. és 28. ábra).



27. ábra³⁶: A nyersvas és az acél különbségei

Nyersvas vs. acél



28. ábra³⁷: A nyersvas és az acél

A következő folyamat játszódik le [1]:

- A **nagyolvasztóban a szén feloldódik** a folyékony vasban
(A fejezet egyik későbbi pontja kitér „A nagyolvasztó” tárgyalására.)

³⁶ Forrás: [1]

³⁷ Forrás: [6]

- Majd **eutektikus pontba** (ld. [később](#)) **hűl** (4,3 m/m% C)
- Végül a **megszilárdulás** után magas széntartalma lesz
 - **kiválik** a cementit (Fe_3C) és a grafit
 - így **kemény, de rideg anyag adódik**.

A jegyzet végén további elemek szerepelnek, amik a [„Fázisdiagramok és kapcsolatuk az anyagszerkezettel”](#) témáját taglalják.

4.3. BUCAVAS KÉSZÍTÉS

A témakör feldolgozásához kiemelten javaslom [Prof.Dr. Tichy Géza cikkének \[2\]](#) tanulmányozását.

4.3.1. BUCAVAS-GYÁRTÁS

A [„Fizikatörténeti megközelítés”](#) fejezetben már [említésre került](#) a bucavasgyártás, most kicsit részletesebben is olvasható ez a kérdéskör.

Videó a középkori vaskohásatról [\[3\]](#):



A **bucavasgyártás volt az egyik nagy mérföldköve a vas érceiből való előállításának**. Ez egy „**ősi technológia**” a vaskorból [\[1\]](#). Bucatűzhely-maradványok kerültek elő már a *Kr. e. 15. századból* származó leletek közt is, az *oroszországi Voronyezs környékéről*. A **technológia elterjedése** pedig Közép- és Nyugat-Európában ~ *Kr. e. 8-6. század* környékére tehető. [\[9\]](#)

A **honfoglaló magyarok (895-900 táján) fejlett vaskohászati tudással** érkeztek a Kárpát-medencébe. Az urál-altáji népektől szerezték ezt a tudásrendszert, ők ugyanis fejlett vasművesek voltak [\[28\]](#).

A **módszert még évszázadokig alkalmazták** [\[22\]](#) . Egészen a 18. századig működtek bucakemencék Európában [\[1\]](#). Ebben a koncepcióban a vas nem olvad meg, szivacsos szerkezet jön létre, ebből pedig a szén kiegészíthető.

A bucavasgyártás során vázlatosan a következő történik [1]:

- **Kiinduló alapanyagok:** vasérc (gyepvas) + faszén
- **Salak egy része megolvad és kifolyik**
- További folyamatok:

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$CO + FeO \rightarrow CO_2 + Fe$$
- **Eredmény:** vas + salak
- A termék további **megmunkálása:** kalapácsolás a hámorban(=kovácsüzem)
- **Végeredmény:** kovácsoltvas.

4.3.2. BUCAKEMENCE

Az Árpád-kori kohászok a vas előállítását bucakemencében (29. és 30. ábra) végezték. Egy iparos általában több kohót is működtetett egyidejűleg. A kemencék körben vagy félkörívben voltak megépítve, a terepviszonyokhoz igazodva. Utóbbi volt például a Somogyfajszon feltárt műhely, ezt mára részben rekonstruálták. [17]



29. ábra³⁸: Bucakemence



30. ábra³⁹: Bucakemence maradvány Sopron környékéről

Technikai fejlesztés volt, hogy egy idő után a bucakamencék fúvatását vízi erővel valósították meg, a korábbi kézi meghajtás helyett. Ez magyar területeken körülbelül 1320-ban honosodott meg.

Az új metódus segítségével **a teljesítmény rendkívül fokozódott**, így lehetőség adódott a termékek tovább adására is: **a vas és vaskészítmények exportálására**. Magyar nyelvű területeket tekintve, elsősorban a Felvidéken virágzott ez a kereskedelem, de általánosságban is nagy keletje volt a magyar termékeknek, melyre tárgyi bizonyítékok a korból fennmaradt dokumentumok:

³⁸ Forrás: [1]

³⁹ Forrás: [22]

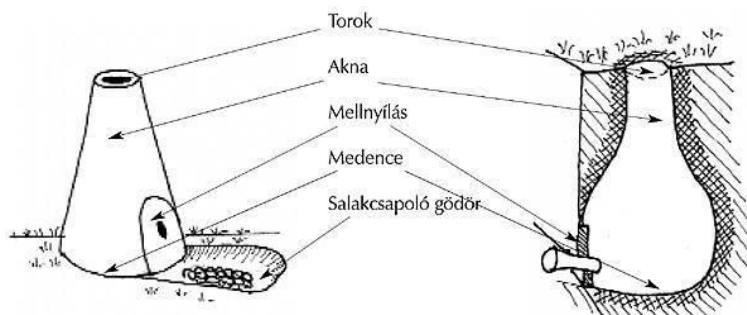
- „a danzigi piacon a legkeresettebb vas a svéd, a magyar és a spanyol vas volt”
/egy 1362-es dokumentumból/
- Arról is van feljegyzés, hogy az 1380-as években a Balti-tenger kikötőiből jelentős mennyiségű magyar vasat szállítottak Angliába. [17]

Az ilyen típusú módszernél a következő fizikai-kémiai folyamatok történtek

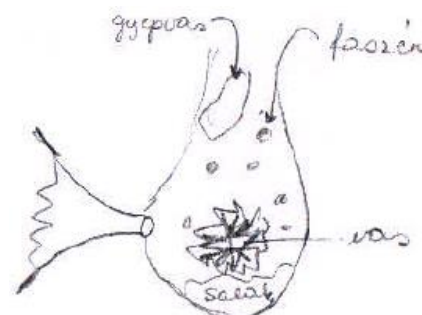
[22]:

- A vas-oxid tartalmú érc **közvetlenül/direkt** fémessé **redukálása** a **bucakemencékben** (esetleg olvasztógödörökben).
 - Ez egy nagy veszteségű, hosszadalmas eljárás volt, melyben a vasérc „meddőtartalmából” **folyékony salak képződött**.
 - Azonban **a fém nem került folyékony halmazállapotba a procedúra során** (emiat mondjuk, hogy közvetlenül/direkt redukáljuk), ezért **a vas csak kevés szén oldott fel**.
 - Az ércet egyébiránt relatíve alacsony művelésű bányákból vagy külszíni gyűjtésből származtak.
 - A folyamat segítségével az ércből ún. **vasbuckák jöttek létre**, ezek **heterogén szerkezetű, közvetlenül alakítható, salakkal szennyezett** halmazok voltak.
- **Salak eltávolítása kovácsolással.**
- **A végtermék acélként felhasználható volt.**

A bucakemencék felépítése és működésének vázlatát az alábbi ábrák látható (31. és 32. ábra).



31. ábra⁴⁰: Bucakemence felépítése



32. ábra⁴¹: Bucakemence működése

A korábbiakban olvasható volt a levegőbefúvásban megjelenő **technikai újítás**: a **vízikerék használata**. Ez azonban a **nagyobb teljesítmény mellett, a kemencék hőmérsékletének megnövekedését is okozta**. A „[Fizikatörténeti megközelítés](#)” fejezetben már [szerepelt](#), hogy emiat az **anyag teljes mértékben megolvadt, és nagyobb mértékben ötvöződött a szén**el. Az így létrejött **termék kovácsolhatatlan**

⁴⁰ Forrás: [22]

⁴¹ Forrás: [27]

volt, rideg minta adódott; ez az ún. **nyersvas**, öntött vas vagy *disznóvas*⁴² [17], ami az **átmeneti fázis** a nyersvas és az acél közt.

A **probléma megoldása** céljából **változtattak** az imént ismertetett fizikai/kémiai gyártási folyamaton: **kidolgozták a kétlépcsős/indirekt eljárást**. Ebben a **metódusban a következő történt:**

- A primer nyersvas **széntartalmát csökkentették „frissítéssel”**: **oxigénhordozó hozzáadásával, azaz oxidációval**.
- Így már **alakítható acél volt az előállított végtermék**. [22]

A mai, 2 lépésből álló acélgyártási módszerben is megjelenik oxidációs szakasz.

4.4. KOVÁCSOLÁS

Az [acélgyártás folyamatának leírásánál](#) már szerepelt, hogy **a kész acél tulajdonságai tovább formálhatók képlékeny alakítással** (kovácsolás, hengerlés, kisajtolás stb.), hidegen és melegen egyaránt. A kovácsolás fizika szempontjából érdekes folyamat lehet. Ez a tevékenység a fizikatörténeti részben is [említésre került](#).

Videó a kovácsolásról [4]:



A kovácsolás volt a legősibb módszer, melyben fémek képlékeny alakítására került sor. A régészek találtak erre tárgyi bizonyítékot már a bronzkorból fennmaradó leletek közt is [30].

Kovácsolás során a következő zajlik [30]:

- **A fémet (vasat) alakítják:**
 - **ütésekkel vagy nyomással,**
 - **kézi vagy gépi úton,**
 - **meleg, hideg vagy félmeleg állapotban** (megoldható a legtöbb képlékenyen alakító technológiánál),
 - ezt **általában 2 szerszám felületei közt** végzik.
- **Finomabbá válik az eredetileg durvának mondható szövetszerkezet.**

⁴² Ebből származik a nyersvas angol neve: pig iron, és orosz neve: csugunnaja szvinyka [9].

- **Jobbá válhatnak a minta mechanikai tulajdonságai, mint például *kontrakció, nyúlás, fajlagos ütőmunka*.** Ez annak köszönhető, hogy a szövetszerkezetben lévő szálelrendeződés formálható úgy, hogy az megfeleljen a későbbi igénybevételnek (erre vannak adekvát eljárások).
- A kovácsdarab(ok) **minősége tovább javítható hőkezeléssel.**
- **A végtermék:** milliméteres nagyságrendtől méteres nagyságrendig terjedő mintadarabok.

Mennyire gazdaságos a módszer? [\[30\]](#)

- A sorozatok nagysága határozza meg, a gyártás költségeit, és így a választott konkrét módszert is.
Minél nagyobb a széria, annál kisebb a szerszám fajlagos költsége.
- A gyártási költség egyik tényezője a forgácsolási költség.
- További költségek:
 - melegítés,
 - gépek működtetése,
 - élőmunka,
 - stb.

4.5. MARTENZITES ÁTALAKULÁS

Az [acélglyártás folyamatának leírásánál](#) már szerepelt, hogy **a kész acél tulajdonságai tovább formálhatók hőkezeléssel.** Hőkezelésen az alábbi értendő: edzés (hirtelen lehűtés hideg vízben), megeresztés (visszamelegítés és várakozás).

Az **edzés során fellépő martenzites átalakulás** a fizika szempontjából érdekes folyamat lehet.

4.5.1. A MARTENZIT

A **martenzit az acél edzésekor kialakuló állomány (szövetelem):** ha az acélt edzéskor hirtelen lehűtjük, akkor **összenőtt, lemezszerű túkristályok** jönnek létre, **melyek ridegek és kemények.**

Az elnevezés *Arthur Martens*, német mérnök nevéből származik.

A martenzit alapvetően egy **metastabil struktúra** (mert kialakulása során nem megy végbe az ausztenit → ferrit átalakulás: ld. alább). Jellemző rá az **elcsavart kocka alakú kristályszerkezet**, mely a vas szerkezetében lévő szénatomok miatt alakul ki [\[34\]](#); ld. alább.

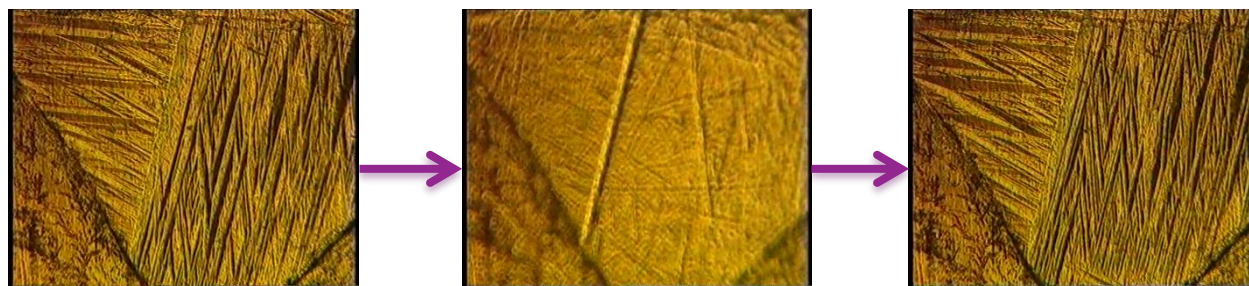
Az edzés célja az, hogy a kívánt mértékben martenzitessé (keményvé) váljon az anyag.

A martenzites kialakuláshoz a 0,4 tömeg%-nál nagyobb széntartalom kedvező [\[8\]](#).

Karbondartalomtól (széntartalomtól) függően 3 különböző morfológiájú változata ismert a martenzitnek [33]:

- léces felépítés, ez a leggyakoribb,
- korong-forma,
- és lemezszerű alak.

A martenzit **röviden a következőképp alakul ki** (32. ábra) (részletesen ld. a következő alpontban) [8], [34]:



32. ábra⁴³: a martenzit kialakulása

1. Az acél **ausztenítésése**: összetételétől függően, adott hőmérséklet fölél **hevítik** 20-50 °C-al, és ezen a **hón tartják**; így alakul ki az ausztenit.

Ausztenit/gamma-vas = a vas lapcentrál köbös allotrop módosulata (kristálymódosulata) [32].

2. **Gyors lehítés**: a *hűtőközeg* adekvát megválasztásával érhető el a kellő hűtési sebesség, például *víz, olaj, só- vagy fémoldadék fürdő*.

Ekkor „befagy” a korábbi állapot, amely az izzítás hőmérsékletén fennállt.

3. Az ausztenit **átalakul tércentrál szerkezetűvé**, de mindig **metastabil állapotú** marad:

A γ -vas **átalakul α -vassá**, de az **oldott karbondartalom (széntartalom) továbbra is oldva marad**, mely a γ -vasban jelen volt [31].

Ferrit/alfa-vas = a vas tércentrál allotrop módosulata (kristálymódosulata).

Azonban a **ferrit sokkal kevesebb szenet képes oldani**, mint az ausztenit.

A túltelített ferritból pedig **nem tud kiválni a szén**, ugyanis kisebb hőmérsékleten lassabban indul be a diffúzió, itt ez nem történik meg.

Tehát az ausztenit átalakulása **diffúzió nélkül** megy végbe: **az atomok együttesen elmozdulnak, és a rács átbillen a másik fázisba**.

4. A **tércentrál szerkezet a szén miatt torzul, és kialakul a martenzit**: a **szénatomok** csak bizonyos helyekre „ugranak be”, ezáltal **lokálisan torzítják a kristályrácsot**.

- **Tetragonális martenzit**: főként a nagyobb széntartalmú ($C > 0,2\%$) acélokban jön létre. A szénatomok tércentrál tetragonális szerkezetűvé torzítják a köbös szerkezetet (szabályos kockarácsot).

- **Köbös martenzit**: kis széntartalmú acélokban keletkező martenzit köbös szerkezetű marad.

⁴³ Forrás: [1]

Videó a martenzites átalakulásról, Dr. Juhász András közreműködésével [5]:



A **hűtés sebességével szabályozható**, hogy **mekkora mennyiségű** ausztenit alakuljon át martenzitté [8].

A martenzites átalakulás a hőmérséklet függvénye:

- Mivel nem egyensúlyi fázisátalakulás, **nagy ΔT túlhűtést igényel**.

*Túlhűtéskor az új fázisok létrejötte eltolódik a fázisdiagramon (állapotábrán): a fázisátalakulás az egyensúlyi folyamathoz képest **alacsonyabb hőmérsékleten** jön létre, mialatt véges sebességgel áthaladunk a fázishatáron.*

- **A túlhűlés mértéke a lehűlési sebesség függvénye.**
- **A martenzit-kialakuláshoz szükséges idő fordítottan arányos a túlhűtés mértékével:**
 - annál kisebb csírákból, annál gyorsabban tud martenzit túlkristály kialakulni, minél nagyobb a túlhűtés mértéke;
 - és a kialakulás ideje nő, minél közelebb vagyunk az egyensúlyi hőmérséklethez, ekkor $\Delta T \rightarrow 0$.

*Gyakorlati példa a túlhűlésre a **zsebmelegítő párna** [37]:*

*Általában tenyérynyi méretű műanyag zacskó, nátrium-acetát töltettel (ez tartalmaz kristályvizet). A töltet-anyag **túlhűlésre** képes: hőmérséklete jóval a fagyáspontja alá csökkenhet fázisátalakulás nélkül.*

A zacskókban egy apró fémlemez is van, melynek megpattintása indítja el a túlhűlés fizikai folyamatát; ezt ujjunkkal könnyedén megtehetjük télen.

Kísérlet: a fémlemez elpattintása.

Tapasztalat: a zacskóban lévő hideg folyadék pillanatok alatt elkezdi kristályosodni, és melegé is válik.

Következtetés és magyarázat: azaz megindul a zacskóban lévő folyadék fázisátalakulása, és mellette a folyamat hőt termel. Igyekszik a fagyáspont közeléig melegíti az anyagot (ez tartja melegen a kezünket).

A kristályos anyag újra felolvasztható, ha a zacskót forró vízbe tesszük, és felolvasztjuk az összes kristályt.



33. ábra⁴⁴: melegítőpárna



34. ábra⁴⁵: újrahasználatos kézmelegítő

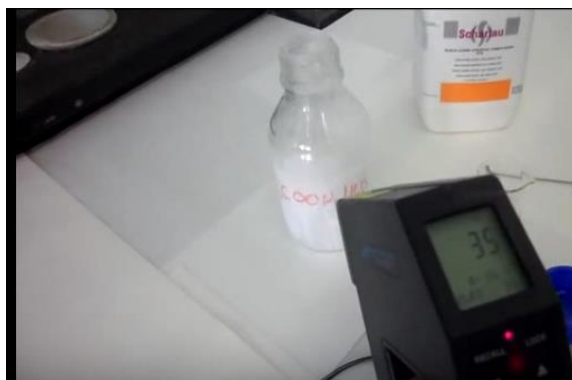


35. ábra⁴⁶: kézmelegítő



36. ábra⁴⁷: melegítőpárnák

Videón: [\[41\]](#), [\[42\]](#):



Másik gyakorlati példa a túlhűlésre a víz túlhűtése: [\[43\]](#)



44 Forrás: [\[37\]](#)

45 Forrás: [\[39\]](#)

46 Forrás: [\[38\]](#)

47 Forrás: [\[39\]](#)

A martenzitnek kisebb sűrűsége van, mint az ausztenitnek, ezért a **térfogatnövekedés** is a fázisátalakulás egyik következménye, emiatt pedig a következők lépnek fel [8]:

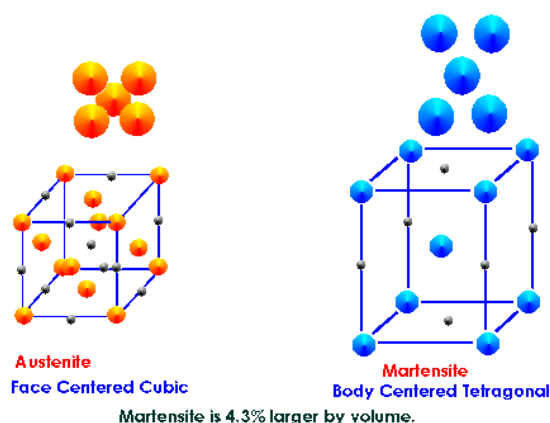
- **belső nyomófeszültségek** a martenzitkristályokban,
- **húzófeszültség** az ezeket körülvevő ferritben,
- jelentős **nyírófeszültség** mindkét kristályban.

Az **edzés helytelen kivitelezése** akár **repedésekhez** is vezethet, ennek oka a belső feszültségek jelen léte. Zömében **megeresztés** következik az edzés után, ennek célja, hogy a martenzites állapot **ridegségét csökkentsék**.

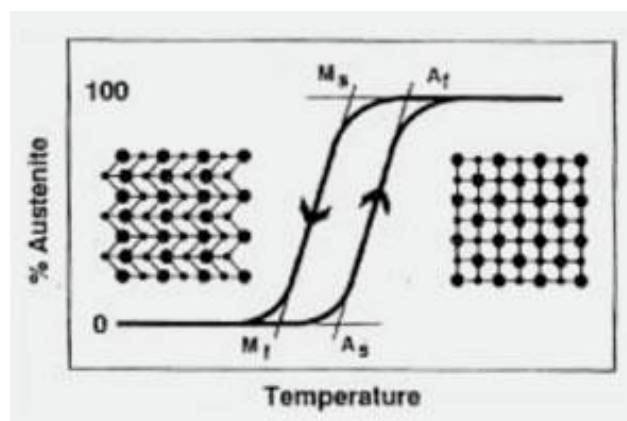
4.5.2. A MARTENZITES ÁTALAKULÁS KRISTÁLYTANA

A martenzites átalakulás egyfajta **fázisátalakulás**. Olyan fémekben, ötvözetekben és kerámiákban játszódhat le, melyekben előfordul **allotrop átalakulás**, vagy valamilyen **rácsszerkezet-átrendeződés** [35].

A martenzit az ausztenitből jön létre **szilárd-szilárd fázisátalakulás** során (a folyamat leírását röviden ld. feljebb), például **tiszta vasnál** ez történik **912 °C** hőmérsékleten.



37. ábra⁴⁸: Szilárd-szilárd fázis-átalakulás fcc (ausztenit) és BCT (martenzit) fázis között (pl. tiszta Fe 912 °C-on)



38. ábra⁴⁹: Az ausztenit átalakulása

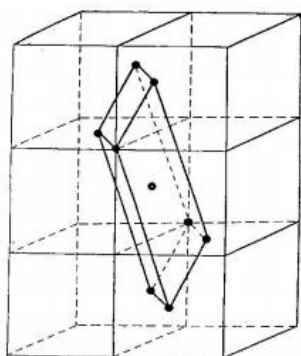
Az átalakulás alatt, a kiinduló (**ausztenit**) **lapcentrált köbös (FCC)** fázis, és a végső (**martenzit**) **tércentrált tetragonális (BCT)** fázis közt adott **kristálytani kapcsolat** van, melyre teljesülnek az alábbiak (37. és 38. ábra) [35]:

- Az ausztenit és a martenzit rács között **reprodukálható viszony** van, ugyanis:
 - az **atomok** egymáshoz viszonyított **távolsága megváltozik**,
 - de a **szomszédsági viszonyok fennmaradnak**,

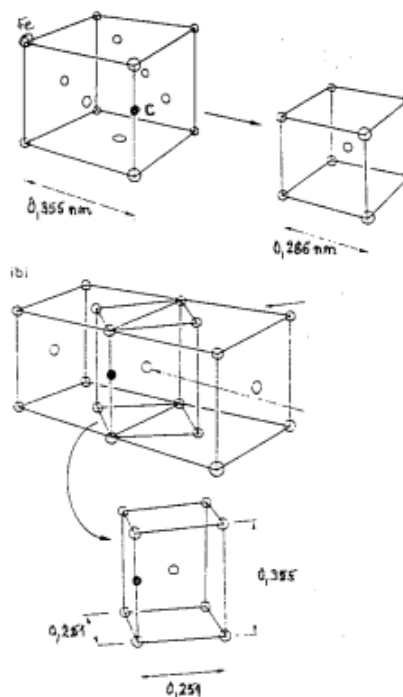
⁴⁸ Forrás: [1]

⁴⁹ Forrás: [1]

- összefüggő (koherens) és félig összefüggő (szemikoherens) **fázishatárok** keletkeznek, melyekben mindkét rácsnak tagjai maradnak az atomok
- illetve mindig vannak **torzulást nem szenvedő síkok**.
- Az előbbi miatt **a 2 rács egyszerű deformációval, diffúzió nélkül átvihető egymásba**, ugyanis **a térrács magában hordozza egy másik rács típus kialakulásának lehetőségét is** (39. ábra), melybe már igen kis atomelmozdulások esetén is átalakul.



39. ábra⁵⁰: Különböző rácsok kialakulásának lehetősége



40. ábra⁵¹: A martenzit-rács kialakulása

- Az ausztenit → martenzit módosulás során a **kristályszerkezetben rácsstorzulás történik**:
 - A γ -vas átalakul α -vassá, de az oldott karbon tartalom (széntartalom) továbbra is **oldva marad**, mely a γ -vasban jelen volt [31].
 - A **szénatomok befagynak a szilárd oldatba** (az oldatban maradnak) (40. ábra), a gyors hűtés és edzés után is, mikor a rács már *tércentrált köbös* (BCC) szerkezetűvé alakul. Holott mást várnánk, hiszen a ferrit szén-oldóképessége 0,008%.
 - A szénatomok **csak bizonyos, kitüntetett oktaédes vagy tetraédes rácsüregeket (helyeket) foglalják el** az oldaton belül; ilyen például:
 - $(0, 0, \frac{1}{2})$ hely az $(1, 0, 0)$ irányban,
 - $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ hely az $(1, 0, 0)$ irányban.

⁵⁰ Forrás: [35]

⁵¹ Forrás: [35]

- Az ilyen helyek szén-betöltése viszont nagyobb torzulást jelent a kristályszerkezetben, emiatt tetragonális szerkezetté torzul az eredetileg köbös felépítés.

- A torzulás mértéke a szén-tartalom függvénye (41. ábra), az oldalak arányának változása:

$$c/a = 1,046 C\%$$

- az „a” oldal kissé csökken:

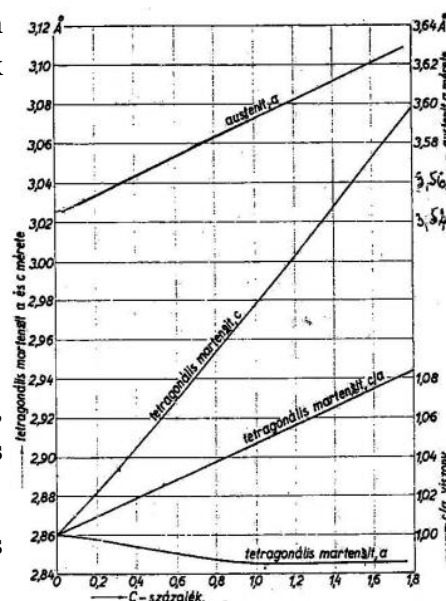
$$a = 0,286 - 0,0013 C\%$$

- a „c” oldal jelentősen megnyúlik:

$$c = 0,286 + 0,116 C\%$$

- A rácstorzulás igen lokalizált effektus, emiatt alakulhat ki tetragonális és köbös martenzit is.

- Ha $C\% > 0,2\%$, akkor többnyire tetragonális martenzit lesz.
- Ha $C\%$ kicsi, akkor a martenzit köbös marad.



41. ábra: A martenzit rácsmérete a széntartalom függvényében

- A kristályrác azonban **könnyen visszanyeri köbös alakját**:

Például hevítés (megeesztés) során **diffúzió jön létre**, és ekkor a szénatomok könnyen tudnak „beugrani” olyan helyekre is, melyekre addig nem, és **rendszeretlen elhelyezkedés** jön létre ismét, így a kristályrác visszakapja köbös struktúráját.

- Az ausztenit és a martenzit **legsűrűbben kitöltött atomsíkjai általában közel párhuzamosak egymással**, és a **kristálytani irányok is** közel párhuzamosak maradnak ezeken a síkokon.

Az átalakulás az imént írt, **párhuzamos kristálytani síkok mentén halad a leggyorsabban**, mert ezek közt **legsorosabb a kristálytani kapcsolat**.

E síkok mentén látszik legjobban a változás.

- Az **ausztenit-martenzit határfelület** az előbbi miatt **kristálytanilag jól definálható**, ezek az ún. **habitus síkok (habit plane)**. Ezek nem szenvednek deformációt, makroszkóikus torzulást az átalakulás közben.
- Bizonyos esetben **hexagonális rácsban jönnek létre a túszerű képződmények**. Az ilyen anyag erősen **elkenődött, nem szabályos rtg-diffrakciós vonalakat produkál**.

Például Ti (titán) ötvözetek összetételüktől függően kétféle hexagonális szerkezetet vesznek fel gyors hűtéskor (edzéskor): a nem mágnesezhető **α -vasból** kialakulhat

- egyrészt erősen torzult hexagonális stuktúra,
- másrészt újfajta, de sima hexagonális felépítés.

Továbbá a martenzites átalakulásra jellemzők a következők is [31], [35]:

- A **túlhűtött ausztenit** átalakulása.

- **Kinetikai szempontból diffúzió nélküli átalakulás:**

Akkor mehet végbe martenzites átalakulás, **ha a diffúzió nem tudja létrehozni az egyensúlyi fázisokat**, ezt a gyors hűtéssel teszik lehetővé.

Bizonyos anyagoknál viszont csak **nagy hűtési sebességgel** ($> 103 - 105 \text{ }^\circ\text{C/s}$) **kerülhető el a diffúziós átalakulás**, ilyen például a tiszta vas és a titán fém.

- **Nagyon gyorsan, a hangsebességet megközelítő sebességgel (1000-5000 m/s) lejátszódó folyamat**, ezen belül:

- inkubációs periódus/lappangási idő nélkül, gyorsan indul,
- és a folyamat lassul az átalakulás vége felé haladva.

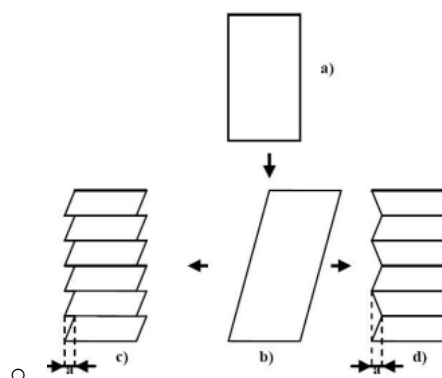
- **Kooperatív atommozgás történik**, ugyanis a folyamat leggyorsabban úgy zajlik le, hogy több atom változtatja meg helyét egyszerre. Ez nagy távolságra nem kiterjedő, max. rácsparaméternyi atommozgás.

Legtöbbször (42. ábra):

- elcsúszás (slip),
- elfordulás,
- vagy ikerképződés (twinning).

- A martenzit fázis **kristályhibákat tartalmaz**, amiért a működő deformációs mechanizmusok felelősek:

- **Diszlokációk:** ha a feszültség diszlokációs csúszással épült le, akkor megnövekedett diszlokáció-sűrűség adódik a martenzit tűk széléin.
- **Ikerkristály-határok:** ha a feszültség ikerkristályok létrejötte segítségével épült le, akkor rétegződési hibaként láthatók az ikerkristály-határok.
- **Vakanciák:** a martenzitfázisban igen nagyszámú vakanciát is megfigyelhetünk.



42. ábra⁵²:

Az ausztenit (a) és a martenzit (b) különböző rácsa mechanikai feszültséget ébresztene.

A feszültség a „ráczállandónyi nyírással” tud leépülni:

- (c) diszlokációs csúszással, vagy
- (d) ikerkristály képződéssel.

Érdekesség, hogy **volfrám ötvöző** használata esetében a martenzites átalakulás megtörténik kisebb edzési sebesség mellett is; az ilyen összetételű acélok az ún. **gyorsacélok**. Ezeket használják a **nagy teljesítményű forgácsolószerszámok** készítéséhez. [8]

⁵² Forrás: [35]

4.5.3. A MARTENZITES ÁTALAKULÁS TERMODINAMIKAI JELLEMZÉSE

A martenzites átalakulás teljes mértékben csak bizonyos hőmérséklet-intervallumon megy végbe az acélokban, a kb. 245-170 °C közé tehető $M_S - M_F$ hőmérséklet-közben (43. ábra⁵³) [35].

- M_S : „martenzit start”, az a hőmérséklet, melyen megindul a martenzites átalakulás.
 - Az M_S hőmérséklet acéloknál **független a lehűlés sebességétől**, azonban **erősen függvénye az acél összetételének** (43. ábra):
 - erősen függ a C-tartalomtól,
 - a legjobb ausztenit-stabilizáló elem a Mn,
 - az Al és a Co növeli a martenzites átalakulás kezdeti hőmérsékletét,
 - a többi ötvöző pedig csökkenti a M_S hőmérsékletet.

Matematikailag:

$$M_S = 520 - 360C\% - 33Mn\% - 22Cr\% - 17Ni\% - 11(Mo\% + W\% + Si\%) + 6Co\% + 17Al\%$$

Gyengén ötvözött acélokra Hollomon-Jaffe szerint:

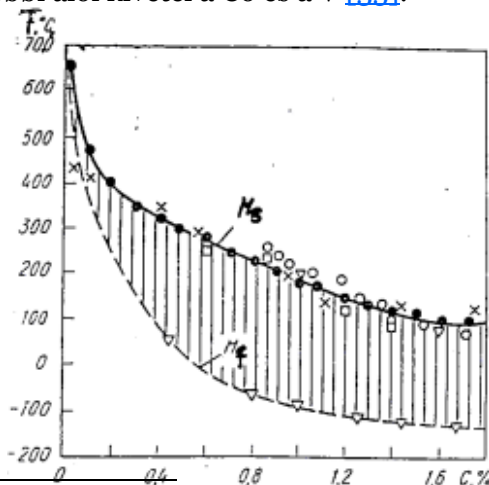
$$M_S = 550 - 350C\% - 40Mn\% - 35V\% - 20Cr\% - 17Ni\% - 10Cu\% - 10Mo\% - 8W\% + 15Co\% + 30Al\%$$

- Ha **képlékeny alakítást** végzünk a struktúrán, akkor az M_S hőmérséklet **emelkedik**, a martenzites átalakulás **intenzitása nő**, és az ausztenit még inkább metastabil lesz.
- M_F : „martenzit finish”, az a hőmérséklet, melyen befejeződik a martenzites átalakulás; ez is **független a lehűlés sebességétől**.

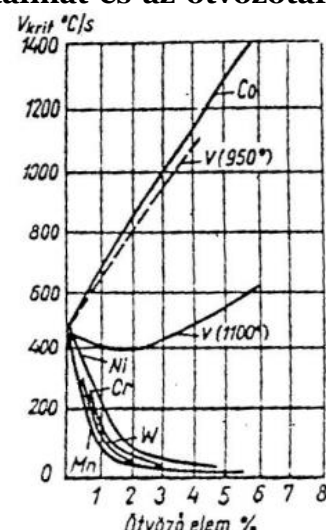
Matematikailag:

$$M_F = M_S - (215 - 170)$$

Azonban a martenzites átalakuláshoz szükséges v_{krit} **kritikus lehűlési sebesség számottevően csökkenthető**, ha **növeljük a széntartalmat és az ötvözőtartalmat** (44. ábra⁵⁴), utóbbi alól kivétel a Co és a V [35].



43. ábra: A martenzites átalakulás kezdeti- (M_S) és vég-hőmérséklete (M_F) a C-tartalom függvényében



44. ábra: Az acél kritikus lehűlési sebessége az ötvözőelemek függvényében

⁵³ Forrás: [35]

⁵⁴ Forrás: [35]

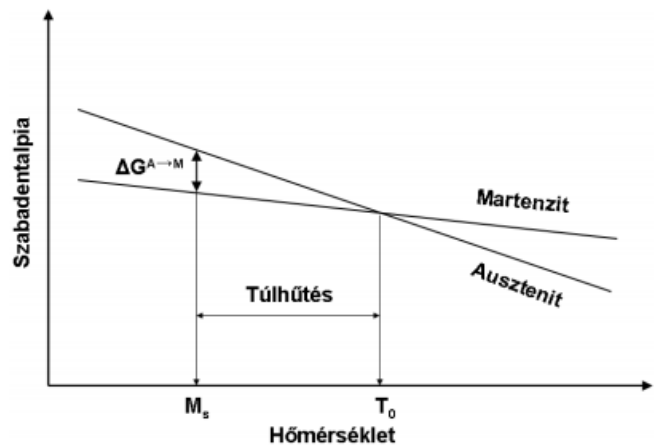
A fázisátalakulás jellemzői közül kiemelendő [35], [8]: a martenzites átalakulás a hőmérséklet függvénye.

- Az M_S pont alatt: egyre több ausztenit alakul át martenzitté.
- Ha a lehűlés hőmérséklete M_F pont felett marad, akkor maradék (rest) ausztenit szövetelem is visszamarad a kristályszerkezetben, a martenzit mellett.
- Az M_F pont felett, izotermikus hőntartás esetén: bizonyos mértékig stabilizálódik az ausztenit.
- M_D : Kritikus hőmérséklet a vas-szén-rendszerben, melynél (adott összetételű) martenzites fázis alakítás hatására elkezd martenzitté alakulni.
- **Csak akkor valósulhat meg az ausztenit → martenzit fázisátalakulás, ha olyan hőmérsékletű a rendszer, melynél a martenzit szabadentalpiája kisebb az ausztenit szabadentalpiájánál.**

Matematikailag:

$$G_M - G_A = \Delta G^{A \rightarrow M} < 0,$$

az entalpiaváltozás a hőmérséklet függvényében jól látható (45. ábra).



45. ábra⁵⁵: A martenzit és ausztenit fázisok szabadentalpiája a hőmérséklet függvényében

- **A martenzites átalakulás nem egyensúlyi fázisátalakulási folyamat, nagy ΔT túlhűtést igényel:**

az ausztenit → martenzit fázisátalakulásnak az is feltétele, hogy **megfelelő mértékű $T_0 - M_S$ túlhűtés** valósuljon meg.

*Túlhűtéskor az új fázisok létrejötte eltolódik a fázisdiagramon (állapotábrán): a fázisátalakulás az egyensúlyi folyamathoz képest **alacsonyabb hőmérsékleten** jön létre, mialatt véges sebességgel áthaladunk a fázishatáron.*

- Azért van szükség túlhűtésre, mert a vasban az **M_S hőmérséklet sokkal kisebb, mint a T_0 : $M_S \ll T_0$**

T_0 : a $\gamma \rightarrow \alpha$ (ausztenit → ferrit) átalakulás termodinamikai egyensúlyi hőmérséklete, melynél a 2 fázis szabadenergiája $G_M = G_A$ megegyezik.

- $M_S \ll T_0$ pedig **azért áll fenn, mert a $\Delta G_{A \rightarrow M}$ hajtóerőnek fedeznie kell a nem-kémiai energiaszükségletet is**, mely az átalakulással jár.
 - **új határfelület alakul ki,**
 - **mechanikai feszültségek is létrejönnek**, a martenzit és az ausztenit fázisban egyaránt,

⁵⁵ Forrás: [35]

- ún. **disszipatív energia** is keletkezik: ez a martenzit-ausztenit határfelület mozgásából származik.

Fennáll a **csíráképződés lehetősége** az ún. **habitus síkon** (ld. korábban); ez akkor történik meg, ha elég nagy energia szabadul fel, és bőven tudja fedezni a keletkező új határok és a térfogatváltozáshoz szükséges erők energiaigényét.

- A **túlhűlés mértéke a lehűlési sebesség függvénye.**
- A **túlhűlés befolyásolja a kristályosodás képességet és a szabadentalpia-változást.** Ugyanis a **martenzit-kialakulás kezdetéhez szükséges idő fordítottan arányos a túlhűtés mértékével:**
 - annál kisebb csírákból, annál gyorsabban tud martenzit túkristály kialakulni, minél nagyobb a túlhűtés mértéke;
 - és a kialakulás ideje nő, minél közelebb vagyunk az egyensúlyi hőmérséklethez, ekkor $\Delta T \rightarrow 0$.

(A hőmérséklettől függ a diffúziós együttható is, de ezzel egyenesen arányos: minél alacsonyabb a hőmérséklet (azaz minél nagyobb a túlhűlés), annál hosszabb az ilyen átalakulás ideje.)

- **A hűtés sebességével szabályozható, hogy az ausztenit mekkora része alakuljon át martenzitté.**
- **Bizonyos anyagoknál viszont csak nagy hűtési sebességgel** ($> 10^3 - 10^5$ °C/s) **kerülhető el a diffúziós átalakulás**, ilyen például a tiszta vas és a titán fém:

Példák:

- 0,005% széntartalmú acél:
 - $M_s = 700$ °C
 - a martenzites átalakuláshoz szükséges lehűlési sebesség így $v_{krit} = 3,5 \cdot 10^4$ °C/s
- 0,01 % széntartalmú acél:
 - a martenzites átalakuláshoz szükséges lehűlési sebesség így $v_{krit} = 10^4$ °C/s
- A **kritikus lehűlési sebesség számottevően csökkenthető**, ha növeljük a széntartalmat és az ötvözőtartalmat,
Például a B (bór) nagyon számottevő hatású (már 50-150 part per millon mennyiségeknél is jelentős), és az ennek megfelelő v_{krit} már könnyen elérhető műszakilag, nagy átmérőjű minták esetén is.

Érdemes még kiemelni azt, hogy a martenzitképződésnek fontos tulajdonsága, hogy „atermikus átalakulás”, ún. „atermikus martenzit” képződik [33],[35]:

1. A legtöbb martenzites átalakulásra képes ötvözet esetében, a tapasztalat szerint **adott mennyiségű martenzit keletkezik, ha az acélt M_s és M_f közti hőmérséletekre hűtjük**, ezen a hőmérsékleten tartva nem növekszik a kialakuló martenzit mennyisége, attól függetlenül, hogy a rendszer mennyi időt tölt az átalakulás hőmérsékletén.

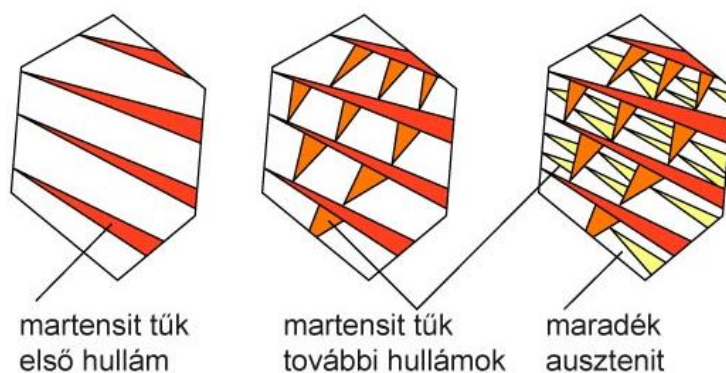
2. Bizonyos ötvözeteknél „**robbanásszerű**” **kinetika** jellemzi a martenzites átalakulást, és a martenzit-komponens **nagy része kialakul már az M_s hőmérsékleten**, és a további átalakuláshoz kell csak hűteni az ötvözetet.

Például ilyen a *Fe-Ni-C keverék*.

Tehát a keletkező martenzit mennyisége **csak a hőmérséklet függvénye, független az adott $M_s - M_F$ hőmérsékleten töltött időtől**.

Az előbbi alapján is látható, hogy a martenzitképződés **nem lehet diffúziós jellegű folyamat**.

Ha a rendszert tovább hűtjük, a képződő, új martenzit-tűk mérete kisebb lesz, és ugyanúgy határtól határig mennek a martenzit-tűk, valamint ekkor is marad vissza ausztenit (46. ábra).



46.ábra⁵⁶: Újabb martenzit-tűk képződése továbbhűtéskor

Továbbá fontos tulajdonsága az is a martenzites átalakulásnak, hogy **irreverzibilis folyamat (nem megfordítható)**: hevítéskor a martenzit nem alakul ausztenitté [33].

4.6. A NAGYOLVASZTÓ

Az [acélgyártás folyamatának leírásánál](#) már [szerepelt](#), hogy a nyersvas-előállítás **nagyolvasztóban** történik, **ebben valósul meg a szükséges redukció végrehajtása**. Valamint [szó került](#) a nagyolvasztóról a [fizikatörténeti részben](#) is.

Ez az eszköz (47. ábra) lényegében olyan, mint a [bucakemence](#), csak annál nagyobb. A 17. századtól használták.

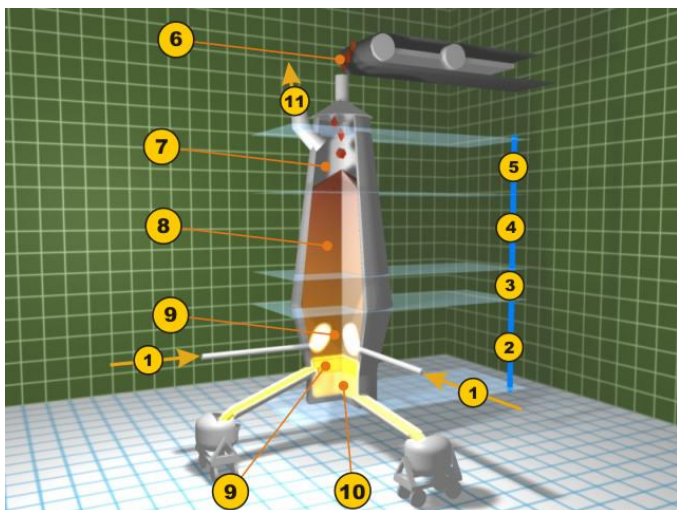
Arra szolgál, hogy a vas megolvadjon benne: a folyékony vas a rendszer aljára kerül, így a salak elválasztható lesz tőle. [1]

⁵⁶ Forrás: [33]



47. ábra⁵⁷: Újmassai őskohó (1810)

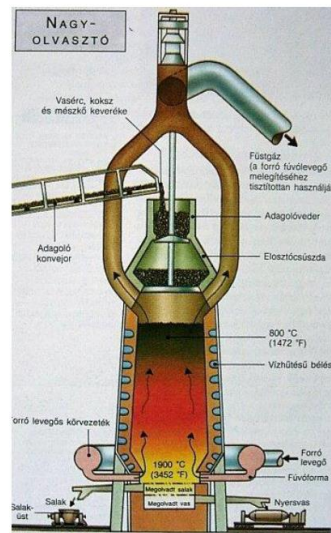
A nagyolvasztó részei és működése az alábbi ábrákon tekinthetők meg (48 - 52. ábra).



48. ábra⁵⁸: A nagyolvasztó részei

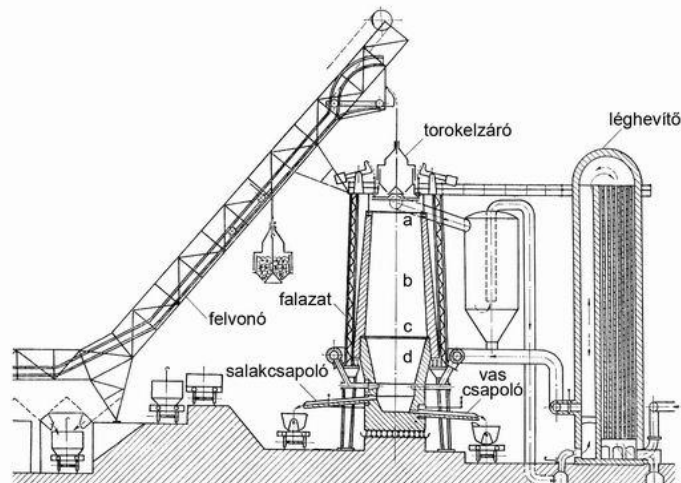
A nagyolvasztó „részei”:

- 1: meleg levegő,
- 2: olvadék,
- 3,4: redukáló zóna,
- 6: elegy adagoló.
- 9: salakcsapoló,
- 10: nyersvascsapoló,
- 11: kohógáz.



49. ábra⁵⁹: A nagyolvasztó felépítése

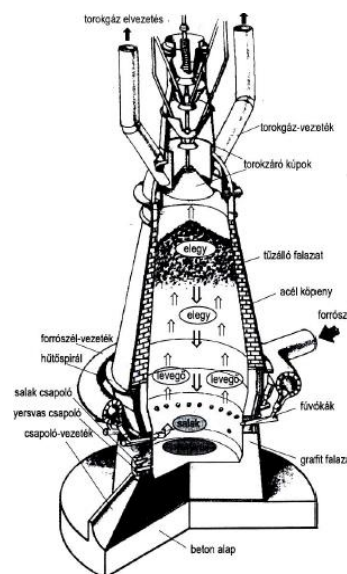
57 Forrás: [1]
 58 Forrás: [1]
 59 Forrás: [6]



50. ábra⁶⁰: A nagyolvasztó váza

A nagyolvasztó működésének sajátosságai:

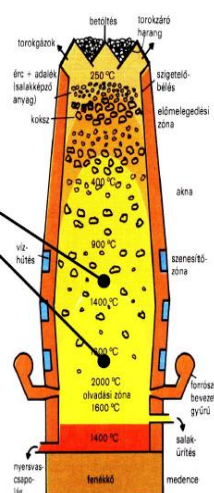
- **A levegő alulról fölfelé áramlik**
- **Az elegy felülről lefelé áramlik**
- A reakciófeltételek kedvezők
- A salak felül található
- Külön zajlik a csapolás



51. ábra⁶¹: A nagyolvasztó működése

Redukció

- Redukálószerke
 - C – direkt redukció
 - CO – indirekt redukció
 - H₂
- Reakciók
 - $Fe_xO_y + C \leftrightarrow Fe_xO_{y-1} + CO$
 - $Fe_xO_y + CO \leftrightarrow Fe_xO_{y-1} + CO_2$
 - $Fe_xO_y + H_2 \leftrightarrow Fe_xO_{y-1} + H_2O$
- Továbbá
 - $CO_2 \leftrightarrow C + CO$
 - $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$



52. ábra⁶²: A nagyolvasztóban végbemenő redukció

⁶⁰ Forrás: [29]

⁶¹ Forrás: [6]

⁶² Forrás: [6]

A nagyolvasztó betétje [6]:

- 110 kg-nyi salakképző anyag
 - mészkő CaCO_3
 - dolomit MgCO_3
- 2200 kg, 1000-1200 °C-os levegő

A nagyolvasztó terméke [6]:

- 1000 kg-nyi nyersvas
- (670 kg) salak
- Torokgáz, por, vízgőz

4.7. DAMASZKUSZI ACÉL

4.7.1. A DAMASZKUSZI ACÉL TÖRTÉNETE

A **középkori vaskohászatról** már többször, sőt részletesebben is [esett szó](#). **További érdekesség**, miszerint *korabeli feljegyzésekkel alátámasztható*, hogy **azok az acélkardok (53. ábra) jelentették a középkori keresztes lovagok legtraumatikusabb élményeit, amelyeket az arabok használtak.**



53. ábra⁶³: Damaszkuszi acélből készült kard

Ezek a muszlim harcosok a Szentföldet és környékét védték. És *több krónikás beszámolója szerint* ezt igen sikeresen tették, mivel az arabok különleges kardjai valósággal kettészelték a keresztes lovagok kardjait.

A jelenlegi ismeretek szerint, ezt a fegyvertípust valahol Indiában vagy Sri Lankán kezdték készíteni, ahonnan a nagy fegyvergyártó központba került, a mai Szíriába (Damaszkusz). Így összességében **főként Damaszkusz környékén készítették.**

Azonban *feltételezik*, hogy **az elnevezés** nem innen származik, hanem az **arab nyelvű *damas* = víz szóból, mely utal a kardlapok felületének különleges erezetére, mely legjobban a hullámozó vízhez hasonlítható struktúra volt.**

⁶³ Forrás: [1]

A kutatások szerint az ilyen típusú kardot kb. Kr.u. 900 táján kezdték gyártani és kb. 1750-ig voltak elterjedtek. A fegyverfajta eltűnésének oka az *lehetett*, hogy kiürültek az ércbányák, melyeket a gyártáshoz igénybe vettek, így pedig nagyon messziről kellett volna alapanyagot szállítani.

A kovácsolás pontos leírása szinte egyáltalán nem maradt hátra (ld. később, a [„A damaszkuszi acél készítésének technológiája”](#) alpontban), ugyanis a kovácsok nagyrészt csak szájhagyomány útján adták tovább a különleges technika részleteit egymásnak. Az elenyésző számú, fennmaradt leírás-részletet pedig többféleképpen lehet értelmezni, például

- egyes értelmezések arra utalnak, hogy „a felhevített acéldarabot mindenféleképpen egy fiatal vörös hajú fiú vizeletébe kellett volna mártani, és az acélkard ettől nyerte volna el előnyös tulajdonságait”,
- más „tudományos” értelmezés szerint „a felhevített acélt egy olyan kecskébe kellett beledöfni, amely semmi más nem evett, csak páfrányt”. [44]

A kardok különleges tulajdonságaira vonatkozó legendák is elterjedtek, ilyenek például:

- Állítólag köveket is el lehetett vágni ezekkel a kardokkal, de ezt nem támasztja alá semmilyen tárgyi bizonyíték.
- A feljegyzésekben többször azt írják, hogy egy selyemfátylat akár röptében is ketté lehetett vágni a damaszkuszi acélből készült karddal.
- A mítosz szerint a kard végét akár markolatig is vissza lehetett hajlítani, a kardlap eltörése nélkül. [44]

4.7.2. A DAMASZKUSZI ACÉL JELLEMZŐI

[1] szerint:

- **Magas szénttartalom:** ~2 m/m%
- Igen **kemény, de szívós** acél.
- Szívósságát feltehetően a **hidegen (650-850°C-on) végzett kovácsolásnak** köszönheti, melynek hatására a cementit hálózat feltöredezett.
- **Felülete nem sima, rajta jellegzetes mintázat van** (54. ábra):
Fe₃C (cementit) hálózat



54. ábra⁶⁴: Damaszkuszi acél felszíne

⁶⁴ Forrás: [1]

A fentiekből láthatóan **igen érdekes volt a damaszkuszi acél szerkezete**, hiszen egyszerre rendelkezett **2 látszólag összeegyeztethetetlen (paradox) tulajdonsággal**:

1. egyrészt nagyon erős,
2. másrészt igen hajlékony volt.

4.7.3. A DAMASZKUSZI ACÉL KÉSZÍTÉSÉNEK TECHNOLÓGIÁJA

A damaszkuszi acél készítésének technológiája sokáig elveszett volt, de egy fennmaradt leírás-részletre támaszkodhatunk:

„A bulatot addig kell melegíteni, míg úgy fénylik, mint a felkelő nap a sivatagban, ezután le kell hűteni a királyi bíbor színére, majd egy izmos rabszolga testébe kell mártani... a rabszolga ereje átvándorol a pengébe, ez adja a fém erejét.”

Azaz [45] szerint:

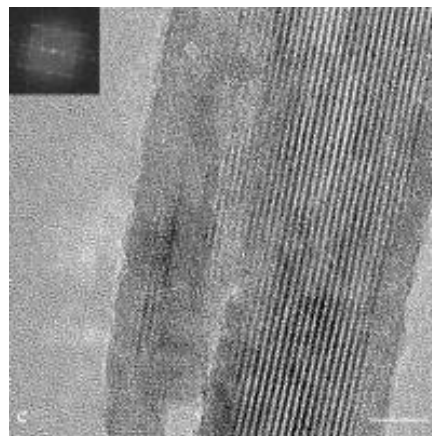
„A pengét magas hőfokra hevítették (a vörösesfehér sivatagi naphoz hasonló színben izzó vas kb. 1000 °C-os), majd levegőn hűtötték (a bíborszínű izzás kb. 800 °C-nak felel meg), végül 37 °C hőmérsékletű sós folyadékban edzették.”

/Juhász-Tasnádi: Érdekes anyagok, anyagi érdekességek/

Az elmúlt években további tudománytörténeti kutatásokat végeztek, melyek eredményeképp úgy látszik, valamelyest sikerülhet megfejteni és megérteni a technológia titkát.

A kutatók szerint **nanoméretű rudacskák tették erősebbé és egyszersmind hajlékonyabbá is a szerkezetet**, és így jöhetett létre a kemény és egyszerre rugalmas acél [44]:

„A korábbi magyarázatokkal szemben most mikroszkopikus vizsgálatok révén valóban megtalálni vélik a damaszkuszi acél titkát: a *Nature* című tudományos folyóiratban megjelent tanulmány szerint **az acéllapok olyan nanoméretű szénrudacskákat tartalmaztak, amelyek közepén cementitrudak húzódtak meg** (55. ábra). A **kettős csövek** a német *Technische Universität Dresden* kutatói szerint **nemcsak a lap esztétikai értékét** növelték, de egyben **praktikus célt is** szolgáltak: a damaszkuszi acélkardok ily módon **önélező** fegyverekké váltak, **mivel a csövecskék letörésével újabb és újabb érdes, aprófogú fűrészfelületek keletkeztek.**



55. ábra⁶⁵: A damaszkuszi acél felülete

⁶⁵ Forrás: [44]

A damaszkuszi kardok éppen ezért *Peter Paufler* szerint **valójában nem is vágta, hanem apró fogazatukkal elfűrészelték az útjukba kerülő tárgyakat**. Az alapanyag persze itt sem volt mindegy, ahogy a kemencékhez használt fa milyensége is szigorúan elő volt írva. **A kovácsolás ideje igen hosszúra nyúlt más kardokhoz képest, ami nemcsak a kardok erejét, de értékét is tovább növelte.** *Más feljegyzések* azonban arról is tanúskodnak, hogy **a felhevített acélötvözethez kis mennyiségű üveget is hozzáadtak**, amely aztán a **különbéle szennyeződések magához vonzva kiült az acélfelületre**. Ezáltal **különlegesen tiszta acélhoz juthattak** hozzá a kovácsok.

Persze **nem mindenki hisz ebben**: *John Verhoeven*, az amerikai Iowa State University professzora ugyancsak kételkedik Paufler állításaiban: **szerinte a valódi keménységet adó cementit rudak a széncsövecskék nélkül is elegendőek voltak ahhoz, hogy egy roppant erős és rugalmas kardot tudjanak gyártani.** *Verhoeven* egyébként jó öt évvel ezelőtt már egyszer bejelentette, hogy megtalálta a damaszkuszi acél titkát, sőt **egy falusi kováccsal összefogva utángyártottak is néhány példányt az erős és rugalmas kardból.**”

A damaszkuszi acél kovácsolásáról ma már található videó az interneten [\[46\]](#):



4.8. MODERN ACÉLOK

Az [acél tulajdonságainak leírásánál](#) már [szerepelt](#), hogy az idő során számottevően fejlődött az acélipar, így **manapság nagyon sokféle kémiai összetétel hozható létre. Az acél tulajdonságai változtathatók az ötvözők mennyiségének és minőségének (fajtáinak) módosításával.**

Az alábbiakban tekintsük röviden a mai acélok néhány jellegzetes tulajdonságát.

4.8.1. A ROZSDAMENTES ACÉL JELLEMZŐI

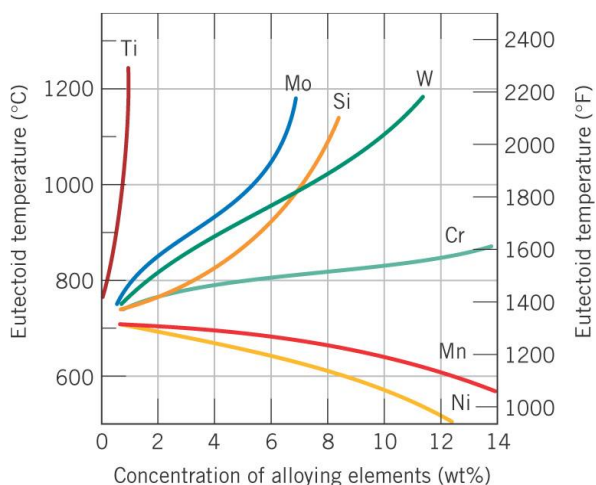
[1] szerint:

- Minimum 10,5% Cr ötvöző van jelen benne
- A Cr_2O_3 a passzív réteg
- Gyakran használják ennél a „18/10” jelzést, mely a következőkre utal:
 - 18% Cr,
 - 10% Ni
- Kristályszerkezete:
 - általában FCC és nem mágneses, ez a 16% Cr-tartalom felettieket jelenti,
 - azonban létezik BCC is.

4.8.2. A LEGGYAKORIBB ÖTVÖZŐK

[1] szerint:

- Gyakran használják a Cr, Ni, V, Mo, Mg ötvözőket.
- Ezek hatással vannak a cementit (Fe_3C) kialakulására.
- Valamint eltolják az átalakulási hőmérsékleteket (56. ábra).



56. ábra⁶⁶: Az átalakulási hőmérséklet az ötvözőelemek koncentrációjának függvényében

⁶⁶ Forrás: [1]

5. FÁZISDIAGRAMOK ÉS KAPCSOLATUK AZ ANYAGSZERKEZETTEL

5.1. A FÁZISDIAGRAM

[1] szerint:

- **Fázis:** a rendszer azonos fizikai és kémiai paraméterekkel rendelkező része.
- **Fázisdiagram:** a fizikai paraméterek függvényében ábrázolja, hogy melyik fázis valósul meg.
- **Fizikai paraméterek:**
 - (Fémek → légnyomás)
 - Kocentráció (két komponens esetén egy paraméter)
 - Hőmérséklet

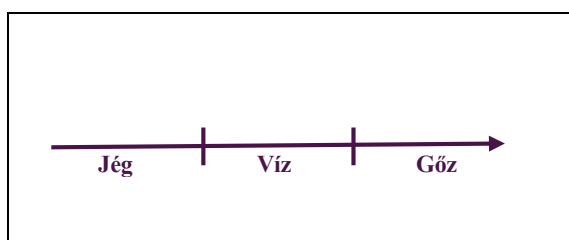
Gibbs-féle fázisszabály: összefüggés van a fázisok száma, a komponensek száma és a rendszer szabadsági foka közt.

Matematikailag: $Sz = K - F + 1$, ahol

- Sz : szabadsági fokok száma
- K : komponensek száma
- F : fázisok száma
- 1 : mivel a nyomás rögzített, 1-et kell csak hozzáadni (2 helyett)

Ezt hogyan használjuk a gyakorlatban?

Például tekintsük a víz 1 dimenziós fázisdiagramját (57. ábra) 1 atm (atmoszféra) nyomáson:



57. ábra: A víz 1 dimenziós fázisdiagramja

$$Sz = K - F + 1 = 1 - F + 1$$

Ha nem az olvadás vagy forrás közben vagyunk, akkor $F = 1$.

$$\rightarrow \text{Tehát } Sz = 1$$

\rightarrow a hőmérséklet megválasztható.

Ha halmazállapot-változás közben vagyunk, akkor egyszerre jelen van 2 fázis is: $F = 2$.

$$\rightarrow \text{Tehát } Sz = 0$$

$$\rightarrow T = 0^\circ\text{C vagy } T = 100^\circ\text{C.}$$

A fejezetben tanulmányozunk további, összetettebb [példákat](#) is arra, hogy **az anyagszerkezet tanulmányozásánál** miként alkalmazható a fázisdiagram és az ehhez kapcsolódó **Gibbs-féle fázisszabály**.

Az ilyen **fázisdiagramokon**

- szemléltethetők az **átalakulásra jellemző vonalak**,
- leolvashatók a **jellemző (karakterisztikus) hőmérsékletek**,
- tekinthetők a **kémiai összetételek**. [8]

Az **átalakulási (fázis)diagram** = egymás mellé helyezett lehülési görbék pontjainak sorozata.

Ezek a diagramok a **következőképp készülnek** [8]:

- **Lerajzoljuk a lehülési görbét** adott összetételű többkomponensű rendszerek (összetételek) esetében.
 - **Általános lehülési görbe: szabályos, törés nélküli, folytonos görbe.**
 - **Speciálisabb lehülési görbe: különböző egyenes szakaszok és töréspontok** alkotják.

Ez olyan anyagokra jellemző, melyek

folyékony állapotból

→ **kristályosodnak** (szilárd lesz)

→ szilárd állapotban **allotrop átalakulások** valósulnak meg.

Például: Színvas lehülési görbéje

Ha a kristályosodás hőmérsékletére érünk, akkor **a görbe folytonossága megszakad, és megjelenik 1 állandó hőmérsékletű (vízszintes) szakasz.**

Magyarázat:

1. Olvadáshő szabadul fel a dermedéskor

→ ez **kiegyenlíti** a rendszert, hiszen a hűtés hatásával ellentétes

+ **állandósítja a hőmérsékletet** a megszilárdulás végéig.

2. Folytatódik a lehülés, a szabályos lehülési görbét követve.

3. Allotrop átalakulások: ezek a folyamatok **állandó hőmérsékleten** mennek végbe, az olvadáshoz hasonlóan.

Több vegyületnek ettől eltérő jellegű a fázisdiagramja, jelentős ezek közül a vas-szén keverék, mely később [részletesebben tárgyalásra kerül.](#)

- **A lehülési görbén lévő töréspontokat ábrázoljuk az átalakulási fázisdiagramon.**

Az **átalakulási (fázis)diagram** egyes részeinek elnevezése és jellemzői is vannak [49], [50]:

- **Likvidusz:** Egy görbe (vagy felület), mely többkomponensű rendszerrel azon hőmérsékleti értékeket köti össze, amik **feletti hőmérséklet-értékeken a rendszer már csak folyadék állapotban létezik stabilisan.**

- **Szolidusz:** Az előbbivel analóg, egy **görbe (vagy felület)**, mely többkomponensű rendszernél azon hőmérsékleti értékeket köti össze, amik **alatti hőmérséklet-értékeken a rendszer már csak szilárd állapotban létezhet stabilisan.**
- **Köztes állapot:** A kezdeti és végállapot közt van, dermedés vagy olvadás során. **Ebben a hőmérséklet-tartományban egyszerre van jelen stabilisan szilárd és folyékony állapotban is az anyag.**
A szilárd és folyékony fázis **aránya folyamatosan változik: a pillanatnyi hőmérséklet függvényében;** a fázisok mennyiségi viszonyait a **mérlegszabály** szerint adhatjuk meg.
- **Eutektikus pont:** Ha **2 likvidusz görbe metszi egymást**, ezt a **metszéspontot** kiemelten ajánlott kezelni.
A **ponthoz tartozó hőmérséklet-értéknek** is kitűntetett szerepe van: ez az ún. **eutektikus hőmérséklet.**

Az utóbb szereplő **eutektikus pont létezése nem minden elegyre jellemző.**

Azon elemek, **melyeknél létezik eutektikus pont**, az ún. **eutektikumok/eutektikus rendszerek/eutektikus ötvözetek [50]:**

- Ezek speciális **2 vagy több komponensből (elem, vegyület) álló elegyek.**
- **Homogén folyadék állapotból → hűtés során → egyidőben keletkező 2 szilárd fázis keverékei.**
- Az eutektikumok a (folyadék – szilárd =) **szilárd – folyadék fázisátmenetek (egyszerű) speciális esetei:**
 - a komponensek nem képeznek egymással**
 - **sem vegyületet,**
 - **sem valódi szilárd oldatot.**
- Ezeknek létezik **1 vagy több olyan összetétele, amire igaz, hogy a komponensek olvadáspontjánál alacsonyabb hőmérsékleten olvad meg a rendszer.**
- A **görög eredetű** kifejezés jelentésánál is megfelel ennek: lefordítva „**könnyen olvadó**”.
- **Ha a 2 komponensű rendszer összetétele megfelel az eutektikus pont összetételének, akkor lehűlés közben eutektikumká alakul a teljes rendszer:**
A teljes mennyiségű **2 komponensű homogén olvadékból/oldatból → lehűlés közben → az eutektikus hőmérsékletet elérve → α és β összetételű eutektikum alakul ki.**

Eutektikumok például:

- **Fe – C (vas-szén) rendszer**, a fázisdiagramot ld. [később](#)
- **Acél**, ez is legtöbbször vas-szén ötvözet, az egész tanulmány fő témája ez,
- *NaCl*,
- *KCl*,
- *Karbamid*,
- *Víz különböző egyéb sókkal.*

Az **eutektikumok szerkezete** mikroszkóp alatt megfigyelve a következőkkel jellemezhető:

- **kristályos szerkezet**,
- **2 féle, eltérő összetétel**,
- **szilárd oldatok (mindkettő)**,
- **kristálykák keveréke alkotja.**

Már szerepelt, hogy nem minden többkomponensű rendszer képez eutektikumot.

Például az Au – Ag (arany-ezüst) rendszer esetében: szilárd oldat képződik minden koncentrációnál a kristályosodás során.

A következőkben tekintsük az előbbi szakasz példákon való alkalmazását.

5.2. PÉLDÁK

5.2.1. CUKROS VÍZ FÁZISDIAGRAM

A téma tárgyalásakor logikusan merül fel a kérdés:

Mennyi cukrot tud feloldani adott mennyiségű víz? (58. ábra)

A válasz: **Hőmérsékletfüggő.**

$$S_z = K - F + 1 = 2 - F + 1 = 3 - F$$

Lehetséges több eset megvalósulása is:

1. **Az összes cukor feloldódik**

→ $F = 1$ **azonos fázis** adódik, mint az előző példánál: a víz esetében.

2. **Marad szilárd cukor is** a rendszerben az elolvadt mellett

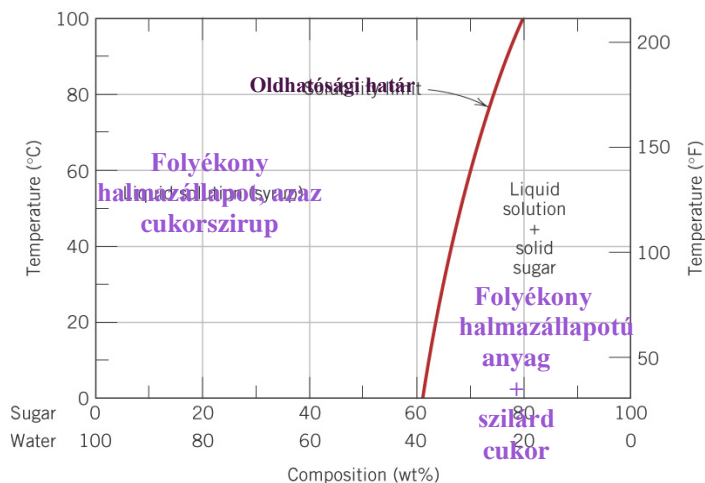
→ $F = 2$ fázis adódik.

3. Lehet csak szilárd állapotban lévő cukor is (sugar 100%, water 0%).

Ezek alapján még ha $F = 2$ esetről is van szó, akkor is

$$\rightarrow S_z = 1$$

→ **a hőmérséklet mindig megválasztható.**



58. ábra⁶⁷: A cukros víz fázisdiagramja

5.2.2. RÉZ-NIKKEL FÁZISDIAGRAM

A téma tárgyalásakor logikusan merül fel a kérdés:

Mennyire oldódik egymásban a 2 komponens? (59. ábra)

A válasz: **A Cu (réz) és a Ni (nikkel) korlátlanul oldódik egymásban.**

$$S_z = K - F + 1 = 2 - F + 1 = 3 - F$$

Lehetséges több eset megvalósulása is:

1. **Teljesen keveredve folyadékot alkotnak**

→ $F = 1$ **azonos fázis** adódik, mint az 1. példánál: a víz esetében.

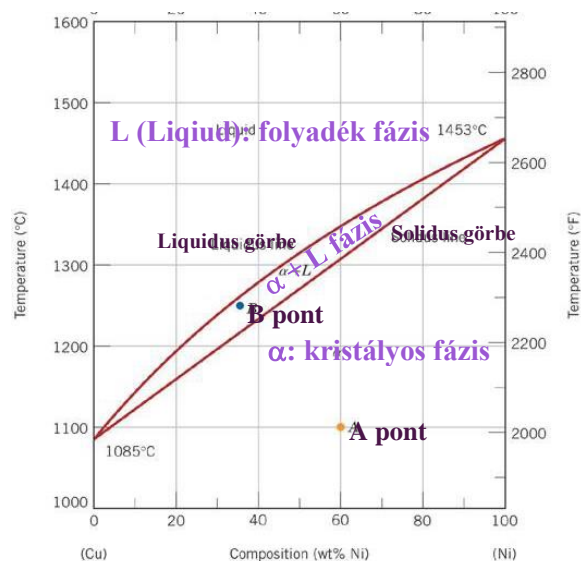
2. A **kétkomponensű A, B rendszer** (kevesebb Cu, több Ni) **α - fázisban kristályosodik is.**

→ $F = 2$ fázis adódik, mint a cukros víznél.

Ezek alapján még ha $F = 2$ esetről is van szó, akkor is

$$\rightarrow S_z = 1$$

→ **a hőmérséklet mindig megválasztható.**



58. ábra⁶⁸: A Cu-Ni fázisdiagram

⁶⁷ Forrás: [1]

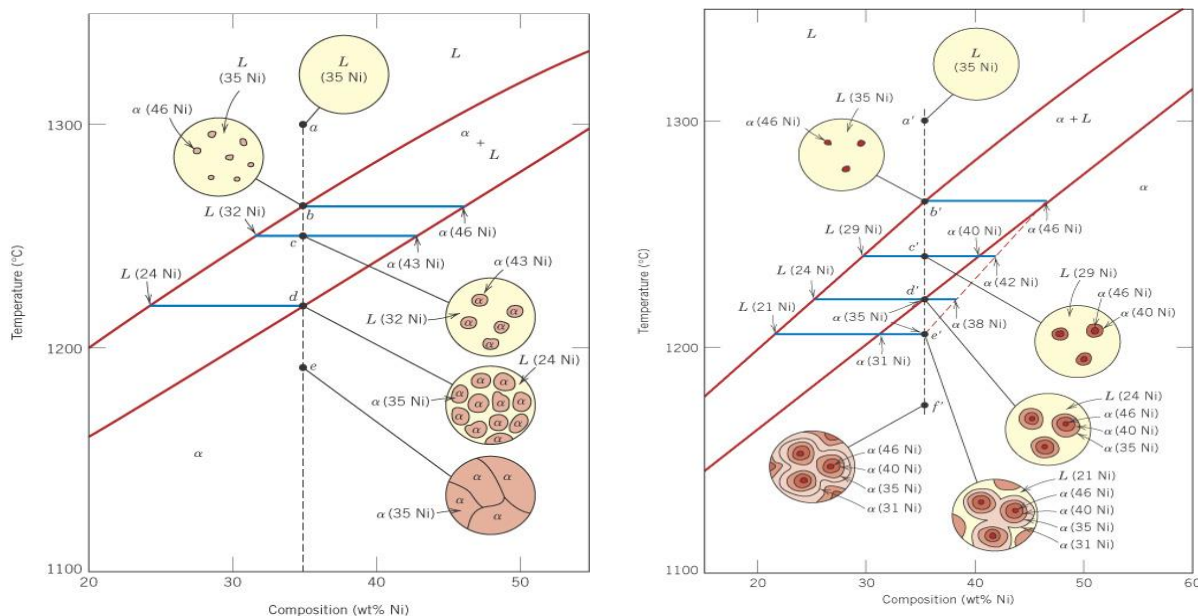
⁶⁷ Forrás: [1]

5.2.3. A DERMEDÉS FOLYAMATA A FÁZISDIAGRAMON

A következő logikus kérdés lehet:

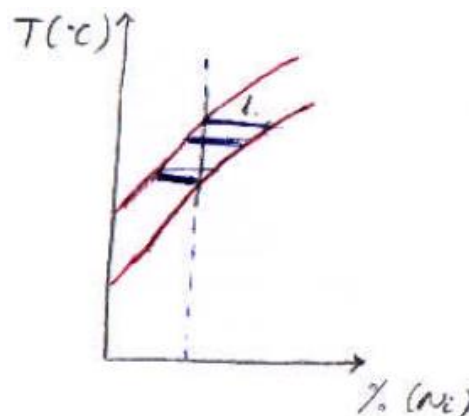
Hogyan, például milyen Ni-koncentrációnál történik meg a dermedés?

A válasz: a folyamat több fajta szakaszból áll, melyek a külső beavatkozásoktól is függenek (59. ábra).



59. ábra⁶⁹: Dermedés folyamata a Ni-koncentráció függvényében

1. Először a **nagyobb koncentrációjú Ni-darabok kiválnak** (60. ábra).
2. → **A folyadék koncentrációja lecsökken.**
3. További hűtés során a tapasztalható jelenség a hűtés sebességétől függ.
 - a. **lassú hűtés** esetén: **diffúzió** lép fel
→ ez **koncentráció-kiegyenlítődést** eredményez
→ **homogén oldat jön létre.**
 - b. **gyors hűtés** esetén: **nincs koncentráció-kiegyenlítődés**
→ **inhomogén oldat jön létre,** melyben a **Ni-koncentráció kifelé csökken.**
4. **Sávostisztítás** esetében a következő történik: az olvadt rész végighalad a rúdon (61. ábra)
 - a bal oldalon sok Ni és kevés Cu lesz,
 - így a **Cu-atomok összegyűlnek a jobb végen.**



60. ábra⁷⁰: A nagyobb Ni-darabok kiválásának szakasza a dermedés során



61. ábra⁷¹: Sávostisztítás vázlatja

⁶⁹ Forrás: [1]

⁷⁰ Forrás: [27]

⁷¹ Forrás: [27]

5.2.4. ÓLOM-ÓN FÁZISDIAGRAM

A Pb – Sn egy érdekes **kétkomponensű rendszer**, melynek **összetevői különböző fázisban kristályosodnak**:

- A: a Pb (ólom) az α fázisban kristályosodik ki.
- B: az Sn (ón) a β fázisban kristályosodik ki.

Az **eutektikus pontnál** (62. ábra) (a fogalom ld. [korábban](#)) **a komponensek folyékonyak, pedig mindkettő olvadáspont alatt van.**

A diagram középső tartományánál a **Gibbs-féle fázisszabály** a következő alakú:

$$S_z = K - F + 1 = 2 - F + 1 = 3 - F$$

A fázisok száma: $F = 3$

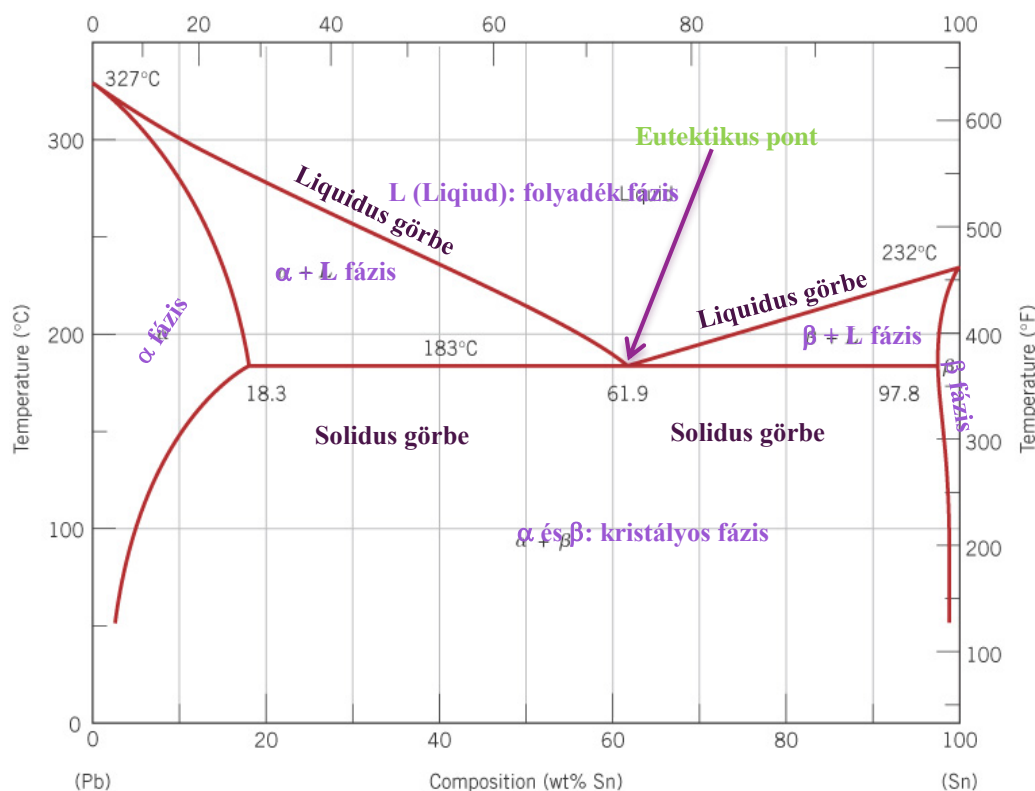
→ **ennek következtében a hőmérséklet fix.**

Az **eutektikus összetétel** (ld. [korábban](#)) a diagramból leolvasható: **$c = 61,9 \text{ m/m}\%$** . Ennél a pontnál a rendszer **igen esztétikus szerkezetet** vesz fel (63. ábra).

Az eutektikus összetételnél kisebb koncentráció esetén, például **$c = 40 \text{ m/m}\%$** -nál pedig a rendszer **nem sima, cirtos szerkezetű** (64. ábra).

Léteznek ún. **szubsztitúciós atomok**: ebben az esetben az Sn atom „beül” a Pb atom helyére egy adott pontig.

→ Ennek következtében **kis Sn-darabkák jelennek meg a rendszerben.**

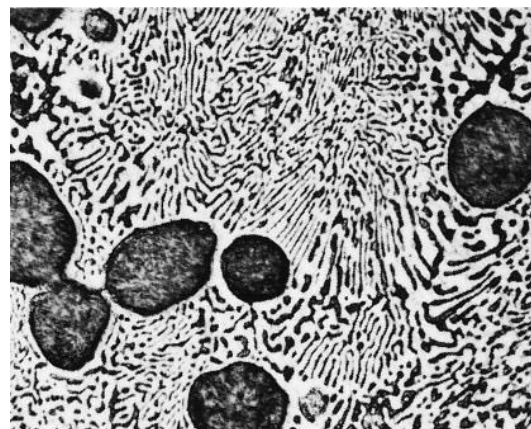


62. ábra⁷²: Pb – Sn fázisdiagram

⁷² Forrás [1]

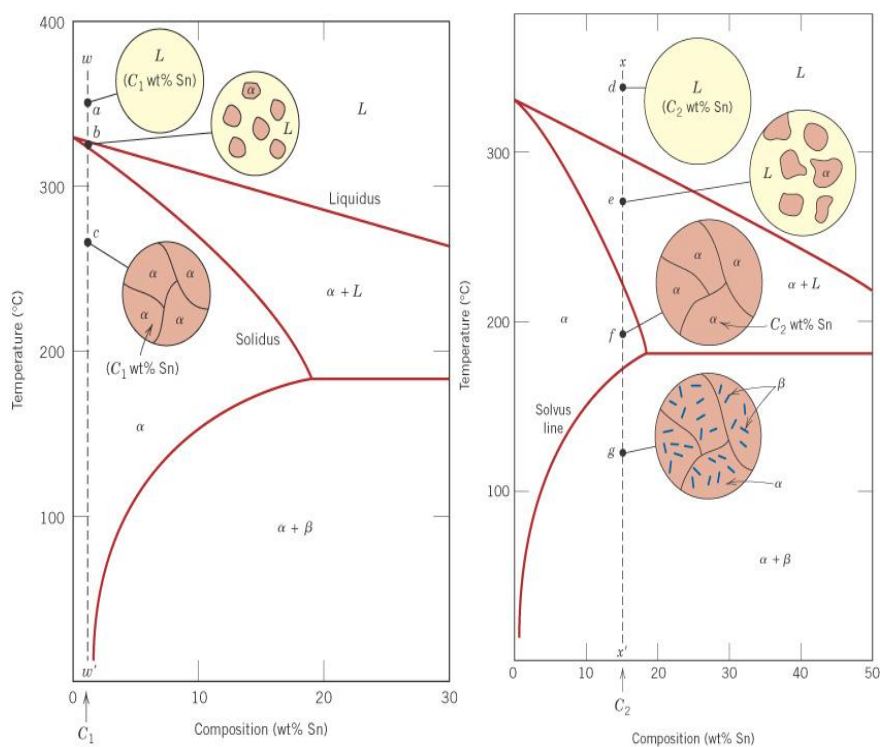


63. ábra⁷³: Eutektikus összetétel:
 $c = 61,9 \text{ m/m}\%$



64. ábra⁷⁴: $c = 40 \text{ m/m}\%$, eutektikus
 összetételnél kisebb koncentráció

Az alábbi ábrák (65-67. ábra) segítségével szemléltethetjük, hogy **az Sn-koncentráció függvényében hogyan változik a dermedés folyamata**. Arról már az előbbieken esett szó, hogy a diagramokon mi mit jelöl, illetve hogy Sn-darabok jelennek meg az anyagban.

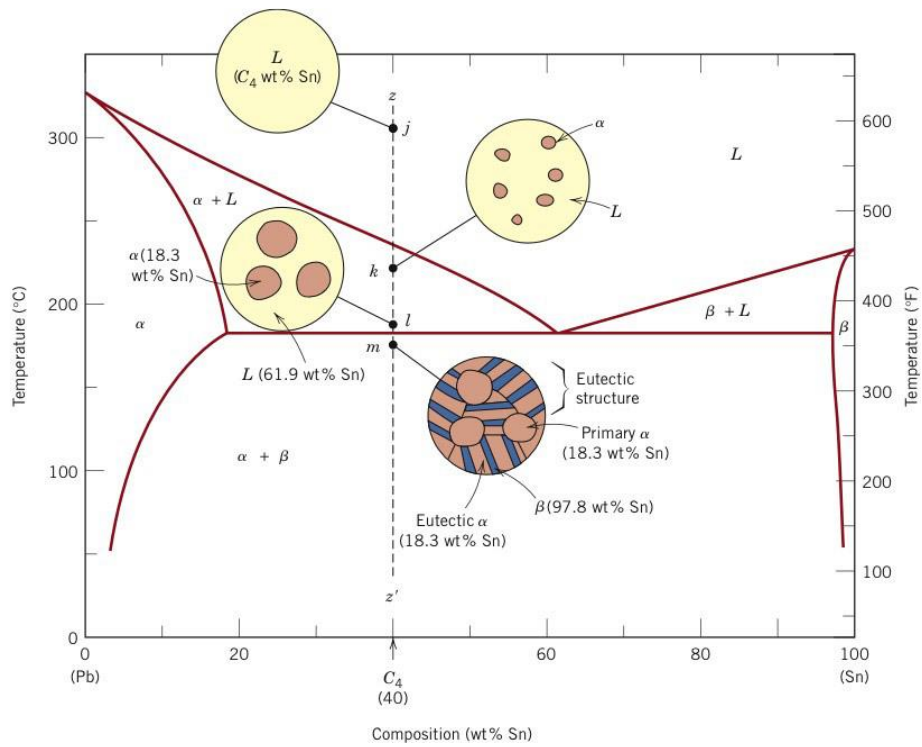


65. ábra⁷⁵: Dermedés kis koncentrációnál

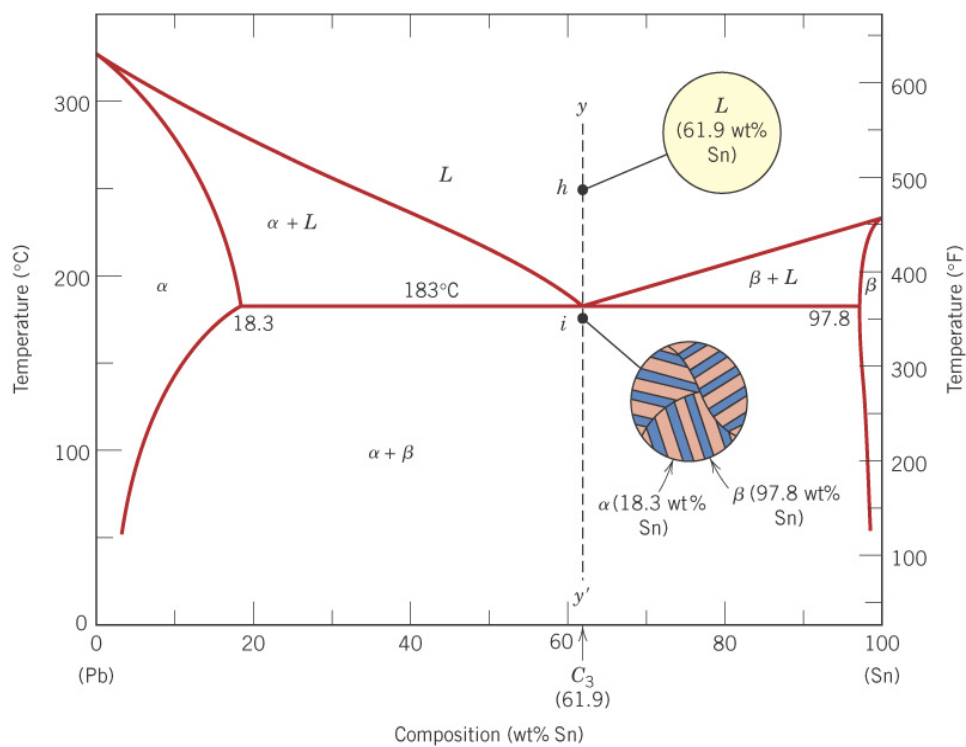
⁷³ Forrás [1]

⁷⁴ Forrás [1]

⁷⁵ Forrás [1]



66. ábra⁷⁶: Dermedés közepes koncentrációnál

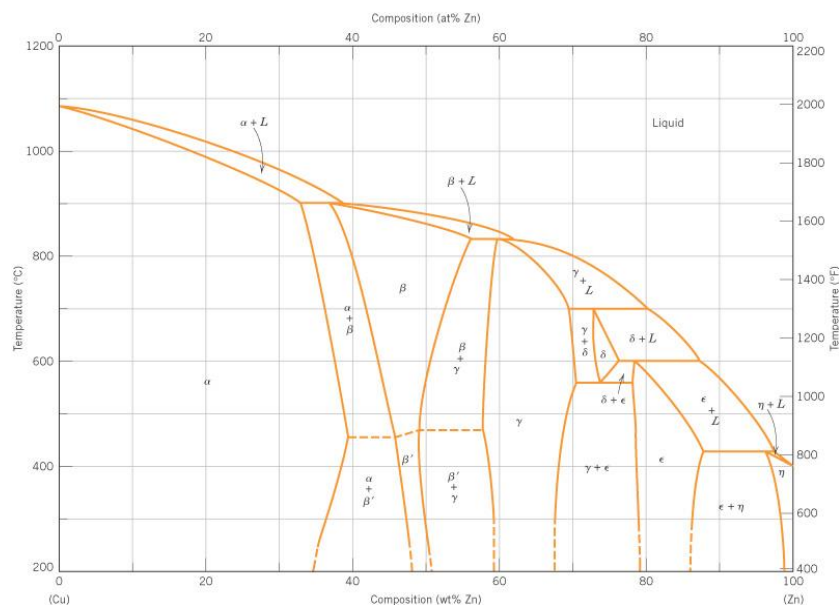


67. ábra⁷⁷: Eutektikum dermedése

⁷⁶ Forrás [1]
⁷⁷ Forrás [1]

5.2.5. RÉZ-CINK FÁZISDIAGRAM

Egy összetett, érdekes kérdés a Cu – Zn rendszer állapotábrájának (68. ábra) vizsgálata is. Látható, hogy ennél a példánál **az állapotok változásának folyamata a Zn – koncentráció függvénye**, és **lényegesen többféle fázis** valósulhat meg.



68. ábra⁷⁸: Cu-Zn fázisdiagram

5.2.6. VAS-SZÉN FÁZISDIAGRAM

A vas legfontosabb ötvözőeleme a szén (karbon), a vas-szén kétkomponensű rendszer állapotábráját **vas-szén (karbon) fázisdiagramnak** (69. ábra) nevezzük [8].

Ezen a diagramon

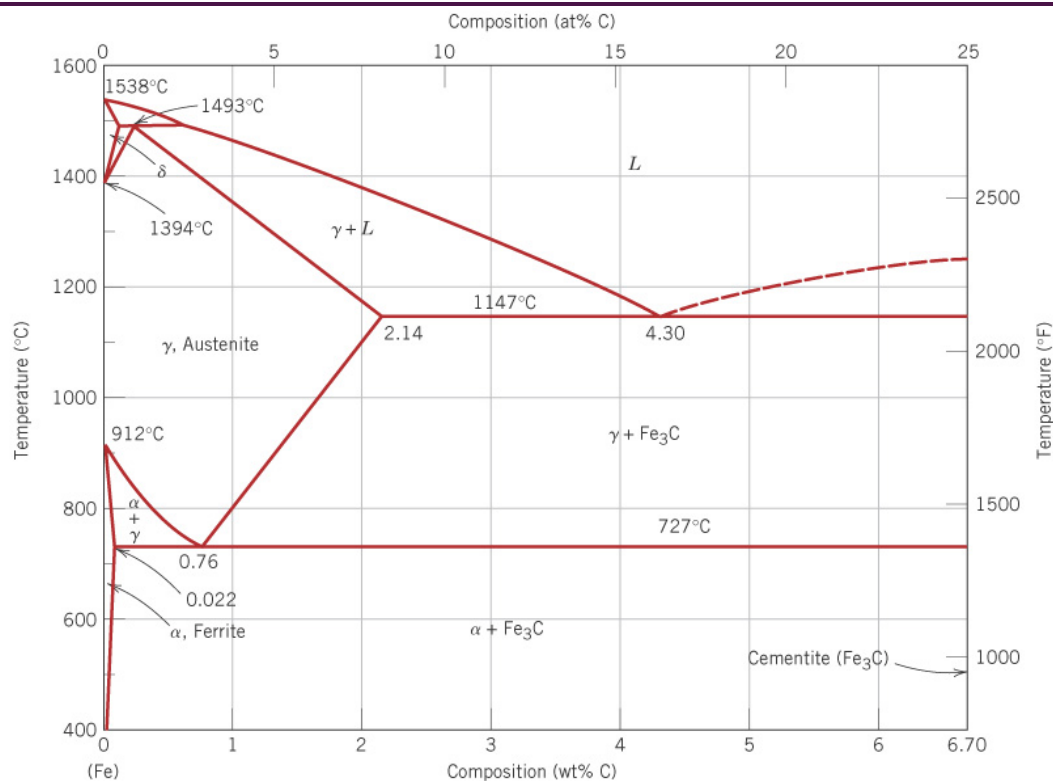
- szemléltethők az **átalakulásra jellemző vonalak**,
- és leolvashatók róla a **karakterisztikus (jellemző) hőmérsékletek**,
- tekinthető a **kémiai összetétel**.

Az acél – mint vas-szén ötvözet – **lehűlési görbéje eltér a vasétól** (ld. [korábban](#)).

Az acélnál **hőmérséklet-csökkenés közben megy végbe a dermedés**; s ezen belül az ötvözet „pépes” állapot: **egyszerre tartalmaz**

- **folyékony fázist**
- **és kristályos fázist is** [8].

⁷⁸ Forrás [1]

69. ábra⁷⁹: Fe-C fázisdiagram

A vas-szén állapotábra alakja egy ún. **ikerdiagram** [8]:

- A **vaskarbidos állapotra** vonatkozóan (Fe–Fe₃C) **folytonos vonal** szerepel. Triviális, hogy az **acél** esetében
 - **ezt kell figyelembe vennünk,**
 - és **csakis az „E” eutektikus pontig** (ld. [korábban](#)) **kell tekinteni**, mely 2,11 m/m%-nál van.
- A **vas–szén (Fe–C) ötvözet** fázisdiagram **szaggatott vonallal** látható. Ennél a szén stabilis **grafitként** van a rendszerben.

A fázisdiagram kitűntetettnek tartott pontjait betűk jelölik; **minden karakterisztikus (jellemző) ponthoz tartozik**

- **hőmérséklet**
- **és összetétel.**

A karakterisztikus pontok és görbék adatai leolvashatók; azonban a források nem egzaktul ugyanazokat az értékeket tartják számon [8]:

- **A likvidusz görbe** (ld. [korábban](#)): itt **kezd kristályosodni** az olvadékunk.
- **A szolidusz görbék** (ld. [korábban](#)): a likvidusz görbe alatt vannak, **jelzik a megszilárdulás végét.**

⁷⁹ Forrás [1]

- **Egy pontból nyíló likvidusz és szolidusz görbe:**
 - A [marenzites átalakulás termodinamikájánál](#) már szerepelt, hogy a *Fe–C fázisdiagramon* látható, miszerint **a vas dermedése és allotróp átalakulásai hőmérséklet-közben mennek végbe**. Emiatt nyílik egy pontból kiindulva például a likvidusz és a szolidusz görbe.
 - Az [ötvözőknél](#) már szerepelt, hogy a színvas **dermedésének, olvadásának hőmérséklet-közét az ötvözők kivétel nélkül süllyeszti; azonban bizonyos más átalakulások hőfokközét az ötvözőelemek ellentétesen változtatják meg**.
- **A diagram többi görbéje:** a (kristálytanilag többalakú) **allotrop átalakulásokat és módosulatokat mutatják**, melyek **szilárd állapotban** végbe mennek.
- **α , β , γ , δ stb. pont:** az **allotrop módosulatokat** jelölik.
- **A_i pontok:** az **átalakulás hőmérsékletei**, a francia arrêt = megállás szóból.
- Az acél szövetében megjelenő **fázisok és szövetelemek** (70. és 71. ábra, köv. old.) – ásványtani mintára – neveket is kaptak:

A. Egyensúlyi állapotban előforduló fázisok és szövetelemek:

- Az **ausztenit** már szerepelt, ld. korábban: [az ötvözőknél](#) és a [martenzites átalakulásnál](#).
- A **ferrit** szintén szerepelt, ld. korábban: [az ötvözőknél](#) és a [martenzites átalakulásnál](#).
- A **vaskarbidról/cementitről (Fe_3C)** is esett már szó, ld. korábban: [a nyersvas és az acél](#) részben és a [damaszkuszi acélnál](#).

Ez 3 változatban fordul elő:

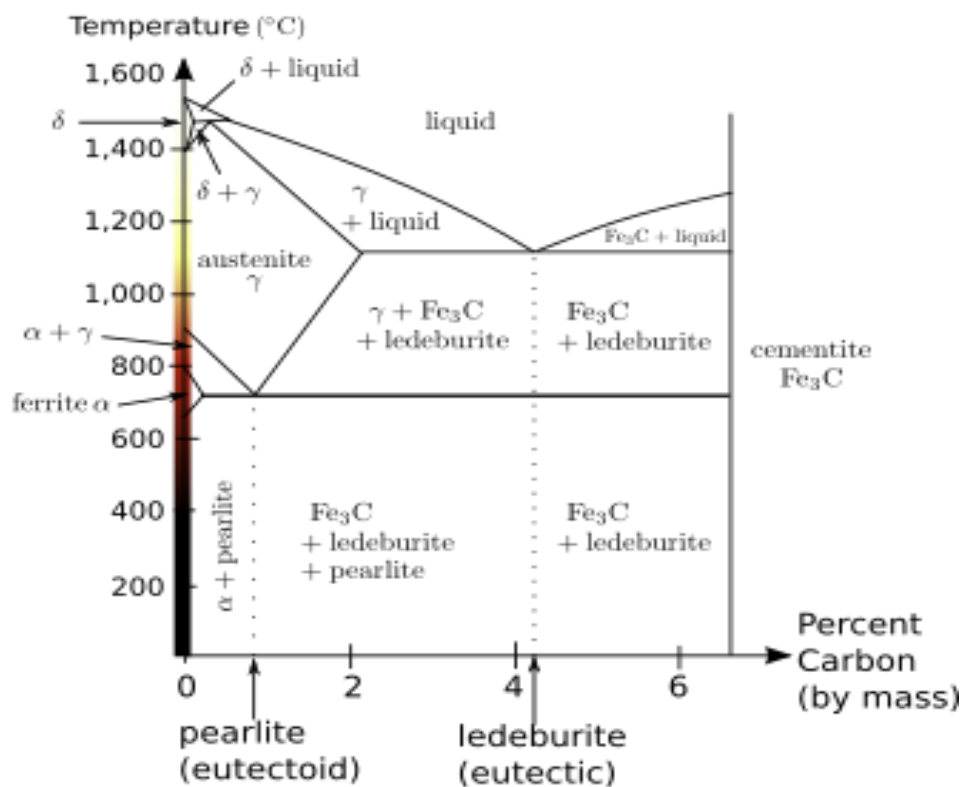
- elsődleges/primer cementit: a C ponttól „jobbra”, 4,30%-nál, nagyobb karbontartalmú hipereutektikus ötvözetekben kristályosodik (értelemszerűen 1148 °C fölött).
- másodlagos/szekunder cementit: a 0,77%-nál nagyobb C-tartalmú ausztenitből válik ki, az 1148–727 °C hőmérsékletközben.
- terciér/harmadlagos cementit: a ferritből alakul ki, 727 °C alatt.
- Az ún. **ledeburit**: Az **ausztenit és a cementit eutektikuma** (ld. [korábban](#)), 1148 °C-on kristályosodik 4,30% C-tartalommal (C pont).
- Az ún. **perlit**: A ferrit és a cementit eutektoidja (ld. [korábban](#)), 727 °C-on jön létre (S pont).

Szerkezete lemezes, ami annál finomabb, minél gyorsabb lehűlés közben alakul ki (régábban megkülönböztették szorbit és trosztit nevű változatait).

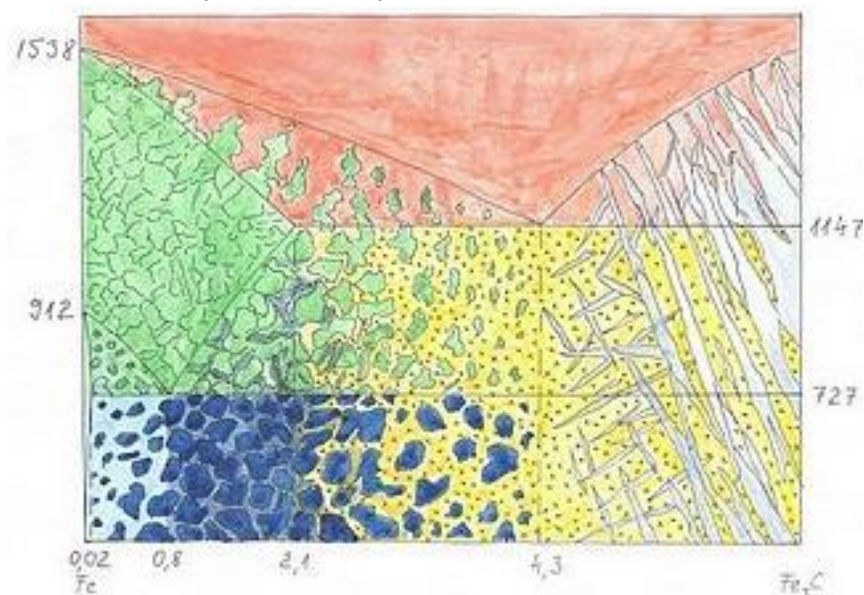
A perlitnek van szemcsés szerkezetű változata is, ez edzett és megeresztett acélban mutatható ki.

B. Egyensúlyi állapotban elő nemforduló fázisok és szövetelemek:

- A **martenzit** már szerepelt, ld. korábban a [martenzites átalakulás alfejezetben](#).
- Az ún. **bénit** nem más, mint az ausztenit 727 °C alatt, az átalakulás befejeződéséig való hőntartása során képződik. Ferritbe ágyazott karbidkristályok alkotják.



70. ábra⁸⁰: A vas-szén fázisdiagram, amely bemutatja, hogy az ausztenit, a ferrit, stb. milyen tartományban stabil acél



71. ábra⁸¹: A vas-szén (vas-cementit) fázisdiagram szövetszerkezettel.

⁸⁰ Forrás: [8]

⁸¹ Forrás: [8]

Utóbbi ábrához a színek a következők: piros - olvadék, zöld - ausztenit, szürke - cementit, sárga - ledeburit, világoskék - ferrit, sötétkék - perlit. A perlit és a ledeburit összetett szövetelem, egy finomabb fölbontásban jellegzetes szövetszerkezetet tartalmaz.

A vas 2 kristályos módosulata különböztethető meg [8]:

1. $\alpha(\delta)$ -vas , 1538–1394 °C közt

2. γ -vas , 1394–912 °C közt

1. α -vas , 912 °C alatt (az α -vas és az $\alpha(\delta)$ -vas ekvivalensnek tekintendő, megkülönböztetésüknek csak tradicionális).

(Megjegyzés: Régi szakirodalmakban még szerepel a β -vas is. Ennek hőmérsékletét 770 °C-nak állapították meg, és M (az ábrán nincs jelölve) és O betűvel jelölték. Ennél a pontnál valójában nem történik allotróp átalakulás: ez a hőmérséklet mindössze **a vas Curie-hőmérséklete**, itt van a mágnesezhetőség határa.)

A **szén** és a további **ötvözők módosítják az előbbi hőmérséklet-értékeket**, ld. korábban: [az átalakulási hőmérséklet az ötvözőelemek koncentrációjának függvényében](#).

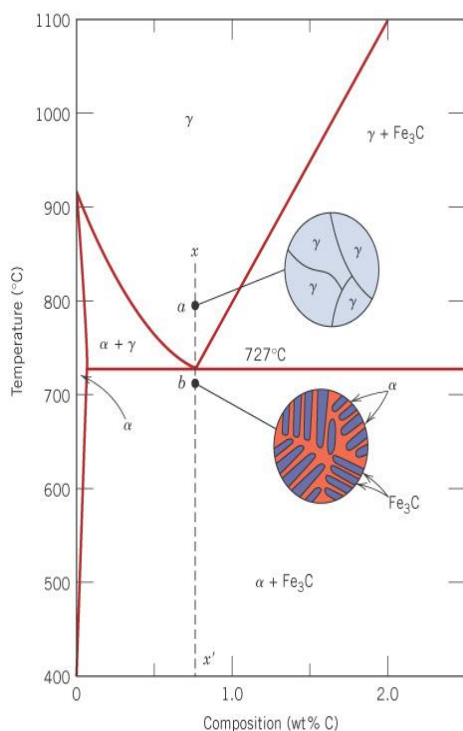
Vannak olyan ötvözők, amelyek a lapcentrált allotrop módosulat létrejöttének kedveznek; ezek az ún. **ausztenitképzők**, ld. [korábban](#).

Más ötvözők ezzel szemben a tércentrált allotrop módosulat létrejöttét segítik; ezek az ún. **ferritképzők**, ld. [korábban](#).

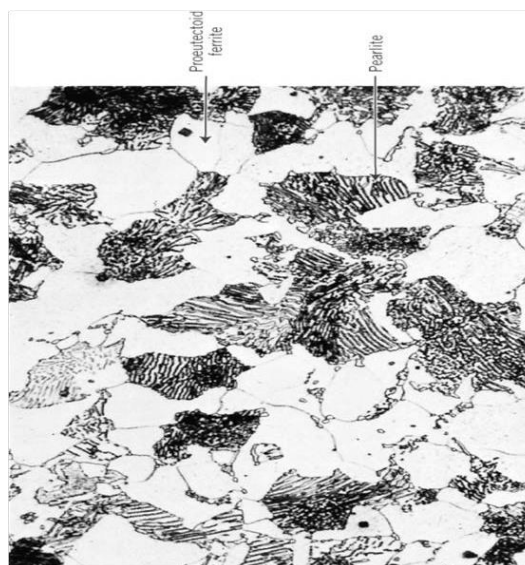
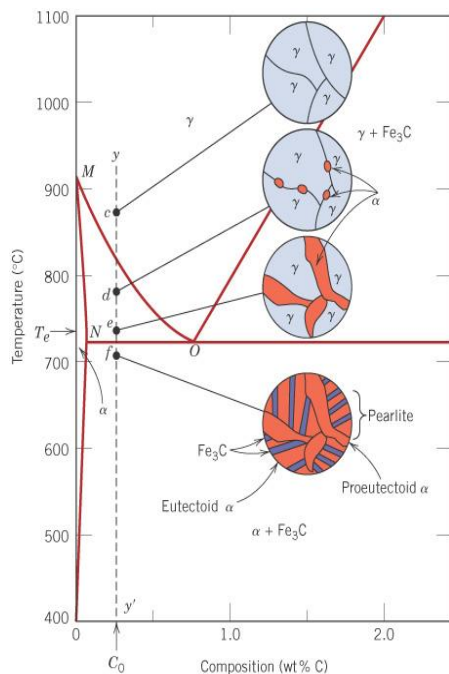
Az előbb leírt hatásmechanizmus miatt, **a γ -tér lenyúlhat szobahőmérsékletig** az ötvözőelemek hatására, ha egy ötvözetben az ausztenitképző-hatás nyilvánul meg. Ezek az ún. **ausztenites acélok**, ld. [korábban](#), ilyen például a 8% Ni-t és 18% Cr ötvözt tartalmazó saválló acél.

5.2.7. PÉLDÁK HŰTÉSRE

Végezetül tekintsünk néhány példát az előbbi részben említett *hűtés* folyamatára (72-74. ábra).

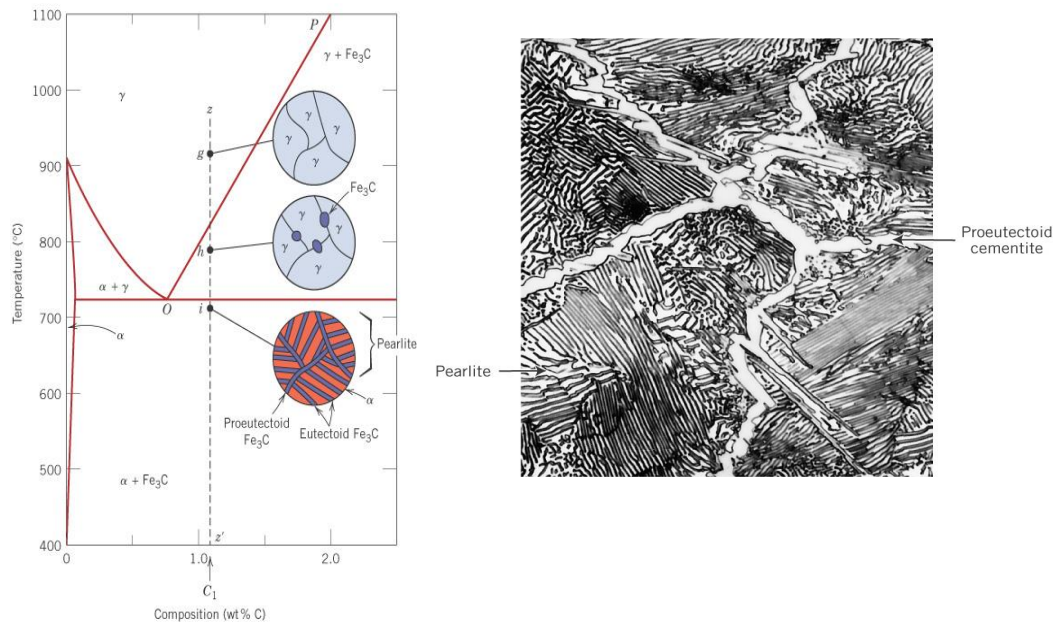


72. ábra⁸²: 1. példa hűtésre, a dermedési hőmérséklet a C-koncentráció függvényében



73. ábra⁸³: 2. példa hűtésre, a dermedési hőmérséklet a C-koncentráció függvényében

⁸² Forrás [1]
⁸³ Forrás [1]



74. ábra⁸⁴: 3. példa hűtésre, a dermedési hőmérséklet a C-koncentráció függvényében

⁸⁴ Forrás [1]

6. HIVATKOZÁSOK

- [1] Dr. Ispánovity Péter Dusán: Vasgyártás, acélgártás
Prezentáció az „*Alkalmazott fizika I (Korszerű műszaki alkalmazások alapjai)*” c. egyetemi kurzushoz
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/03_Acelgyartas/03_Acelgyartas.pptx
- [2] Prof.Dr. Tichy Géza (2007): Fizika a vasgyártásban. A bucavastól a damasztkpengéig (MI A TITKA?)
Természet Világa, 138. évf. 7. sz. 2007. július
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/03_Acelgyartas/Vasgyartas/
- [3] „A középkori vaskohászat” c. videó
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/03_Acelgyartas/Movies/A%20kozepkori%20vaskohaszat.mp4
- [4] „How to forge a horse shoe heart” c. videó
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/03_Acelgyartas/Movies/How%20to%20forge%20a%20horse%20shoe%20heart.mp4
- [5] „Martenzit” c. videó
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/03_Acelgyartas/Movies/martenzit.avi
- [6] Dr. Orbulov Imre Norbert: Nyersvas- és acélgártás
In „*Anyagismeret*” c. tantárgyhoz tartozó egyetemi jegyzet, BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék
http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT2/letoltes/1-Nyersvas-es_acelegyartas.pdf
(A tantárgy segédanyagai: <http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT2/letoltes>)
- [7] Prof.Dr. Károly Gulya – Józsa Róbert (2012): Konverteres acélgártás
Egyetemi jegyzet, Miskolci egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
<http://metont.uni-miskolc.hu/wp-content/uploads/2014/03/06-Konverteres-ac%C3%A9lgy%C3%A1rt%C3%A1s.pdf>
- [8] Wikipedia: Stahl
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stahl>
Angolul: Wikipedia: Steel
<https://en.wikipedia.org/wiki/Steel>
(Magyar nyelven: Wikipedia: Acél
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%A9l>)
- [9] Wikipedia: Stahlherstellung
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlerzeugung>
Angolul: Wikipedia: Steelmaking
<https://en.wikipedia.org/wiki/Steelmaking>

-
- (Magyar nyelven: Wikipédia: Acélgártás
https://hu.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%A9lgy%C3%A1rt%C3%A1s#Az_ac.C3.A9lgy.C3.A1rt.C3.A1s_t.C3.B6rt.C3.A9nete)
- [10] World Steel In Figures 2016
<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:4fo60d8b-3602-4ffe-9e87-7e93e0659449/Word+Steel+in+Figures+2016.pdf>;
és <http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2016/World-Steel-in-Figures-2016-is-available-online.html>
- [11] Wikipedia: Limonit
<https://de.wikipedia.org/wiki/Limonit>
- [12] Magnetit.jpg
<http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/magnetit.jpg>
- [13] Hematit 1.jpg
http://nj.kortepc.hu/wp-content/uploads/2015/09/Hematit_1.jpg
- [14] Limonit.jpg
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/41/Mineraly.sk_-_limonit.jpg/260px-Mineraly.sk_-_limonit.jpg
- [15] SideriteBresil2.jpg
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5c/SideriteBresil2.jpg/260px-SideriteBresil2.jpg>
- [16] Kislexikon: redukció
<http://www.kislexikon.hu/redukcio.html#ixzz4Vkh13YxD>
- [17] Sziklavári János: Az izzó vas tűzcsillagai (vaskohászat tegnap és ma)
<http://www.sci-tech.hu/history/ttkalauz/sziklavari/>
- [18] Farkas Ottó: Nyersvasmetallurgia.
Budapest: Tankönyvkiadó. 1989.
- [19] Wikipedia: Goethit
<https://de.wikipedia.org/wiki/Goethit>
- [20] Goethit.jpg
http://monstone.hu/Asvany/Kepek/Oxidok/Goethit/goethit_2n.jpg
- [21] Rempört Zoltán: Magyarország vaskohászata az ipari forradalom előestéjén.
Budapest: Montan–Press. 1995.
- [22] Végh Balázs: A bucavasgyártástól az elektroacélig
http://www.vilaglex.hu/Erdekes/Html/VasAcelT_.htm
- [23] Fonás ábrázolása a Várhelyen talált urnán (Naturhistorisches Museum, Bécs)
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/NHM_-_Keramik_Sopron_1.jpg/375px-NHM_-_Keramik_Sopron_1.jpg
- [24] Fegyverek képe a kora vaskorból
<http://www.asonyomon.hu/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/fegyver.jpg>
- [25] Kislexikon: oxidáció
http://www.kislexikon.hu/oxidacio_a.html
-

-
- [26] Kislexikon: oxidáció
<http://www.kislexikon.hu/oxidacio.html>
- [27] Vitkóczy Fanni: Kidolgozott tételek az Alaklamzott fizika I. tárgyhoz
http://ispanovity.web.elte.hu/teaching/2016_2017/kor_musz_alk_i/jegyzet/kidolgozott_tetelek_vitkoczi_fanni.pdf
- [28] Gömöri János: „Lovasnépek” vaskohászata Pannóniában.
In Az őshazától a Kárpátokig (szerk.: Szombathy Viktor),
Budapest, Panoráma Kiadó, 1985.
- [29] Sulinet adatbázis: Az acélgártás folyamata.
In Műszaki alapismeretek elektronikus tananyag
<http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/mezogazdasag/muszaki-alapismeretek/ipari-vasotvozetek-a-vas-szen-otvozetek-technologiai-tulajdonsagaik-szerinti-csoportositasa-az-acelgartas-folyamata/acelgartas>
- [30] Wikipedia: Kovácsolás
https://hu.wikipedia.org/wiki/Kov%C3%A1csol%C3%A1s#hely:Szab.C3.B3_L.C3.A1szl.C3.B3_2001
- [31] Horváth Miklós: Ausztenit
<http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Ausztenti.htm>
- [32] Wikipedia: Ferrit
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Ferrit>
- [33] Dr. Hári László (2013): Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagszerkezettan_es_anyagvizsgalat/1_az_alkalmazott_tudomany.html
(11.6. A martenzit tulajdonságai: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagszerkezettan_es_anyagvizsgalat/11_6_a_martenzit_tulajdonsagai.html ;
12.5. A martenzit képződése: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagszerkezettan_es_anyagvizsgalat/12_5_a_martenzit_kepzodese.html)
- [34] Horváth Miklós: Martenzit
http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Martenzi_.htm
- [35] Thielle Ádám (2011): Martenzites átalakulás és kiválásos keményítés
Anyagtudomány2 PhD szigorlat féléves házi feladata
<http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/egyeb/Martenzites%20%C3%A1talakul%C3%A1s%20%C3%A9s%20kiv%C3%A1l%C3%A1sos%20kem%C3%A9ny%C3%ADt%C3%A9s.pdf>
- [36] Wikipedia: Martensit
<https://de.wikipedia.org/wiki/Martensit>
- [37] Kovács Endre, Paripás Béla (2009): Fizika I.
<http://meip.x5.hu/files/1647>
- [38] Kézmelegítő párna kép
<http://s3.olcsobbat.hu/images/521b6fc08e16d56c1c000c5d-225x225-resize-transparent.png>
- [39] Melegítőpárna_1.jpg
-

-
- http://m.cdn.blog.hu/il/ilovemom/skins/mit-hol-mennyi%C3%A9rt/Meleg%C3%ADt%C5%91p%C3%A1rna_1.jpg
- [40] Kézmelegítő.jpg
http://www.lovaswebaruhaz.hu/includes/i.php?f=/uploads/kezmelegito_ujra_hasznalhato.jpg&s=360
- [41] hot ice (sodium acetate) beautiful science experiment
<https://www.youtube.com/watch?v=BLq5NibwV5g>
- [42] Nátrium-acetát kristályosodása beoltás hatására
<https://www.youtube.com/watch?v=tYgHZzXWFEA>
- [43] Víz túlhűtése
<https://www.youtube.com/watch?v=atxIYWETi1s>
- [44] National Geographic: Megfejtették a damaszkuszi acél titkát?
http://www.ng.hu/Civilizacio/2010/10/Megfejtettek_a_damaszkuszi_acel_titkat
- [45] Dr. Juhász András – Dr. Tasnádi Péter: Érdekes anyagok, anyagi érdekességek
Akadémiai Kiadó, 1992.
- [46] Damaszkuszi acélkovácsolás
<https://www.youtube.com/watch?v=KRTreDaHobw>
- [47] Wikipedia: Vas (III)- oxid
[https://hu.wikipedia.org/wiki/Vas\(III\)-oxid#/media/File:Haematite-unit-cell-3D-balls.png](https://hu.wikipedia.org/wiki/Vas(III)-oxid#/media/File:Haematite-unit-cell-3D-balls.png)
- [48] Nyíregyházi Főiskola: Kémiai kötések
In Ásvány – és kőzettan, Kristálykémia
<http://asvanytan.nyf.hu/node/286>
- [49] Wikipedia: Olvadáspont
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Olvad%C3%A1spont>
- [50] Wikipedia: Eutektikum
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>