



Tardy Pál – Károly Gyula:

Acélgyártásnál a technológia fejlesztés, adagvezetés elméleti megfontolásai, vertikális szempontjai

Miskolci Egyetem
2013

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujsechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Károly Gyula
a műsz. tud. doktora
Prof. emeritus

-

Tardy Pál
a műsz. tud. doktora
egy. magántanár

Acélgyártásnál a technológia fejlesztés, adagvezetés elméleti megfontolásai, vertikális szempontjai

A digitális tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0071 számú, *Kompetencia alapú, korszerű, digitális komplex tananyagmodulok létrehozása és on-line hozzáférésük megvalósítása fémtechnológiákhoz kapcsolódó felsőfokú műszaki képzési területeken* című projekt keretében készült

Lektorálta:

Dr. Szőke László
a műsz.tud.kandidátusa
c. egyetemi tanár

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	3
1. ELŐSZÓ.....	8
2. BEVEZETÉS	9
2.1. A steeluniversity.org honlapon található metallurgiai jegyzetek adaptálásának indokoltsága	9
2.2. Néhány gondolat a <i>steeluniversity</i> tananyag elkészültéről.....	10
2.3. Néhány gondolat a <i>steeluniversity</i> tananyag adaptálásáról	11
3. AZ ACÉLGYÁRTÁS TÖRTÉNETÉNEK RÖVID ÁTTEKINTÉSE	13
3.1. Az acélgyártás illeszkedése a vaskohászat technológiai vertikumába	13
3.2. Bucavas (bucaacél) kinyerése vasérccekből	13
3.3. Bucakemencékből vasolvasztók lesznek, a termék nyersvas	20
3.4. Acélgyártás nyersvasból frisstüzekben	22
3.4.1. Nyersvasfinomítás	23
3.4.2. Acélra való frissítés	24
3.4.3. Lágyvasra való frissítés	24
3.5. Acélgyártás nyersvasból kavarókemencében.....	25
3.6. Az egylépcsős és kétlépcsős acélgyártás	27
3.7. Az acélgyártás technikai színvonala a fizikai és kémiai tudományos ismeretek tükrében a XIX. század első felében	28
3.8. Acélgyártás nyersvasból szélfrissítéssel konverterekben	29
3.9. Acélgyártás nyersvasból és acélhulladékból Siemens- Martin- kemencékben	31
3.10. Acélgyártás tégelyben és elektrokemencében	35
3.10.1. Tégelyacélgyártás.....	36
3.10.2. Acélgyártás elektrokemencében (ld.bővebben az Elektroacélgyártás jegyzetben)	36
3.11. Acélgyártás oxigénkonverterben	37
3.12. Acélgyártás direktredukciós termékekből	38
3.13. Az acélgyártás és a kapcsolódó technológiai fázisok történetének időrendi áttekintése	39
4. ACÉLGYÁRTÁS OXIGÉN KONVERTERBEN	41
4.1. Bevezetés a bázikus oxigén acélgyártásba.....	42
4.2. Szimulációs célok.....	43
4.3. Üzem alaprajz és leírás.....	43
4.4. Szimulációs lehetőségek	44
4.4.1. Használói szintek.....	44
4.4.1.1 Egyetemi hallgatói szint	44
4.4.1.2 Acélipari technikus szint	44
4.4.2. Szimuláció sebesség	44
4.4.3. Megcélzott acélfajta	44
4.5. Ütemezés tervezése	45
4.5.1. Összetétel	46
4.5.1. Hőmérséklet	46
4.5.1.1 A likvidusz hőmérséklet kiszámítása	47
4.5.2. Az oxigén fúvatói folyamat szakaszai	47
4.5.2.1. A szilícium oxidálódásának szakasza	48
4.5.2.2. A karbonoxidáció szakasza	48

4.5.2.3 A karbondiffúzió periódusa.....	48
4.6. Felhasználó interface.....	49
4.6.1. Szabályzás a szimuláció alatt	49
4.6.1.1. Beadagolások (A-billetnyű)	49
4.6.1.2. Acélösszetétel-idő összefüggés megtekintése (C-billetnyű)	50
4.6.1.3. Eseménynapló megtekintése (E-billetnyű).....	50
4.6.1.4. Olvasztás lefolyásának megtekintése (P-billetnyű).....	50
4.6.1.5. A megkért kémiai összetétel megtekintése (R billetnyű).....	51
4.6.1.6 A salakösszetétel-idő összefüggés megtekintése (S billetnyű)	51
4.6.1.7. Dialógus doboz zárása (X billetnyű)	51
4.6.2. Szimulációs eredmények.....	52
4.7. Elvi alapokul szolgáló tudományos összefüggések	52
4.7.1. Adalékok számítása.....	52
4.7.1.1. Elemek beadagolása	53
4.7.1.2. Más elemek felvétele.....	53
4.7.1.3. Keveredési idő.....	54
4.7.2. Fontos reakciók	54
4.7.2.1. Foszforgoszlási arány	55
4.7.2.2. Foszfortalánítás kinetikája a fúvatást követő keverés alatt	56
4.7.2.3. Kénmegoszlási arány.....	56
4.7.2.4. Mangánmegoszlási arány	56
4.8. HŐ- ÉS TÖMEGMÉRLEGEK FELÍRÁSA	57
4.8.1. Bevezetés.....	57
4.8.2 Tömegmérleg	57
4.8.3. Hőmérleg.....	58
4.8.3.1. Termodinamikai függvények és egységek	58
4.8.3.2. A hőmérleg felállításának alapelvei	58
4.8.3.3. Felhasználási példa acél felhevítésére aluminotermiával.....	61
4.9. Betétszámítás.....	63
4.9.1. Mérlegegyenletek kiválasztása.....	63
4.9.2. A Simplex módszer alapelvei mérleg egyenletek megoldására	64
4.9.3. Hogyan írjuk fel a mérlegegyenleteket	65
4.9.3.1. Fe-mérleg	65
4.9.3.2. O-mérleg.....	65
4.9.3.3. Gázmérleg	65
4.9.3.4. Az Fe-n kívüli salakalkotók mérlege	65
4.9.3.5. Bázicitás egyenleg.....	65
4.9.3.6. Energiamérleg	66
4.9.4. Számszerű alkalmazás.....	67
5. ACÉLGYÁRTÁS ÍVFÉNYES ELEKTROKEMENCÉBEN.....	68
5.1. Bevezetés a villamos ívkemencés – elektro – (EAF) acélgyártásba	68
5.1.1 Alapkonceptiók.....	68
5.1.2. Hevítés és olvasztás.....	69
5.1.3. Más műveleti megfontolások	70
5.2. Szimulációs célok.....	70
5.3 Szimulációs lehetőségek	70
5.3.1. Szimuláció sebesség.....	70
5.3.2. Megcélzott acélfajta	70
5.4. Ütemezés tervezése	71
5.5. A hulladék előkészítése.....	72

5.5.1. A hulladék kiválasztása	72
5.5.1.1 Alkalmazó interface	73
5.5.2. A hulladék berakása a kosarakba	75
5.5.2.1. Felhasználó interface	76
5.6. Kemence művelet	77
5.6.1. A kemence berakása	77
5.6.2. Elektródák	77
5.6.3. Teljesítmény-fokozat szabályozás	78
5.6.4. Vízhűtési panelek	78
5.6.5. Adalékok	78
5.6.6. Olvasztás és kikészítés	80
5.6.6.1. Salakképző adalékok	80
5.6.6.2. Karbon és oxigén befűtatása	80
5.6.6.3 A foszfor és a kén eltávolítása	81
5.6.7. Csapolás	81
5.6.8. Alkalmazó interface	81
5.6.9. Billentyűzet gyors beavatkozásra	83
5.6.9.1. Ötvözők beadagolása (A - billentyűzet)	83
5.6.9.2. Eseménynapló bemutatása (E - billentyűzet)	83
5.6.9.3. Analízis ismertetés (R - billentyűzet)	83
5.6.9.4. Dialógus doboz zárása	83
5.7. Az eredmények összegzése	83
5.8. Elvi alapokul szolgáló tudományos összefüggések	84
5.8.1. Hőmérséklet	84
5.8.2. Fontos reakciók	84
5.8.3. Az ötvöző adagolás számítása	85
5.8.3.1. Adalékok számítása a célösszetétel elérésére	85
5.8.4. Dezoxidáció	86
5.8.5. Habos salak	89
5.8.6. Kéntelenítés	90
5.8.7. A foszfor eltávolítása	92
6. AZ ÜSTMETALLURGIA	93
6.1. A korábbi szimulációkhoz képest ebben a szimulációkban milyen változtatások vannak?	93
6.1.1. Változások az alkalmazói interface-ben és kialakításban	94
6.1.2. Műszaki változtatások	94
6.2. Bevezetés az acélgyártó üstmetallurgiába	94
6.3. A szimuláció feladata	96
6.4. Üzem elrendezés és leírás	96
6.5. Szimulációs célok	97
6.5.1. Alkalmazószint	97
6.5.2. Szimuláció sebesség	97
6.5.3. Kiválasztott acélfajta	98
6.6. Program tervezése	98
6.6.1. Összetétel	99
6.6.2. Hőmérséklet	101
6.6.2.1. A likvidusz hőmérséklet kiszámítása	101
6.7. Alkalmazó kezelőfelülete	102
6.7.1. Az üst szállítása	102
6.7.1.1. Üstkocsi	102

6.7.1.2. Daruk.....	102
6.7.2. A vezérlőpult.....	103
6.7.2.1. Ötvöző adagolás elvégzése (A billentyű).....	103
6.7.2.2. Buborékoltató állomást szabályzó panel (F kulcs).....	105
6.7.2.3. Keringtető gáztalanító szabályzó panel (D billentyű).....	105
6.7.2.4. CAS-OB szabályzó panel (C billentyű).....	105
6.7.2.5. Üstkemence szabályzó panel (L billentyű).....	105
6.7.2.6. Üstgáztalanító szabályzó panel (T billentyű).....	105
6.7.2.7. Kémiai elemzés lekérés (R billentyű).....	106
6.7.2.8. Esemény napló áttekintés (E billentyű).....	106
6.7.2.9. Szimuláció újraindítása (X kulcs).....	106
6.7.3. Szimuláció eredményei.....	106
6.8. Alapokul szolgáló tudományos összefüggések.....	107
6.8.1. Ötvöző beadagolásának kiszámítása.....	107
6.8.2. Dezoxidáció.....	110
6.8.3. A C-oxidációja.....	110
6.8.3.1. A C-oxidáció termodinamikája.....	110
6.8.3.2. A C-oxidáció kinetikája.....	111
6.7.4. Kéntelenítés.....	112
6.8.4.1. Kéntelenítő salak adagolása.....	113
6.8.4.2. Dezoxidálás.....	114
6.8.4.3. Keverés az üstgáztalanítóban.....	114
6.8.5. Hidrogén eltávolítás.....	115
6.8.5.1. Termodinamika.....	115
6.8.5.2. A hidrogén eltávolításának kinetikája.....	115
6.8.6 Üstkeverés.....	116
6.8.7 Villamos újrahevítés.....	116
6.8.8 Acéltisztaság.....	117
7. A FOLYAMATOSÖNTÉS.....	119
7.1 Bevezetés a folyamatos öntésbe.....	120
7.2. Szimulációs tárgyak.....	121
7.3. Üzemelrendezés és leírás.....	121
7.3.1 Az öntőgép méretei.....	122
7.4. Szimulációs célok.....	123
7.4.1 Szimulációs mód.....	123
7.4.1.1 Standalone mód.....	123
7.4.1.2 Irányított mód.....	123
7.4.2 Alkalmazó szintek.....	124
7.4.2.1 Egyetemi hallgató szint.....	124
7.4.2.2 Acélipari üzemi technikus szint.....	124
7.4.3 Acélfajták.....	125
7.4.3.1 Repedésre hajlamos fajták.....	125
7.4.3.2 Beragadásra hajlamos fajták.....	126
7.4.4 Enyhe redukciós szint.....	126
7.4.5 Öntési sebesség és szekundér hűtési sebesség.....	127
7.4.6 Kristályosító oszcillálásának beállítása.....	129
7.4.6.2 Oszcillációs jelek.....	130
7.4.7 Öntőpor.....	131
7.4.7.1 Fontos paraméterek.....	132
7.4.8 Üstrendelés.....	133

7.4.8.1 Időpont	134
7.4.8.2 Hőmérséklet	135
7.4.8.3 A likvidusz hőmérséklet kiszámítása	135
7.4.9 A választások áttekintése	135
7.5 A szimuláció futtatás	136
7.5.1 Az öntés indítása	136
7.5.2 Üstcsere	136
7.5.3 Acéltisztaság.....	136
7.5.4 Alakváltozás-elemzés modell brammaöntő gépre.....	137
7.5.4.1 Belső repedés becslése	138
7.5.4.2 Felületi repedés becslése	140
7.5.5 A kitörés megelőzése	141
7.6 Alkalmazó interface	141
7.6.1 Szimuláció szabályozás.....	142
7.6.1.1 Szimuláció sebesség.....	142
7.6.1.2 Üstforgató.....	142
7.6.1.3 Üst	142
7.6.1.4 Közbenső üst	142
7.6.1.5 Szál.....	142
7.6.1.6 SEN cseréje (Csak üzemi technikusoknak).....	143
7.6.1.7 Elektromágneses Keverés (Csak blokkbuga-és bugaöntő gépekre)	143
7.6.1.8 Enyhe redukció (Csak brammaöntő gépekre)	143
7.6.2 Öntés-információ.....	143
7.6.2.1 Eseménynapló megjelenítése (E kulcs).....	143
7.6.2.2 Öntősugár megjelenítése (F kulcs).....	143
7.6.2.3 Belső görgők bemutatása/takarása (H kulcs)	143
7.6.2.4 Acélszint megjelenítése (L kulcs)	144
7.6.2.5 Minőség megjelenítése (Q kulcs).....	144
7.6.2.6 Hőmérséklet megjelenítése (T kulcs).....	144
7.6.2.7 Öntésinformáció dialógus doboz zárása (X kulcs).....	144
7.6.3 Szimulációs eredmények.....	144
Irodalomjegyzék.....	147
TESZT-FELADATOK.....	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

1. ELŐSZÓ

250 évvel ezelőtt, Mária Terézia királynő 1762. október 22-i rendeletével indult be – a világon elsőként – a bányász-kohász akadémiai szintű képzés a selmeci tanintézetben. Az 1867-es osztrák-magyar politikai kiegyezéssel a selmeci akadémia magyar állami intézmény lett, Kerpely Antal professzor az 1872-ben alapított Vaskohászat és Vasgyártás Tanszéken még az 1972/73-as tanévben megjelentette az első magyar nyelvű kohászati tankönyvet, a kétkötetes Vaskohásztan-t. A hazai kohómérnökképzés azóta eltelt 140 éve során – Selmecen-Sopronban-Miskolcon – a tematikában, az oktatásszervezésben, a jegyzetellátottságban számos változás következett be, most, a 2012/2013-as tanév során a kor követelményeinek megfelelően – a TÁMOP-4.1.2.A-1-11/1 sz. pályázat elnyerése alapján megindult jegyzet- korszerűsítés során- elsőként jelennek meg digitális jegyzetek az acélgyártás témakörében (az egymásra épülés sorrendjében az alábbiak):

Károly Gyula:
Acélmetallurgia alapjai

Károly Gyula – Józsa Róbert:
Konverteres acélgyártás

Károly Gyula – Kiss László - Harcsik Béla:
Elektroacélgyártás

Károly Gyula – Kiss László - Károly Zoltán:
Acélok üstmetallurgiai kezelése

Károly Gyula – Réger Mihály – Harcsik Béla:
Acélöntés, speciális acélgyártás

Tardy Pál – Kiss László – Károly Gyula:
Speciális acélok gyártásának metallurgiai, energetikai, környezetvédelmi, minőségbiztosítási szempontjai

*

Tardy Pál – Károly Gyula:
Acélgyártásnál a technológia fejlesztés, adagvezetés elméleti megfontolásai, vertikális szempontjai

Kiss László – Józsa Róbert – Harcsik Béla:
A primér acélgyártás technológia tervezésének, technológiafejlesztésének gyakorlati szempontjai

Kiss László – Józsa Róbert – Harcsik Béla:
Az üstmetallurgia és a folyamatos öntés technológia tervezésének, technológiafejlesztésének gyakorlati szempontjai

Az utóbbi 3 jegyzet az Európai Unióban mindmáig egyetlenként elfogadott közös tananyag, a steeluniversity magyar nyelvű adaptációját ill. hazai vonatkozásokkal kiegészítését jelenti, mely rövidesen a www.steeluniversity.org honlapon található. Jegyzetkorszerűsítéseink során figyelembe kellett vennünk, hogy az a mai kohómérnökképzés négyes lépcsőjének (felsőfokú szakképzés-BSc képzés-MSc képzés-PhD képzés) megfeleljen, segítse az elméleti felkészülés mellett a gyakorlatorientált mérnökképzést is. Ezen jegyzetek mindegyike a www.tankönyvtar.hu honlapon, ill. a Vaskohászat és Vasgyártás tanszék mai jogutódjának, a Miskolci Egyetemen működő Metallurgiai és Öntészeti Intézet-nek a honlapján (www.metont.uni-miskolc.hu) tekinthető meg.

2. BEVEZETÉS

2.1. A steeluniversity.org honlapon található metallurgiai jegyzetek adaptálásának indokoltsága

Zsámboki Lászlónak, a Selmeci műemlékkönyvtár közelmúltban elhunyt igazgatójának ipartörténeti kutatásai igazolják [1], hogy a középkortól meginduló műszaki-technikai haladás évszázadokon keresztül a bányászat-kohászat haladásán keresztül jelentkezett, nyilván ennek is tudható be, hogy világszerte a bányászat-kohászat alkotta meg az első műszaki felsőoktatási intézményeket, ahol először oktattak tudományos szinten és laboratóriumi gyakorlatokkal kiegészülve kémiát, fizikát, mechanikát, ásványtant, földtant. Mária Terézia 1762. október 22-én kelt rendeletével Selmecen létesült – alakult ki az 1735-óta már ott működő bányászati-kohászati tanintézetből (Berg-Scholából) – a világon elsőként egy bányászati-kohászati akadémia (az Academia Montanistica). Selmecen az elsőként megalakult tanszék az Ásványtan-kémia-kohászat nevet viselte (vezetésére 1763.junius 13-án kapta meg professzori és bányatanácsosi kinevezését Nikolaus Jacquin), ez persze nem azt jelentette, hogy már akkor önálló lett volna a kohómérnökképzés, hanem azt, hogy a hallgatók az első két évfolyamon a bányászat-kohászat elméleti-elvi alapjaival (matematika, mechanika, ásványtan, földtan-teleptan, kémia, elméleti kohászat) ismerkedtek, a harmadik évben ezek alkalmazásával a bánya- és kohóiparban (bányaművelés, bányamérés, ércelőkészítés, kémlészet, kohászat, bányagazdaság, bányajog, erdészet, stb), s ezen tantárgyak oktatása egyfajta szakosodást igényelt, tanszékek létesítését. Az Ásványtan-kémia-kohászat tanszék megalapítását másodikként a Bányagépészet, harmadikként a Bányaműveléstan követte, s évtizedeken keresztül e három tanszék végezte a bányász-kohász felsőfokú képzést, míg az 1867-es kiegyezést követően az addigi latin (német) nyelvű képzést fokozatosan a magyar váltotta fel, s 1872-től önállóvá vált a kohómérnökképzés.

Az első bányászati-kohászati szakkönyvek latin nyelven, a XVI. század elején íródtak [2], Georgicus Agricola DE RE METALLICA c. 1556-ban Bazelben kiadott könyvét az OMBKE 1985-ben magyarra fordítva kiadta. A könyv 12 fejezetben foglalja össze AGRICOLA ismereteit a bányászatról és kohászatról, melyet elsősorban a szülőföldjének tekinthető Szászországban szerzett.

Selmecen a bányász-kohász képzés nyelve – az 1867-es kiegyezésig – a német volt (Agricola művét már 1557-ben lefordították németre). A kiegyezést követően Kerpely professzor volt az [3], aki magyar nyelven írt kétkötetes jegyzetét 1873/74-ben kiadta (ez volt az első magyar nyelvű kohászati szakkönyv), s ezt évtizedekig még az öt követő professzorok is előadásai anyagaként használták. Az 1872-től számított hazai kohómérnökképzés azóta eltelt 140 éve során – Selmecen-Sopronban-Miskolcon – a tematikában, az oktatásszervezésben, a jegyzetelátottságban számos változás következett be. Az elmúlt évszázadban a kohászati berendezések fejlődése szükségessé tette időnként az acélgyártási jegyzetek felújítását, átírását is, az utóbbi évtizedekben azonban – elsősorban finansziális okokból – nem volt lehetőség arra, hogy a Miskolci Egyetem kohómérnökképzése céljaira új acélgyártási jegyzet készülhessen, a legutóbbi jegyzetek a 80-as években íródtak [4-6]. Most, a XXI.század elején, a kor követelményeinek megfelelő jegyzeteket érdemes csupán készíteni a kohómérnökképzésre jellemző kiscsoportos felsőfokú képzés céljaira, s ebben jelent segítséget a TÁMOP-4.1.2.A-1-11/1

sz.pályázat elnyerése, mely digitális jegyzetek készítését teszi lehetővé a kohómérnökképzés terén, közelebbről az acélgyártás témakörében.

Az ELŐSZÓ-ban felsoroljuk a folyamatba tett, 2013-ban elkészítendő digitális jegyzetek listáját, az utolsó három jegyzet elkészítésében óriási segítség számunkra egy olyan tananyag, ami acélgyártás területén az európai kohászok összefogásával már előrehaladott állapotban van, ez a **steeluniversity** tananyaga.

2.2. Néhány gondolat a **steeluniversity** tananyag elkészültéről

Angliában 1993-ban **MATTER** néven egy non-profit konzorciumot hoztak létre az anyagtudományt oktató intézmények számítógéppel segített korszerű tananyagok létrehozása céljával. Tevékenységük – melyet az elmúlt 20 év során Európában leginkább a liverpooli és az aache-ni egyetem koordinál – eredményeképp előbb 1996-98-ban megjelent a **Materials Science on CD-ROM** kiadvány, majd 1999-ben a Corus (korábban British Steel) és a Birminghami Egyetem közreműködésével az on-line elérhetőségű **SteelMATTER** tananyag-modul. A többszálon történő továbbfejlesztés eredményeképp 2001-ben kezdődött meg az együttműködés az International Iron and Steel Institute (IISI) szervezetével, s a kísérleti projekt sikerét követően jött létre a World Steel Association, brüsszeli székhelyű egyesület tulajdonaként a **steeluniversity.org honlap** [7], mely korszerű, interaktív tananyagtartalmat biztosít ingyenesen, szabad hozzáférésű e-learning tananyagokként az acélgyártással, felhasználással, újrahasznosítással kapcsolatos témakörök széles skáláján. A tananyagok korszerű, a hallgatók számára vonzó multimédia illusztrációkkal, szimulációs játékokkal nemcsak az elsődleges célcsoport, a releváns BSc és MSc képzési programok hallgatói, de az acéliparban, beszállítói hálózatban alkalmazott szakemberek számára is hasznos forrásanyagok, ezt bizonyítják látogatottsági statisztikáik is.

A tananyag alkalmas önálló tanulásra is, de jól kiegészítheti a hagyományos tantermi képzési programokat is. A felhasználók regisztráció nélkül is látogathatják oldalait és elérhetik a tananyagtartalmakat, de a versenyeken való részvétel, bizonyos szimulációs játékok és tesztek elvégzéséhez szükséges a regisztráció, amely ingyenes.

A tananyagtartalmak mára már nemcsak angolul érhetők el, hanem azok jelentős része több más nyelven (német, spanyol, portugál, orosz, kínai, bolgár, japán, koreai) tanulmányozható, ugyanazon a felületen, ugyanabban a környezetben. A felsorolt fordítások ma még nem teljes körűek, fokozatosan készülnek és épülnek be a keretrendszerbe, amely tartalom az adott nyelven nem érhető el, ott automatikusan az angol nyelvű verzió jelenik meg.

A fokozatos beintegrálhatóság lehetővé teszi, hogy magyar nyelvű tananyagelemek is részlegesen és fokozatosan jelenjenek meg a többnyelvű, számos nemzetközi díjjal elismert elektronikus tananyagban. A steeluniversity alapvető jellegzetessége, hogy folyamatosan fejlődő, alapvetően az EU-normák (szakmai, környezetvédelmi, innovációs, tudományos, munkaerőpiaci stb.) szerinti szempontrendszerek alapján épül fel elméleti és gyakorlati oldalról egyaránt. Ennek a tananyagnak az adaptálással történő befogadása egyrészt segítheti a kohómérnökképzés tekintetében is az EU-normák maximális figyelembevételét, segítheti az európai kohómérnökképzési szint-hez igazodást, a sokféle irányból megközelíthető, jó szándékú integrálódást.

2.3. Néhány gondolat a *steeluniversity* tananyag adaptálásáról

A World Steel Association a Miskolci Egyetemmel 2012. év végén kötött együttműködésében hozzájárult ahhoz, hogy a steeluniversity.org honlapjáról hasznosítható tananyag egyes részei magyar nyelvre fordítva adaptálhatóak lehessenek. Szerzői jogukat természetesen tiszteletben kell tartanunk, ezért szöveghű fordításra van szükség, s ez válik majd később a www.steeluniversity.org honlap részévé, s immár az ott szereplő nyelvek között majd a magyar nyelvet is megtaláljuk.

Ha a www.steeluniversity.org honlapra lapozunk, akkor áttekintően láthatjuk, hogy mit is tartalmaz a steeluniversity program:

What is www.steeluniversity.org?

Ez a tananyag áll az alábbi modulokból:

- **Steel Processing**
- Steel Applications
- Ferrous Metallurgy
- Sustainability
- Safety and Health

A tananyagok (tananyagmodulok – a magyar nyelvre lefordítottakat kékkel kiemeltük) legértékesebb részei a szimulációk, ezek az alábbi területekre terjednek ki a www.steeluniversity.org honlapon:

These simulations are currently available:

- Virtual Steelworks
- Life of Iron Game
- Tour of a Cold Rolling Mill
- Blast Furnace
- [Basic Oxygen Steelmaking](#)
- [Electric Arc Furnace](#)
- [Secondary Steelmaking](#)
- [Continuous Casting](#)
- Plate Rolling
- Section Rolling (I-beam)
- Tensile Test
- Hardness Test
- Charpy Impact Toughness Test
- Sample and Test a Steel Plate
- Design and Make a High Strength Steel
- Recrystallization
- Nucleation & Growth

Nyilván egy adaptációs tevékenység során e rendkívül kiterjedt tananyagból rangsorolnunk kellett (a World Steel Association részéről nincs korlát, a rangsorolás, választás a mi részünkről merült fel, elsősorban anyagi okokból), úgy döntöttünk, hogy a TÁMOP-4.1.2.A-1-11/1

sz. pályázat kereteiben a Steel Processing (acélgyártás) modulból az alábbi fejezetek kerülnek elsőként adaptálásra:

Bázikus oxigén acélgyártás	(Basic oxigen steelmaking)
Elektroacélgyártás	(Electric arc furnace steelmaking)
Üstmetallurgia	(Secondary steelmaking)
Folyamatos öntés	(Continuous casting)

Jelen jegyzetben – tekintettel arra, hogy e jegyzet az MSc hallgatók képzését szolgálja, s az MSc hallgatók között előfordulhatnak olyan más BSc szakokon végzett hallgatók, akik felzárkózóként az acélgyártás történetét is meg kell ismerjék –, az adaptálás az acélgyártás történetének alapos áttekintésével kezdődik [8]. Ezen történeti áttekintésre építve a steeluniversity felsorolt fejezeteiből a virtuális technológiák (szimulációk) kerülnek ismertetésre Dr.Szőke László, c.egy.tanár fordításában (miután Szőke professzor volt a fordító, így praktikus okokból Ő vállalta jelen jegyzet lektori feladatait is).

Nyilván a fejezetek magyar nyelvű ismertetése a szerzői jogok tiszteletbentartása mellett történik, miután a World Steel Association-tól e célra csupán a szöveget kaptuk meg, az ábraanyag, ill. annak szimulációval történő böngészése a www.steeluniversity.org honlapra kattintva történhet, egyidejűleg ott a későbbiekben majd a magyar nyelvű szöveg is megtalálható lesz. Amíg ez nem következik be, addig e jegyzet szövegével a www.steeluniversity.org linkre hivatkozással a steeluniversity ábraanyaga természetesen használható, egyenlőre oktatás céljára költségmentesen (akadémiai verzió).

3. AZ ACÉLGYÁRTÁS TÖRTÉNETÉNEK RÖVID ÁTTEKINTÉSE

3.1. Az acélgyártás illeszkedése a vaskohászat technológiai vertikumába

A mai műszaki értelmezés szerint az acélgyártás az a metallurgiai művelet, amely vastartalmú nyers alapanyagokból finomított vasanyagot, acélfélterméket hoz létre. A nyers alapanyagokkal (pl. nyersvassal, vasszivaccsal, acélhulladékkal) szemben a kémiai összetétel, fizikai tisztaság és alak tekintetében az acélgyártás általában nem támaszt szigorú követelményeket. Az acélféltermék (pl. acéltuskó, öntött buga és bramma vagy öntvény) kémiai összetételének, alakjának, méretének, felületi minőségének viszont meg kell felelnie a kohászati tovább feldolgozó (pl. hengerlő, kovácsoló, sajtoló) üzemek előírásainak. Következésképpen korunk acélgyártása: vasolvadékok kémiai és fizikai tulajdonságait szabályozó, majd előírt alakokra kristályosító művelet.

A modern vaskohászatban a fenti folyamatok egymástól jól elhatárolhatók: pl. vaskinyerés nagyolvasztóban, nyersacélgyártás primér kemencében (konverterben vagy elektrokemencében), kristályosítás öntőgépen, képlékenyalakítás hengersorokon vagy kovácsoló gépeken történik. E folyamatok az ősi vaskohászati technológiákból fejlődtek ki, az elmúlt 4-5 ezer évben. A kezdő fázis, a vaskinyerés és a befejező fázis, a képlékenyalakítás az ősi eljárásokból evolúcióval, fokozatos fejlődéssel jutott el a mai műszaki színvonalra. Az acélgyártás (nyersacélgyártás, finomítás és kristályosítás) viszont az ősi eljárásokból innovatív lépésekkel, ugrásszerű technológiaváltások útján alakult mai modern eljárásokká.

Ez a fejezet azoknak az acélgyártó eljárásoknak fontosabb technológiai összefüggéseit foglalja össze röviden, amely eljárások a XXI. század elején már inkább csak technikátörténeti jelentőségűek. A mai modern acélgyártó eljárások – oxigénes konverteres, elektrokemencés és fontosabb különleges technológiák – itt csak vázlatosan, mint a történeti fejlődés legújabb változatai szerepelnek: ezekkel külön-külön fejezet (jegyzet) foglalkozik.

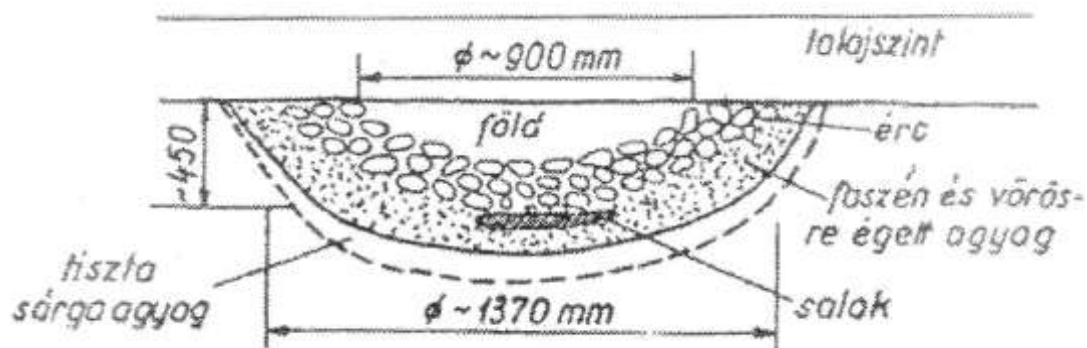
A történelmi acélgyártó technológiák tanulmányozása egyrészt a műszaki kultúra ismeretanyagának bővítését szolgálja, másrészt viszont a vaskohászok számára nélkülözhetetlen, hiszen a régi (és ősi) eljárások legfontosabb kohászati elemei megtalálhatók a modern technológiákban is.

Technikatörténeti acélgyártó technológiák:

- bucavas (acél)gyártás
- frisstüzi acélgyártás
- kavaró acélgyártás
- szélfrissítéses acélgyártás
- martinacélgyártás

3.2. Bucavas (bucaacél) kinyerése vasércekből

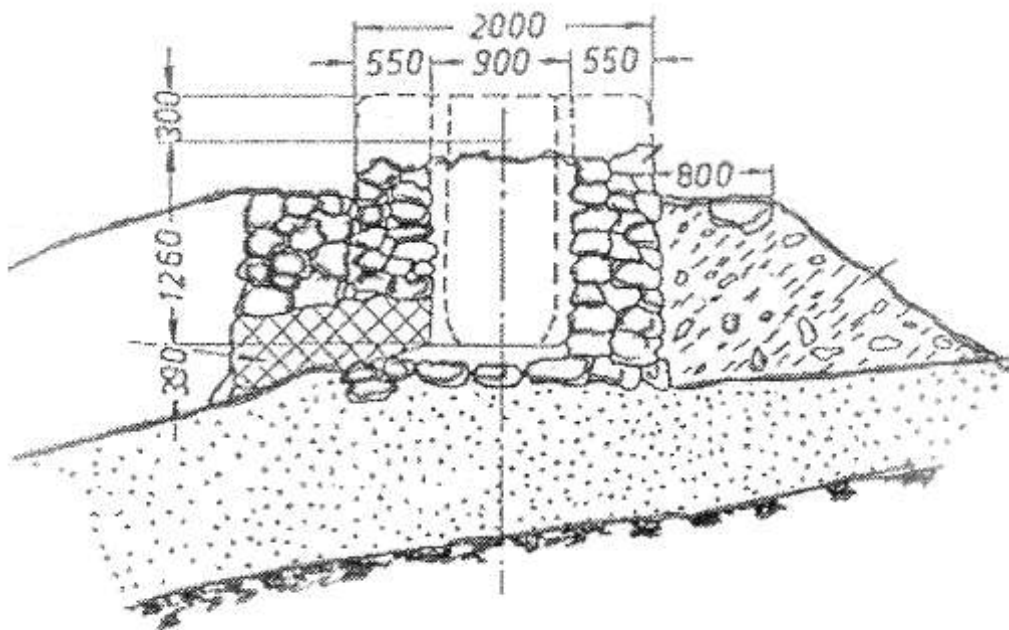
Kezdet kezdetén a vasat szilikátos vasércekből faszéntűzőn redukálták. A tüzet gödrökben, domboldalba vájt, agyaggal tapasztott üregekbe (3.1. és 3.2. ábra), később kőből emelt alacsony aknákba (3.3. ábra) rakták, és természetes levegőárammal táplálták. A vastag faszénrétegre töltötték fel az ércet, vagy érc és faszén keveréket.



3.1. ábra Vasbuca-redukáló gödör metszete



3.2. ábra Domboldalba vájt bucakemence a X-XII.századból (Imola)



3.3. ábra Domboldalba épített bucakemence metszete

Metallurgiai szemlélettel ezek a kezdetleges vasredukáló tűzhelykemencék is ellenáramú aknáskemencéknek tekinthetők. A folyamatosan égő-izzó faszéntüzből felfelé áramló gázok nemcsak érzékelhető hőt, hanem redukáló alkotót is tartalmaznak. A kémiai folyamatokat – leegyszerűsítve – az 3.4. ábra szemlélteti.

A levegő oxigénjével a faszén C-ja előbb CO_2 -dá ég el, (1), majd a Boudouard-reakcióban (2) CO keletkezik. A felszálló CO redukál a (3) és (4) reakció szerint.

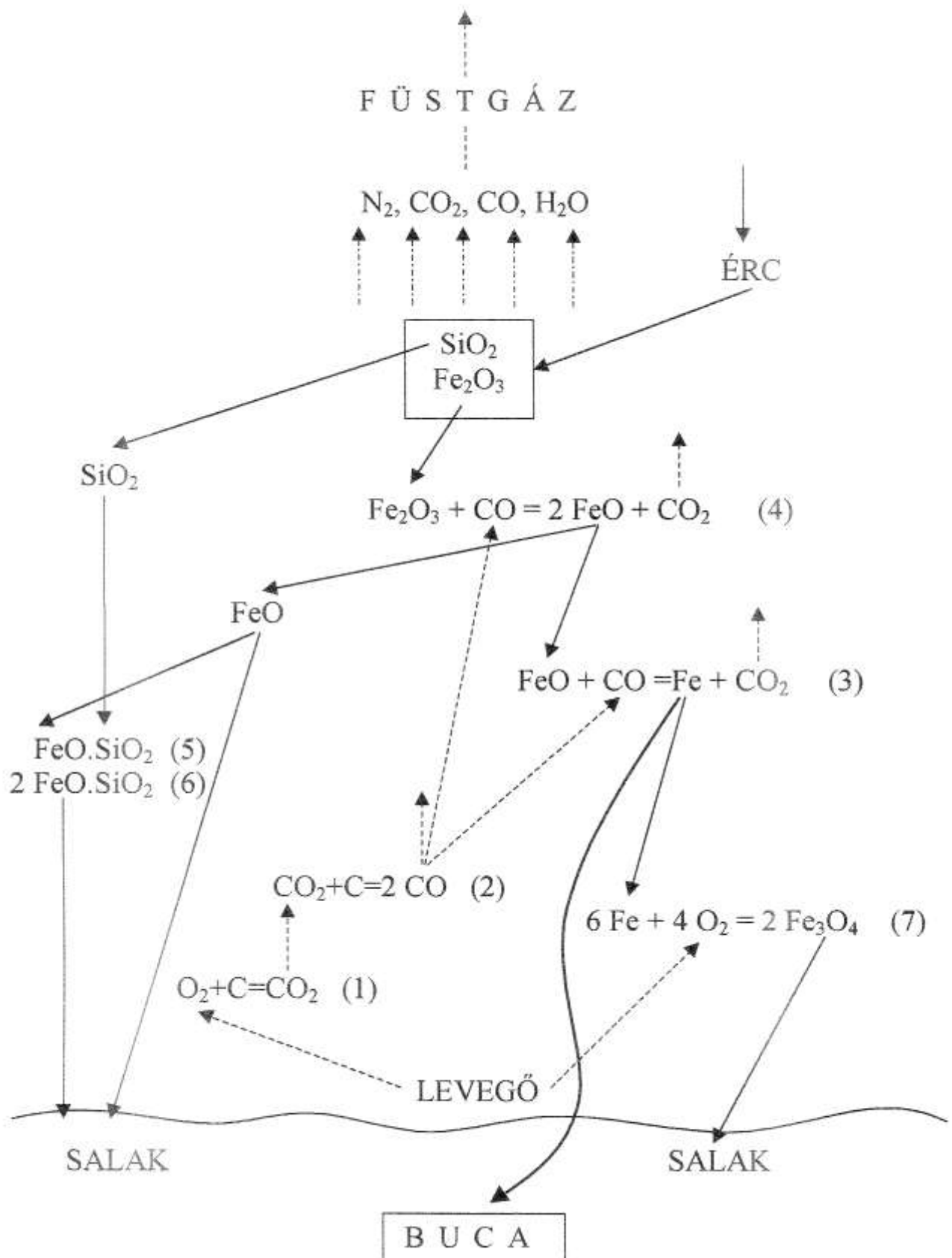
A faszén elégeése folytán süllyedő anyagoszlopban még viszonylag sok FeO marad: ennek egy hányada – megfelelően nagy hőmérsékletű zónában – a SiO_2 -dal folyékony vas-szilikáttá egyesül: (5) és (6). Ez salakként lecsorog az akna fenekére. A salakban jól oldódik a (7) és más reakciókban keletkező Fe_3O_4 .

A redukálódott vasrészecskék megolvadásához azonban még a legmelegebb zóna hőmérséklete sem volt elég nagy, emiatt azok tésztakonzisztenciájú csomócskákként süllyedtek le, és laza massa alakban összegyűlve ágyazódtak be a salakba.

A levegő oxigénjével a faszén C-ja előbb CO_2 –dá ég el, (1), majd a Boudouard-reakcióban (2) CO keletkezik. A felszálló CO redukál a (3) és (4) reakció szerint.

A faszén elégeése folytán süllyedő anyagoszlopban még viszonylag sok FeO marad: ennek egy hányada – megfelelően nagy hőmérsékletű zónában – a SiO_2 -dal folyékony vas-szilikáttá egyesül: (5) és (6). Ez salakként lecsorog az akna fenekére. A salakban jól oldódik a (7) és más reakciókban keletkező Fe_3O_4 .

A redukálódott vasrészecskék megolvadásához azonban még a legmelegebb zóna hőmérséklete sem volt elég nagy, emiatt azok tésztakonzisztenciájú csomócskákként süllyedtek le, és laza massa alakban összegyűlve ágyazódtak be a salakba.



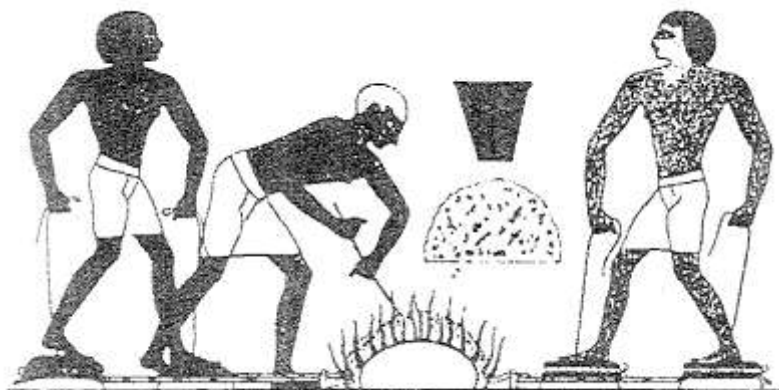
3.4. ábra Bucakemencében lejátszódó fontosabb folyamatok

A művelet végén a salakból kiemelt vasmassza, a „nyersbuca” különböző méretű vascsomók-ból álló néhány kilogrammnyi tömeg volt. (A régészeti szakirodalom a nyersbucát gyakran „lupa” névvel illeti.) Az egyes vascsomók több-kevesebb C-t is tartalmazhattak, amit az izzó faszénből diffúzió útján (3.8) vagy az akna 500....700 °C-os zónájában CO bomlás (3.9) útján vehettek fel:



A salakos nyersbuca nem megfelelő anyag használati eszközök céljára. Vasanyaga azonban meleg állapotban jól kovácsolódik, és ez a kedvező természeti (fizikai) tulajdonság lehetővé teszi a buca tisztítását, finomítását. Kalapácsütésekkel többszörösen „átgyúrták”, miközben a salakrészecskék – hőmérséklettől, ill. olvadáspontjuktól függően – vagy megolvadtak és kifolytak, kifröccsentek, vagy összetöredezték és egy részük kipergett a bucából: apróbbjaik – szétszóródva – a vaskristályokba záródhattak. Ahonnan a salak kiverődött, ott az egymással fémesen érintkező vascsomók a kovácsütések alatt összeforrtak (összehegedtek). A műveletet – izzítást, kovácsolást – szükség szerint többször megismételhették.

Az egygyé forrasztott vastömb anyagneve: „finomított bucavas”: röviden csak bucavas, ill. bucaacél. (Az iparrégészet gyakran erre is a „lupa” nevet használja.) A tömböt különböző keresztmetszetű rudakká kovácsolták. Ilyen rudak voltak a bucakohászat végtermékei, a használati eszközöket kovácsoló műhelyek kiinduló anyagai. A régészeti vas- és acélleletekből következtethető, hogy az ókor kultúrállamaiban a bucakemencék fejlettebb változatai léteztek: így pl. Egyiptomban, Mezopotámiában, Kínában, Krétán, Trójában és a föníciai városállamokban. Ez érthető, hiszen ott mindenütt már 2-3 ezer éves volt a kézművesség: színes kerámiákat égettek, üveget olvasztottak: álltak a krétai paloták, a gízai piramisok és a szfinx, a luxori Amon templom, az Oroszlánkapu: ismerték az írást, tízes számrendszerben számoltak, használták a naptárt (365 napos évvel). Az emberi tudás, műveltség és ügyesség tanúiként maradtak emlékek a sumér és akkád művészetről, a Mükénéi-, Minoszi-, a Sang-kultúráról. Ilyen kultúrkörnyezetben aligha maradhatott a bucakohászat színvonala bucagödrök szintjén. Előbb-utóbb jól kézben tartott technológiákat és tartósabb, nagyobb teljesítményű bucakemencéket fejlesztettek ki.



3.5. ábra Lábbal működtetett fűvócsöves olvasztótűz Egyiptomban

A természetes huzat helyett Egyiptomban előbb lábbal működtetett fűvócsöveket (3.5. ábra), majd Kr.e. 1600 körül már bőrfújtatókat használtak. 100-200 évvel később a Földközi-tenger

egész partvidékén bőrfűjtatós, 2-3-m magasra épített bucakemencék sorakoztak. A bucagyártás kémiai és fizikai folyamatai a kemence bármilyen szerkezeti megoldása esetében azonosak voltak a 3.4 ábra kapcsán vázoltakkal.

A vaskohászok megfigyeléseikre és tapasztalataikra támaszkodva nyilván tudták, hogy az érc és a faszén minősége, a salakképző anyagok és az elérhető hőmérséklet miként befolyásolják a vas minőségét és a kemence teljesítményét. Tisztában voltak azzal, hogy a bucakemencében a levegőáram intenzitásától függ a termelékenység. Nagyobb levegőáram-teljesítmény magasabb égéshőmérsékletet eredményez, növekszik a reakció sebessége, az acél keményebb lesz (több C diffundál a vaskristályokba), az időegységben több faszén égethető el, nagyobb környezetben melegszik fel a rendszer, növelni lehet a faszén és érc rétegvastagságát, a kemence magasságát, következésképpen nő a termelés, javul a vaskihozatal. Gyakran megeshetett, hogy a kemencén belül a metallurgiai körülmények (hőmérséklet, C-felvétel) úgy alakultak, hogy több-kevesebb folyékony nyersvas is keletkezhetett és lecsurgott. A salakon át süllyedő nyersvascseppekből a salakban oldott Fe_3O_4 képes volt kioxidálni a C kisebb-nagyobb hányadát. Ha mégsem, akkor a rideg nyersvaslepleányeket visszaadagolták a kemencébe.

A bucakohászatban a

vaskinyerés $\rightarrow$ vasfinomítás $\rightarrow$ kristályosítás

folyamata így játszódott le:

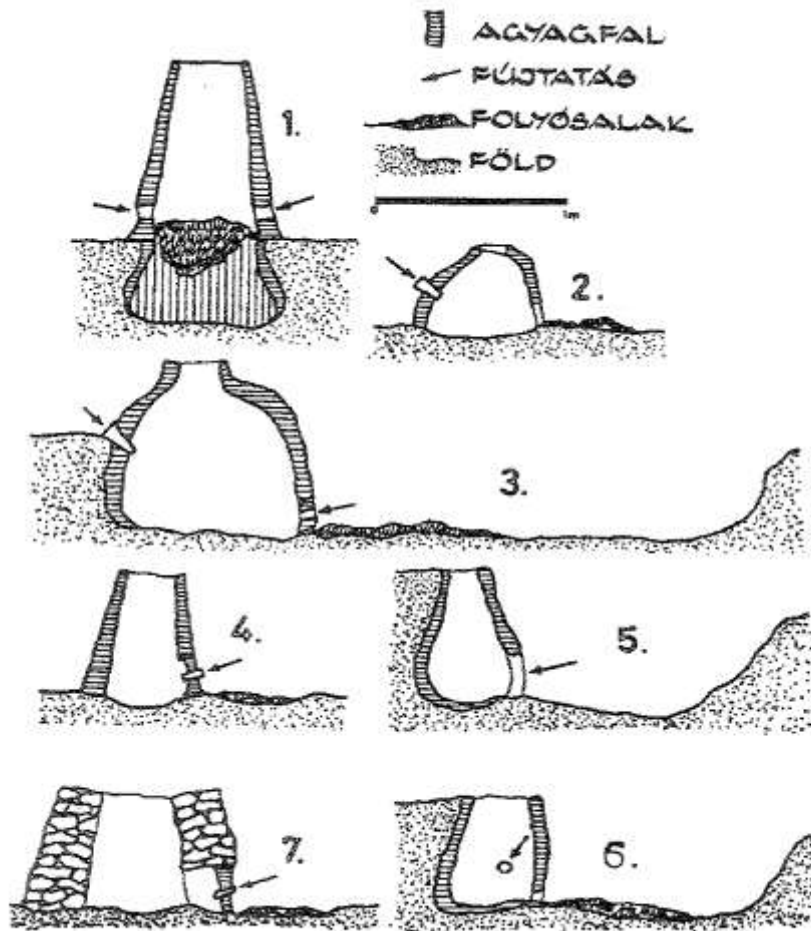
vaskinyerés: nyersbucá redukálása vasércből faszéntűzben a faszén C-jával, a Boudouard-reakció közvetítésével

vasfinomítás és kristályosítás kovácsolással:

- miközben az izzó nyersbucát a kovácsütések deformációra készítetik, az megtisztul a salaktól: e művelet célja és eredménye a vasfinomítás
- a megtisztult és egymással fémesen érintkező felületek krisztallitjait az ütések együtt deformálják, és a deformációt követő újrakristályosodáskor a két felület krisztallitjai már egybekristályosodnak: ez a kristályosítás művelete: lényege azonos a kovácshegesztés folyamatával.

A bucaacélt, mint anyagot tehát vaskristálycsomók összeforrasztása útján nyerték: innen származik a bucaacél megkülönböztető anyagneve is: forrasztott acél (az acél és a salak leletek vegyi elemzése az egyes alkotók tekintetében meglehetősen nagy szórásokat mutatnak. Nemcsak lelőhelyenként, hanem gyakran egyazon műhelyből származókban is).

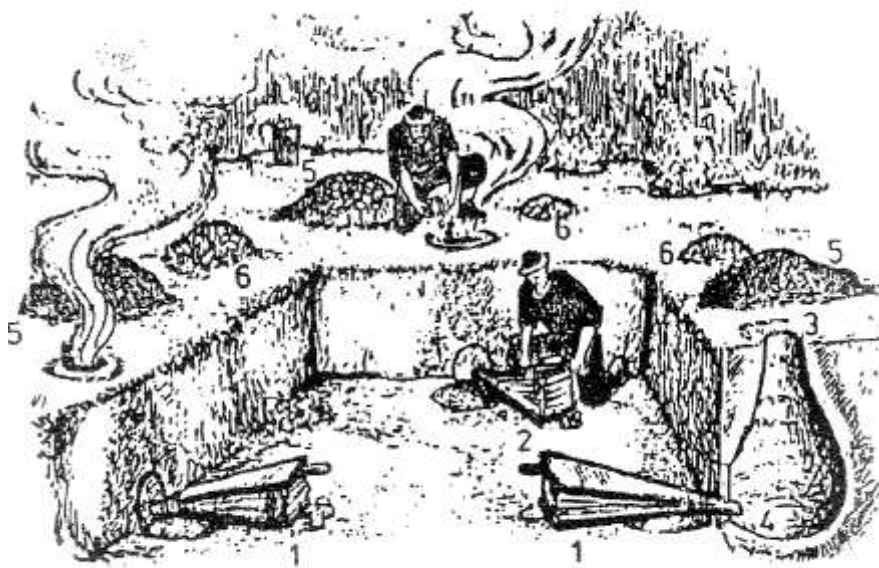
Az ókorban a Kárpát-medencében is fejlett volt a bucakohászat. Itt talált kemencék néhány típusát a 3.6. ábra vázolja.



3.6. ábra A Kárpát-medencében ismert bucakemencék vázlatos rajza

1- beépített aljú aknakemence (La Tène-kori), 2- szabadon álló alacsony kupola-kemence (La Tène-kori), 3- lemélyített kupola-kemence (La Tène-kori), 4- szabadon álló aknakemence (kora középkori), 5- beépített aknakemence műhelygödörrel (Árpád-kori), 6- beépített, oldalról fújtatott aknakemence (Árpád-kori), 7- szabadon álló, kőből épített aknakemence (korai és későbbi középkori)

A bucakohászok általában egyidejűleg több kemencével dolgoztak. A kemencéket a terepszonyokhoz alkalmazkodva építették fel. Arra alkalmas helyen pl. körben vagy félkörben. Ez utóbbira szép példa a Somogyfajszon feltárt és részben rekonstruált, több mint ezer éves műhely. (3.7. ábra). Ezt – a világ egyik legszebben megőrzött bucakohásműhelyét (3.8. ábra) – iparrégészeti kutatások eredményei szerint a honfoglaló magyarok építették és üzemeltették. 21 kemencét találtak itt. Egy-egy kemence élettartama átlag 12 adag lehetett, és adagonként 2,5-3 kg nyersbucát termeltek. A nyersbucát távolabb fekvő hámorokban finomították.



3.7. ábra A somogyfajsi bucaműhely elméleti rekonstrukciója
1- fűjtatók, 2- kemence üzem közben, 3- kemencetorok, 4- medence,
5- faszénhalmok, 6- vasérc



3.8. ábra A somogyfajsi emlékhely: a kohóműhely fölé emelt, sátor-alakú épület

3.3. Bucakemencékből vasolvasztók lesznek, a termék nyersvas

A bucagödrök és a bucakemencék több mint ötezer éven át szolgáltatták az emberiség számára a kovácsolható vasat, miközben a kemenceépítés technikája és a technológiai módszer az évezredek során folyamatosan fejlődött. A fűjtatóteljesítmény fokozása – pl. vízikerek meg-

hajtással –, a kemencék magasítása és a hőkihasználás javulása következtében nőtt a kemencében uralkodó hőmérséklet, minek folytán a vaskristályokban több karbon oldódott, és a vas megolvadt. Az olvadék még további C-t és nagyobb hőmérsékleten egyidejűleg redukálódott több-kevesebb Si-ot, Mn-t és P-t is oldott magában. Híg folyós és csapolható lett. Neve: nyersvas. Tőle salakolvadék alakjában különültek el az érc nem redukálódott kísérőásványai. A bucakemencéből vasolvasztó lett. Európában ez a fordulat a XIV. század elejére tehető.



3.9. ábra Magasított bucakemencéből kialakult vasolvasztó

Korabeli nyersvasak fontosabb alkotói, %:

C	2,80-3,20
Si	1,20-2,50
Mn	0,50-2,00
P	0,40-1,00
S	0,04-0,20

Olvadáspont 1150-1250 ° C

A folyékony állapotból kristályosodott nyersvas a benne oldott sok karbon miatt rideg volt: kovácsoláskor tört. Ez kezdetben igencsak bosszanthatta a kohászokat, amit az ilyen vasak elnevezései is bizonyíthatnak: angolul: pig iron, oroszul: csugunnaja szvinyka (angolul is, oroszul is disznó vas): mai német irodalmi neve: Roheisen, ennek magyar megfelelője: nyersvas.

A kohászok akkor még nem sejtették, hogy a kemencéből kifolyó nyersvas az egyetemes fejlődés számára mindmáig az egyik legnagyobb ajándék: a legfontosabb fémalapanyag.

A folyékony nyersvasból formába öntve vasöntvények készíthetők: acélok, finomszemcsés vasak és lágyvasak viszont csak frissítés útján nyerhetők. A frissítés oxidáló művelet: a folyékony nyersvasból ki kell oxidálni a benne oldott elemeknek, elsősorban a C-nak ama feleslegét, ami a gyártandó acél tervezett tulajdonságait rontaná. Példaképpen nyersvas, szerszámacél és lágy kovácsvas vegyi összetételét mutatja be a következő táblázat:

nyersvas		steiermarki lágyvas		lancashiri acél	
%		%		%	
C	3,0	C	0,90	C	0,04
Mn	1,5	Mn	0,043	Mn	0,07
Si	2,0	Si	0,02	Si	0,012
P	0,5	P	0,019	P	0,012
S	0,1	S	0,005	S	0,003
olvadáspontja kb.1150° C		olvadáspontja kb. 1400 °C		olvadáspontja kb.1530 °C	

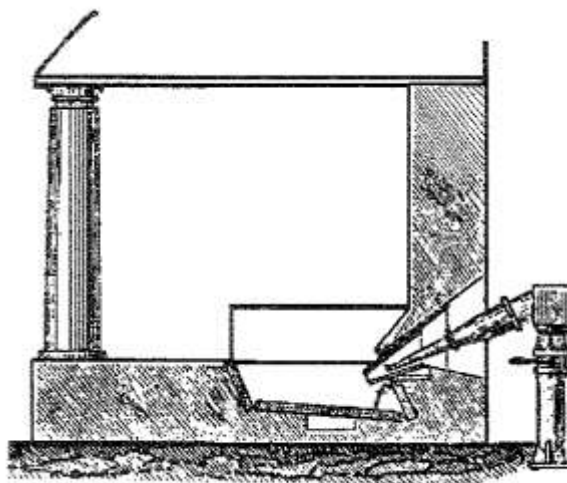
A frissítés folyamán tehát a vas olvadáspontja 1150 °C-ról 1400-1530 °C -ra növekedik.

A frissítéshez oxigén és hő szükséges. Az oxigént a levegő oxigénje, a salakban oldott vas-oxid (újabbán gáz alakú oxigén) szolgáltathatja. A hőenergiát a különféle acélgyártó eljárások a rájuk jellemző módszerekkel biztosítják. Kezdetben faszéntüzzel termelték a hőt.

A korabeli frissítő kemencékben – az akkori technikai eszközökkel – a nyersvasat meg tudták olvasztani, de a frissítéssel nyert termék – magas olvadáspontja miatt – nem maradt folyékony állapotban, hanem képlékeny massa, ún. gomolya lett. A technológiai nehézséget tetézte, hogy a C-nál könnyebben oxidálódó Si és Mn jelenléte miatt eléggé bonyolult kémiai műveleteket is kézben kellett tartani, hogy végül a C-tartalom megfeleljen a kívánalomnak. A frissítés nagy hozzáértést és gyakorlatot igénylő műveletsorozat volt. Helyenként néhány emberöltő is eltelhetett, amíg különböző ércek, különböző minőségű nyersvasainak frissítéséhez biztonságos módszereket dolgoztak ki. Gyakori volt, hogy inkább visszafogták a fűjtetés erősségét, és a kemencét nem nyersvasra, hanem bucára járatták! Nyersvasat csak öntvények céljára gyártottak. Így azután – noha a nyersvas megjelenésével új technikatörténeti korszak vette kezdetét – a korszakátmenet évszázadokig tartott. A bucavas ugyanis még sokáig kedvelt vas maradt, s a bucakemencék még 400-500 évig életképesek maradtak nemcsak iparilag elmaradott területeken, hanem a vezető ipari országokban is: Németországban (Schmalkalden 1840-ig, Steierországban 1830-ig, Svédországban 1850-ig, a Kárpát-medencében a XIX. század közepéig, az Egyesült Államokban (Lake Champlain) 1890-ig termeltek bucavasat).

3.4. Acélgyártás nyersvasból frisstüzekben

A nyersvasból évszázadokon át frissítő tűzhelyeken, ún. frisstüzekben gyártottak kovácsvasat és acélt. A frisstüzek öntöttvas lapokkal határolt, égetett agyaggal bélelt kemencék voltak (3.10. ábra). Bennük a darabokra tört nyersvasat faszéntüzzre helyezték: a tüzet az alulról fűjtött levegővel táplálták.



3.10. ábra Frisztűz (frisselő-kemence) fujtatóval

A vas a tűzben cseppenként olvadt meg. A lecsorgó vascseppek felületén a fűvószél-áram oxigénjével Fe_3O_4 képződött. A vascseppek a Fe_3O_4 -dús salakban süllyedve, a tűzhely alján gyűltek össze. Az oxidáció következtében a vas Si-, Mn- és C-tartalma csökkent, olvadáspontja növekedett és lágy gomolyaként kristályosodott. A gomolyát gyakran nevezték lupának is. A gomolyát kovácsolással tisztították meg a bezáródott salakrészeketől.

Egy korabeli vasműhely frisztűzből és közvetlenül mellé telepített kalapácsból állt. A kalapács neve hámor volt, de rendszerint magát a műhelyt (frisztűzet és kalapácsot) értették a hámor elnevezés alatt.

A frisztűzeken lehetett nyersvasat finomítani, azaz a nyersvas Si- tartalmát, Mn- tartalmát csökkenteni: lehetett rajtuk acélt, finomszemcsés vasat vagy lágyvasat gyártani. A kiinduló vas vegyi összetételétől függött, hogy hány frissítő leolvasztással érték el a termék tervezett C- tartalmát. Pl. Si- dús szürkenyersvasból lágyvasat három leolvasztással gyártottak:

első leolvasztás
második leolvasztás
harmadik leolvasztás

nyersvasfinomítás (deszilizírozás)
acélra való frissítés
lágyvasra való frissítés.

Mindenegyes leolvasztáskor lejátszódott oxidáció, salakképződés és kristályosodás.

3.4.1. Nyersvasfinomítás

Kiinduló anyag: szürkenyersvas 2 % Si- tartalommal.

Faszéntűzre rakják a darabokra tört nyersvasat. A lejátszódó folyamatok:

- a levegőáramban cseppenként leolvadó nyersvasból oxidálódik kevés Fe:



de a Fe_2O_3 ezen a hőmérsékleten nem stabilis, ezért nyomban átalakul:



- a Fe_3O_4 jelenléte hatására a Si túlnyomó hányada és a Mn egy része oxidálódik:



- az oxidokból salak keletkezik és a tűzhelyfenékre csorog: a salak fő alkotója $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (biszilikát)
- a Fe_3O_4 hatására a grafit –C kis hányada is oxidálódik:



vagy Fe_3C alakban oldódik a vasban

- a fémtermék a salak alatt lepény alakban kristályosodó finomított nyersvas: mai megnevezésünk, felfogásunk szerint szilíciumtalanított (deszilicézott) nyersvas.
- a folyamat azzal fejeződik be, hogy a salakot lecsapolják, a vaslepényt kiemelik és darabokra tördelik, a tüzet kitisztítják.

3.4.2. Acélra való frissítés

Kiinduló anyag: finomított nyersvas. Műveletek és folyamatok:

- faszéntűzre helyezik a finomított nyersvasdarabokat,
- a leolvadó vascspepekből oxidálódik a Fe egy része, a maradék Si és Mn: a salak fő alkotója $2 \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (szingulószilikát), ebben jól oldódik az Fe_3O_4 és a MnO ,
- a C oxidációja intenzíven folyik,
- a P egy része (hőmérséklettől függő mértékben) oxidálódik és a salakba kerül, a S egy része is (a folyamat időtartama függvényében) oxidálódik,
- a fémtermék a tűzhelyfenéken összegyűlő képlékeny acélgomolya, a gomolyában egymástól kisebb mértékben eltérő C-tartalmú kristálycsomók és salakszemcsék tapadnak egymáshoz,
- a salakot lecsapolják, az acélgomolyát egy darabban kiemelik.

3.4.3. Lágyvasra való frissítés

Kiinduló anyag: acélgomolya és vasoxidokban dús salak

- faszéntűzre rakják a feldarabolt acélgomolyát és a salakdarabokat,
- az acél nehezebben olvad: a leolvadó cspepeket egymástól híg folyós salakburok választja el, s így haladnak lefelé az oxidáló levegőáramban, miközben,
- a Fe egy része oxidálódik és a salakba kerül,
- a C- tartalom minimálisra csökken,

- kis mértékben oxidálódik a P és S,
- a Fe_3O_4 –ban dús, erősen oxidáló hatású, készrefrissítő (lágysrefrissítő) salakban gyűlik össze a fém: a lágysvas kristályok halmaza, a térszertzerű vascsomókat egyetlen gomolyává gyúrnak.

A háromolvasztásos lágysvasgyártás akkor volt szokásos, amikor előkészítetlen szürkenyrsvasból indultak ki. A frisstüzek – ha lehetett, termelékenységük növelése érdekében – finomított, más szóval fehérített nyersvasat kértek vagy vásároltak. A nyersvasfinomítás ez esetben az olvasztómű feladata volt.

A frisstüzon az Fe_3O_4 az a salakalkotó, amely oxidálni (frissíteni) képes. Az FeO is salakalkotó, segíti az Fe_3O_4 oldódását, de közvetlenül nem frissít.

A hámorokban – akár acélra, akár lágysvasra frissítették a gomolyát – befejező művelet a gomolya salaktalanító, újrakristályosító kovácsolása volt. A kalapáccsal kiverték belőle a salakot, ezután a fémesen érintkező fémrészecskék összehegedtek. A gomolyából készrekovácsolt hámori termékek rendszerint tuskó vagy rúd alakúak voltak, és a kovácsműhelyek ezekből készítettek használati eszközöket.

A frisstüzi acélgyártás az egyetemes fejlődésben elévülhetetlen érdemeket szerzett: a gépipar kialakulásának alapját teremtette meg. S bármennyire meglepő, de valóság, hogy amikor 1775-ben James Watt begyűjtötte a világ első kettős működésű hőerőgépét, az ipari forradalom motorját, és amikor Angliában a nagyolvasztókat már koksszal járaták, az acélt még a legfejlettebb Angliában is frisstüzeken gyártották.

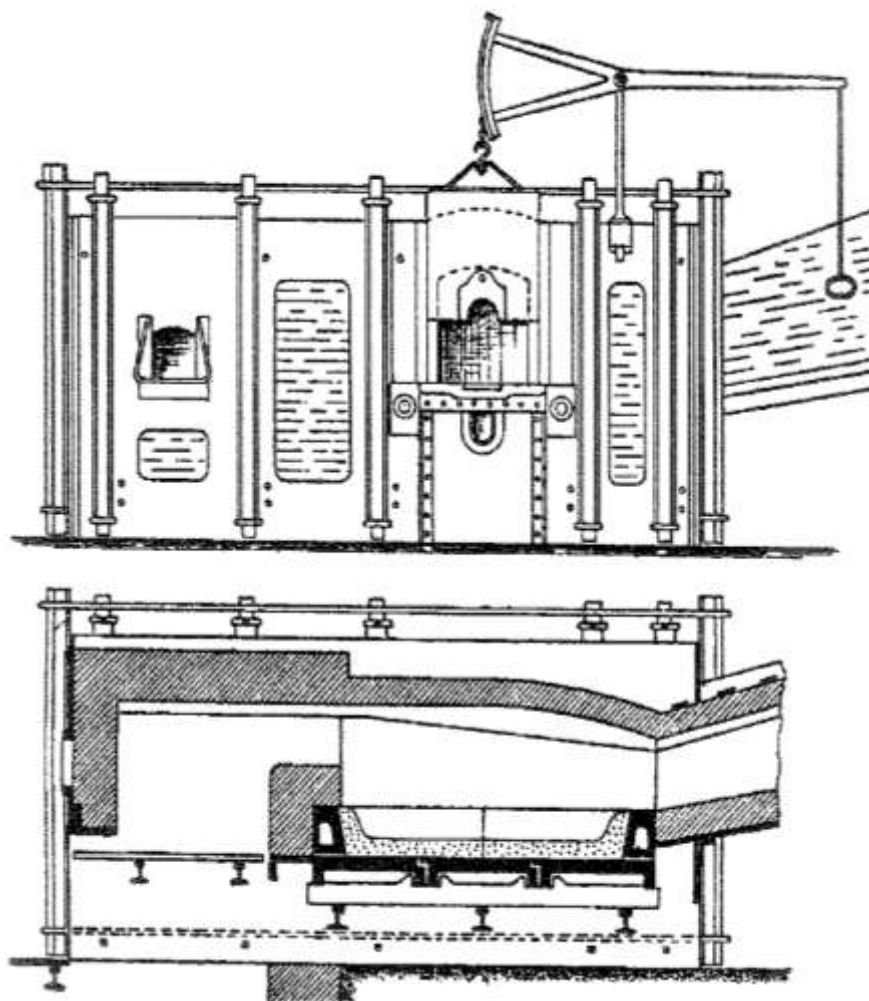
3.5. Acélgyártás nyersvasból kavarókemencében

A frisstüzeknél lényegesen nagyobb teljesítményűek voltak a – Henry Cort által 1784-ben szabadalmaztatott – kavarókemencék, ásványi szénrel fűthető lángkemencék (3.11. ábra). A kemencébe rakott nyersvascípók a kemence medencéjében homogén fürdővé olvadtak.

Az olvadékot a kavarókemencében is Fe_3O_4 -dús salakkal frissítették:



A nyersvas Si-, Mn-, P- és S-tartalmával is ugyanazok a folyamatok játszódtak le mint a frisstüzekben.

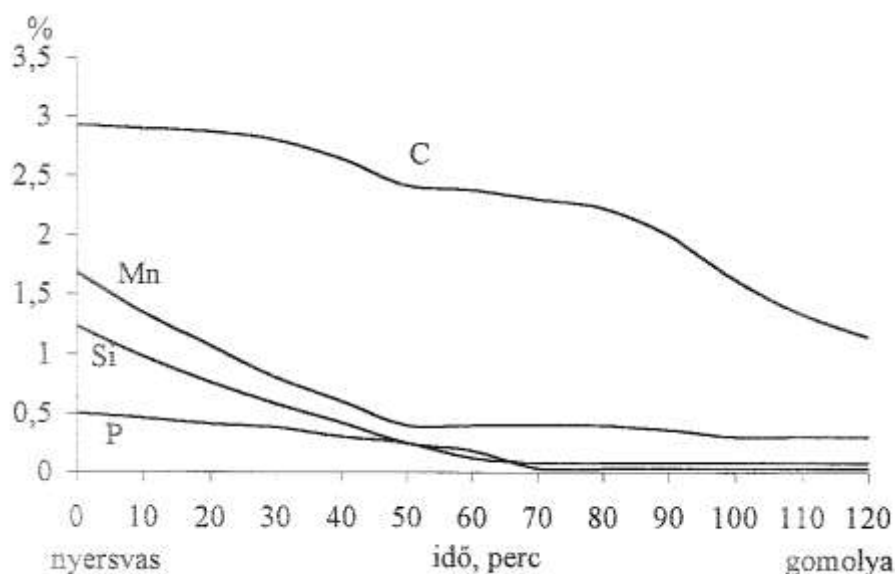


3.11. ábra Kavarókemence

A salak frissítő hatását kaválás útján a füstgáz oxigénfeleslegével, továbbá a salakra adagolt apró ércek és izzítókemence-revék vas-oxidjaival tartották fenn. Az érc vagy reve Fe_2O_3 -tartalma a salakban való rövid tartózkodás után Fe_3O_4 -dá alakul át. A FeO a kavarókemencében sem közvetlenül frissítő salakalkotó, mégis övé a főszerep, mert vegyül a fémoxidokkal, és ez a salak oldja a Fe_3O_4 -ot, továbbá közreműködik a füstgáz oxigénjének felvételében is:



Amíg a nyersvas frissülése a frisstűzben a folyamatok egymást követő leolvasztás útján szakaszolódik, addig a kavarókemencében folyamatosan megy végben. A szilícium oxidálódása már a beolvadás folyamán bekövetkezik, és utána a salak oxigén-aktivitása és a kaválás intenzitása függvényében lassabban vagy gyorsabban frissül.



3.12. ábra A kavarókemencében történő acélgyártás folyamatdiagramja

A 3.12. ábra jól szemlélteti, hogy a C-kiégés csak a kísérőelemek oxidálása után lett intenzív. A kavarókemence munkatérét úgy alakították ki, hogy az ajtóból a munkatér minden részét el lehessen érni a kavarórudakkal. A kavarórúd vége általában köríveket írt le a vasolvadékban.

A kavarás nehéz fizikai munka. Ameddig az olvadék C-tartalma még aránylag nagy, addig híg folyós, de a C-tartalom csökkenésével olvadáspontja növekszik, azt a kemencét hőmérséklete már nem képes követni. A kavarás egyre nehezebbé válik, miközben a vas- vagy acélkristályok csomók alakjában kiválnak. A kavarórudakkal a csomókat cipókká tapasztják össze. A cipóknak több neve volt: gomolya, lupa, bocs, vaskenyér. A gomolyák sok salakot is tartalmaztak, ezért a tűzhíd oldalára helyezték őket, hogy ott – a magasabb hőmérséklet hatására – minél több salak folyjon ki belőlük. Kellő idő múltán az izzó gomolyákat egyenként kiemelték a kemencéből, kalapáccsal kiverték belőlük a maradék salakot, és nyújtás folyamán a vas-kristályok összehegedtek (összeforradtak).

A kavaró acélgyártás sokkal termelékenyebb volt, mint a frisstüzi gyártás, emellett a kavartacél minősége is általában jobb és egyenletesebb volt. Megfelelő szerkezeti anyagnak bizonyult a gépgyártás számára.

A frisstüzekben és a kavarókemencékben nyert gomolyákat Henry Cort 1783-ban szabadalmaztatott eljárása szerint kovácsolás és hengerlés kombinációjával is lehetett féltermékké (bugává) vagy rúdvassá alakítani. Eljárásának lényege abban állt, hogy a salaktalanított gomolyákat tömörítő és formát adó kovácsolás után laposvassá, ún. nyerssinné hengerelte. A nyerssínket feldarabolta, majd azokból, egymásra rakva, csomagot, pakettet állított össze: ezt magas hőmérsékleten izzította, majd féltermékké (bugává) vagy rúdvassá hengerelte. A csomag nyerssínjei hengerlés közben összehegedtek (összeforradtak). A kavarókemencés, pakethengerlő üzemek voltak az ún. vasfinomítók.

3.6. Az egylépcsős és kétlépcsős acélgyártás

Noha a bucából kovácsolt vas (acél), valamint a frisstúzi és a kavart gomolyából kovácsolt vas (acél) egyaránt forrasztott acél, gyártástechnológiájuk lényege egymástól eltér. A nyersbucát az ércből egy lépcsőben, a redukcióban nyerik: míg a nyersgomolyát két lépcsőben, redukáló és frissítő folyamatban.

Az egylépcsős eljárást – gyakran – közvetlen vagy direkt acélgyártásnak mondják. A kétlépcsősre – ritkán – közvetett vagy indirekt jelzőt használnak.

Itt kell szólni a modern direktredukcióról. Ennek lényege az, hogy a vasércből vagy vasoxidokat tartalmazó másodlagos nyersanyagokból (pl. salakokból, szállóporokból, vörösiszapokból, piritpörkökből stb.) a ferrumot nem kokszos nagyolvasztóban redukálják ki, ezért a termék nem telítődik C-nal: C-tartalma technológiai módszerekkel szabályozható.

A mai direktredukciós eljárásoknak sokféle változata ismeretes, a választott technológia függ:

- a redukálandó anyag fizikai állapotától: lehet darabos, finomszemcsés, darabosított (pl. pelletezett),
- a redukáló anyagtól: lehet szén, koksz, földgáz, hidrogén,
- a redukáló berendezéstől: lehet aknás kemence, forgó dobkemence, fluidágyas akna,
- a reduktum fizikai állapotától: lehet szilárd vagy olvadék,
- a feldolgozó acélgyártás módszerétől: lehet ívkemence, indukciós kemence, oxigén konverter.

Ha a termék szilárd állapotú, akkor a neve: vasszivacs. Ha a vasszivacsot nyerspelletből nyerik, szokás fémestett pelletnek is nevezni. Maga a redukáló eljárás a vasszivacs-gyártás. A vasszivacs C –tartalma általában kisebb 1 %-nál. Legtöbbször elektrokemencében gyártanak belőle acélt. Oxigén konverterben hűtőfémként hulladék helyett használják.

Ha a termék olvadék állapotú, akkor a C – tartalomtól függően acélfélterméknek vagy nyersvasnak tekintjük. Az eljárás neve: olvadékredukció. Ha a termék nyersvas, az eljárást szokás új nyersvasgyártó módszernek is nevezni. A félterméket elektrokemencében, a nyersvasat oxigén konverterben dolgozzák fel acéllá.

3.7. Az acélgyártás technikai színvonala a fizikai és kémiai tudományos ismeretek tükrében a XIX. század első felében

A kavaróeljárásra alapozva ment végbe Nyugat-Európában az ipari forradalom, s így a technikafejlődésben – mint anyag – a kavartvas és kavartacél játszotta a főszerepet. Ennek ellenére maga a kavaróeljárás technikája már nem illeszkedett sem a vaskohászati vertikumba a nyersvasgyártás és a képlékenyalakítás műszaki színvonalához, sem az emberiség tudományos vívmányaihoz.

A vaskohászati vertikum elején a nagyolvasztókat már koksszal járaták, a légfűvókat gőzgépek hajtották, a levegőt előmelegítették: a vertikum végén gőzkalapácsok és gőzgéppel hajtott hengerek gyártottak sint, idomacélt, lemezt. A közbeni fázis, az acélgyártás technikája viszont legfeljebb annyi fejlődést tudott felmutatni, hogy a kavarást emberi erő helyett gépekkel végeztették, és a kavarókemencébe áramló levegőt előmelegítették. A termelékenység tekintetében azonban így is a vertikum „leggyengébb láncszeme” maradt.

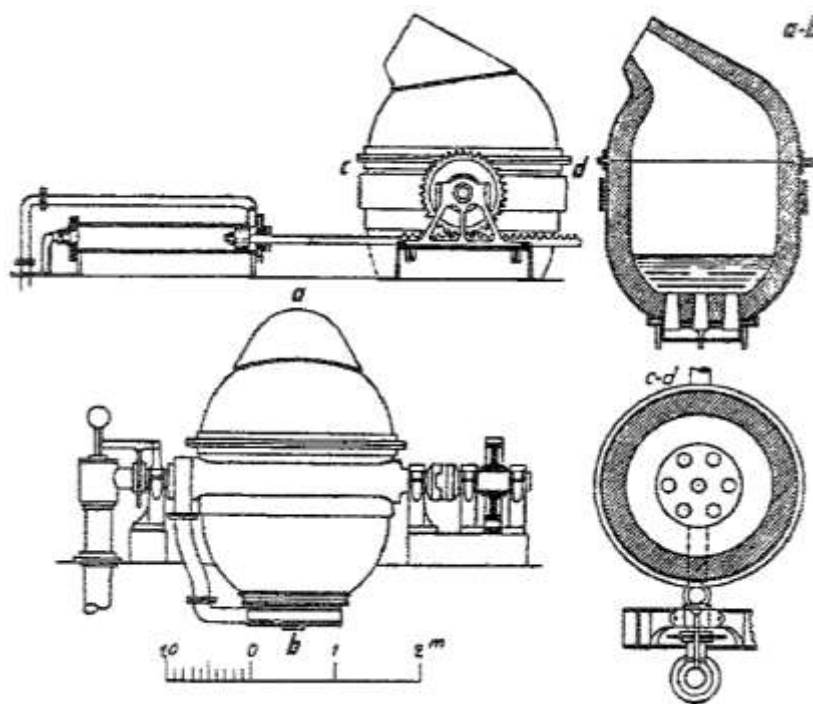
Ha a kavaró acélgyártás technológiai színvonalát összevetjük a tudomány addig elért eredményeivel, akkor érthető az a nyomás, ami a vaskohászati tudományra és gyakorlatra nehezedett az acélgyártás korszerűtlensége miatt, és indokolt az az igyekezet, ami a korszerűsítés irányába megnyilvánult elsősorban Nyugat-Európában. Hiszen akkor már Stephenson mozdonyai 30 éve vontatják a személyvonatokat, gőzhajók szelik a tengereket, gázlámpák világítanak a nagyvárosok utcáin, távíró összeköttetés van Európa fővárosai között, már 20 éve működnek villamos generátorok, kerekcső gőztraktorok járnak a szántóföldeken. 1850-ben már ismeretesek voltak a mechanika, kinematika, áramlástan, termodinamika, energiamegmaradás, villamosságtan és mágnességtan alapvető összefüggései. Fraunhofer már felfedezte a Nap színképében az abszorpciós vonalakat, Fresnel igazolta a fény hullámtermészetét, Fizeau megmérte a fény terjedési sebességét, Doppler megfogalmazta a rezgéstani effektust. Champollion már megfejtette az egyiptomi hieroglifákat, a csillagászok az Uránus változásai alapján kiszámították a Neptunus helyét és meg is találták azt. Hazánkban is örömlen már gőzmalmok, áll a Lánchíd, vasút köti össze Pestet Váccal, gőzhajók közlekednek a Balatonon. Gábor Áron ágyúkat önt Sepsiszentgyörgyön. Az acélgyártók meg szerte a földkerekségen még mindig csak gomolyákat képesek gyártani. Kézenfekvő volt, hogy az acélgyártás csakis úgy léphet előre, ha két lényeges feladatot meg tud oldani, nevezetesen:

1. a nyersvasat folyékony állapotból folyékony állapotú acéllá frissíteni úgy, hogy ne legyen szükség kavarássra
2. az acélt folyékony állapotban csapolni, és tetszés szerinti méretű öntecsekké (tuskókká) kristályosítani, hogy ne legyen szükség a salaktalanító és forrasztó kovácsolásra.

Csak az ipari forradalom végére alakultak ki a várt termelékeny acélgyártó technológiák, ekkor viszont az acélgyártás robbanásszerű fejlődéssel hozta be a nyersvasgyártás és képlékenyalakítás műszaki színvonalához, valamint a társadalom fejlettségéhez képest kétségkívül nagy elmaradást. Az új acélgyártó eljárások ugyanis nemcsak az ipari forradalom szenzációs befejező találmányai voltak, hanem évszázadra kiható tudományos metallurgiai újítások, amelyek elsősorban Henry Bessemer, Gilchrist Thomas és a francia Martin testvérek (Pierre és Emil) nevéhez fűződnek.

3.8. Acélgyártás nyersvasból szélfriessítéses konverterekben

Az acélgyártás forradalmi fejlődését Henry Bessemer angol vaskohász indította el 1855-ben, amikor kvarccal bélelt konverterbe (3.13. ábra) öntött 1200-1250° C-os folyékony nyersvasba levegőt fújtatott. A levegő oxigénjével frissített. A vas kísérői, elsősorban a szilícium oxidációja folyamán keletkező hő elegendő volt ahhoz, hogy a lefúvatott (frissített) vas – a tulajdonképpen acél – 1600 °C-ra melegedjen és folyékony állapotban maradjon. A nyersvasnak e célból elegendő szilíciumot kellett tartalmaznia. Ezt részben az ércminőség célszerű megválasztásával, részben az akkor már hőtechnikailag is megfelelően kézben tartható nagyolvasztó technológiájának szabályozásával sikerült elérni. A folyékony acél a konverterből tetszés szerinti alakú formába (kokillába) volt önthető. Az acél a kokillában dermedt meg (kristályosodott).



3.13. ábra Bessemer konverter

A Bessemer konverter (Bessemer-körte) fenékén légzsák van, amely a tengelyen keresztül menő vezeték útján van összekötve egy fűjtatóval. A légzsákból fűvókákon át áramlik a levegő a körtebe öntött nyersvason keresztül. A levegő oxigénje egy-egy adagot (7-8 tonna nyersvasat) 35-40 perc alatt frissített. Amíg a nagyobb teljesítményű kavarókemencék is naponta csak 10 tonna nyersvasat tudtak acéllá frissíteni, erre a Bessemer-konverterek 1 órán belül képesek voltak.

Megfelelő minőségű bessemeracél azonban csak foszforszegény nyersvasból volt gyártható, mert a savas bélés miatt nem volt lehetséges foszfortalanító bázikus salakot képezni. A nagyobb foszfortartalmú acélok viszont ridegek voltak és törtek. Gilrich Thomas, a jól képzett angol kohász, a Bessemer-körtét bázikus kémhatású dolomittal bélelte (1878-ban), és abban bázikus, mészdús salakkal kitűnően tudott foszfortalanítani. Eljárása gyorsan terjedt, elsősorban a lotharingiai foszforos ércek nagy foszfortartalmú nyersvasainak frissítésére. A Thomas-konverterekben a foszfor oxidációjával termelt hő a legfőbb hőforrás.

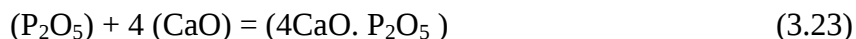
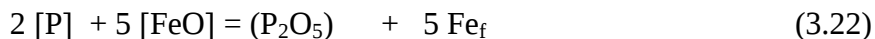
A konverteres frissítésben – eltérően a frisstüzi és kavaró eljárástól – nem a salakban oldott Fe_3O_4 , hanem a fémbe oldott FeO játssza a főszerepet. A klasszikus elmélet szerint: a folyékony vasba befűvott levegő oxigénjével keletkező Fe_3O_4 nyomban (in statu nascendi) átalakul FeO -dá:



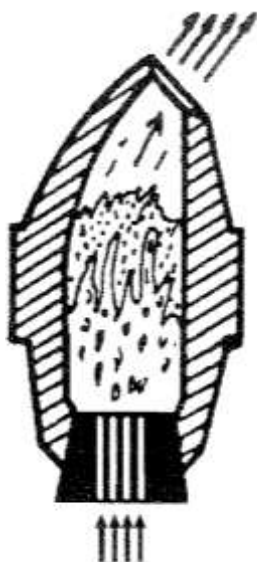
A FeO viszont oldódik a vasban:



A folyékony vasban oldott FeO oxidálja a vasban oldott elemeket:



A C –oxidáció – (3.21) reakció – jellemzője, hogy ennek során gáz alakú reakciótermékek, CO is keletkezik; feltéve, hogy megvan a CO-buborékok létrejöttének fizikai–kémiai feltétele. A feltétel: a fémolvadékban idegen fázis, szilárd vagy folyékony anyag, ill. gázbuborék jelenléte. Energetikai okokból eredően ugyanis a fémolvadékban CO-buborék csak idegen fázis felületén alakulhat ki. A szélfrissítéses technológiában ilyen felület szinte korlátlanul adott: részben a befúvott levegő buborékjaiban, részben a salakkal és a konverterfallal való intenzív érintkezés révén (3.14. ábra).



3.14. ábra Bessemer – és Thomas-konverter fúvatás közben

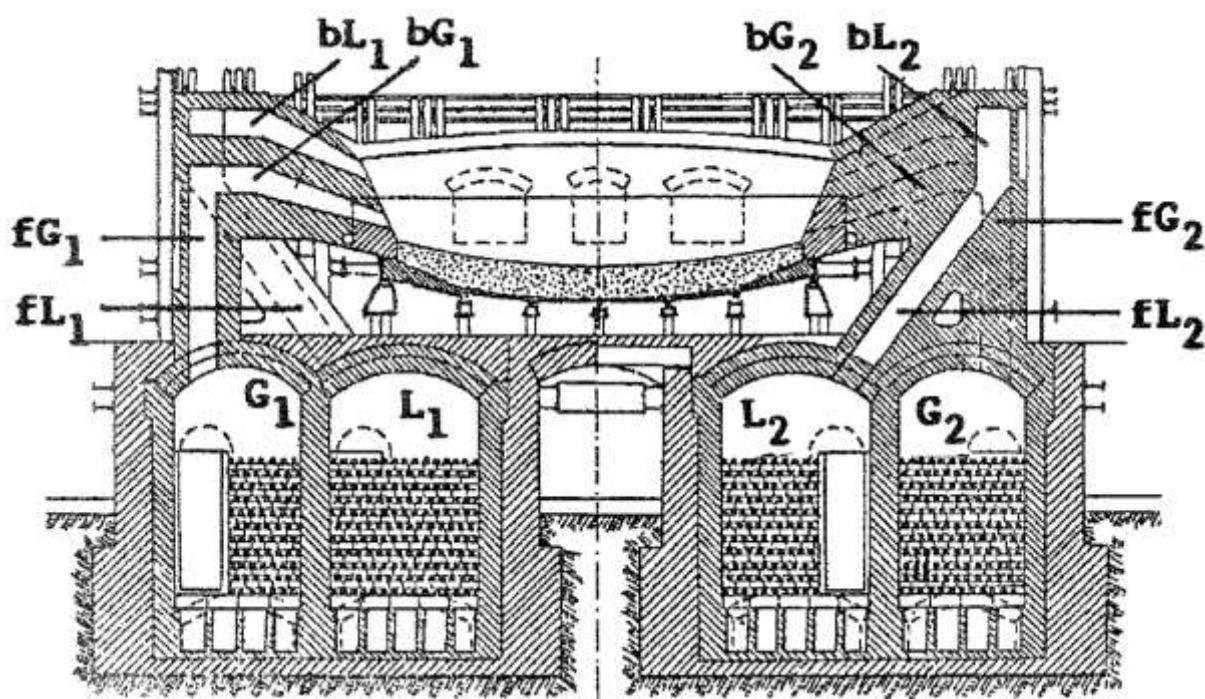
A szélfrissítéses acélgyártás – nagy termelékenységének köszönhetően – a századfordulóig (1900-1910-ig) az acélgyártás uralkodó technológiája volt, de a fejlődés törvényszerűségének érvényesülése folytán át kellett adnia a helyét a Martin –eljárásnak.

3.9. Acélgyártás nyersvasból és acélhulladékból Siemens- Martin- kemencékben

Az 1850- es évek közepén a kavaró lángkemence levegőellátásában korszakalkotó változást vezettek be a francia Martin testvérek. A Siemens-féle regeneratív előmelegítővel a láng és a

füstgáz hőmérsékletét olyan nagyra tudták növelni, hogy nemcsak a nyersvas, hanem a lefrisült acél is folyékony maradt: csapolható volt.

A Siemens testvérek regeneratív tüzelési rendszerének lényeges berendezése két – tűzálló falazatú – kamra. Mindkettőben tűzálló téglából épített rácsozat van. A kamrákon keresztül felváltva vezetik el a füstgázt, ill. vezetik be az égéshez szükséges levegőt. A füstgázból a rácsozat átveszi az érzékelhető hő jelentős részét, s amikor a levegőt vezetik át rajta, akkor a hő nagy részét a levegő veszi fel, s néhány száz fokra felmelegszik. A melegebb levegő magasabb égési hőmérsékletet eredményezett. A Siemens - kemencéhez a Martin testvérek dolgoztak ki acélgyártó technológiát. A kemence neve ezért Siemens-Martin kemence, az acélgyártó eljárásé martinacélgyártás, a termék martinacél.



3.15. ábra Siemens-Martin kemence gáz- és levegőkamrákkal

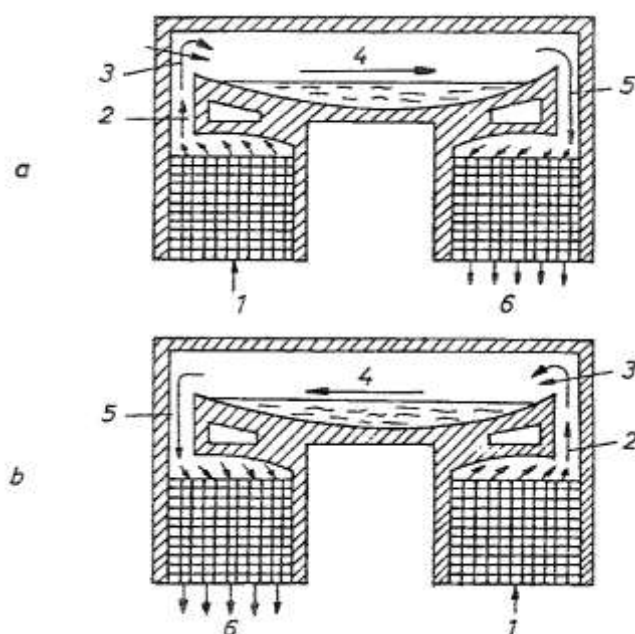
$G_{1,2}$ - gázkamra, $L_{1,2}$ - levegőkamra,
 $fG_{1,2}$ - gázfelszálló-akna, a gázkamrát és a tűzfejet köti össze,
 $fL_{1,2}$ - levegőfelszálló-akna, a levegőkamrát és a tűzfejet köti össze,
 $bG_{1,2}$ - gázbeömlő csatorna a tűzfejben, $bL_{1,2}$ - levegő beömlő csatorna a tűzfejben

A 3.15. ábra Siemens-Martin –kemence vázlata. A kemencét kezdetben nagyolvasztói torokgázzal, később torokgáz és generátorgáz keverékével, majd egyedül generátorgázzal fűtötték. A levegőt és gázt egyaránt előmelegítették. A tüzelés elve a periódikusan váltogató irányú tüzelés.

Így, az első periódus folyamán – az előző periódusban felmelegített – G_1 és L_1 jelű gáz- ill. levegő kamrán, az fG_1 és fL_1 felszálló csatornákon keresztül a bG_1 és bL_1 égőnyílásokon beömlő és itt keveredő gáz és levegő reakciójában keletkező láng és füstgáz a medencében nyugvó betétnek és a medencefalazatnak áramlás és sugárzás útján a hő nagy részét átadja. Majd a bG_2 és $bL_2 \rightarrow fG_2$ és $fL_2 \rightarrow G_2$ és L_2 úton a magával vitt érzékelhető hő egy részét a

falazatnak és a rácsozatnak leadva távozik a kemencéből. Ez a periódus meghatározott időtartamú vagy a beáramló levegőkamra (L_1) lehűlésének megengedhető hőmérsékletéig tart. Ekkor váltószelepek működtetésével a fűtés iránya megváltozik; következik a második periódus. A folyamat most az első periódus fordítottja.

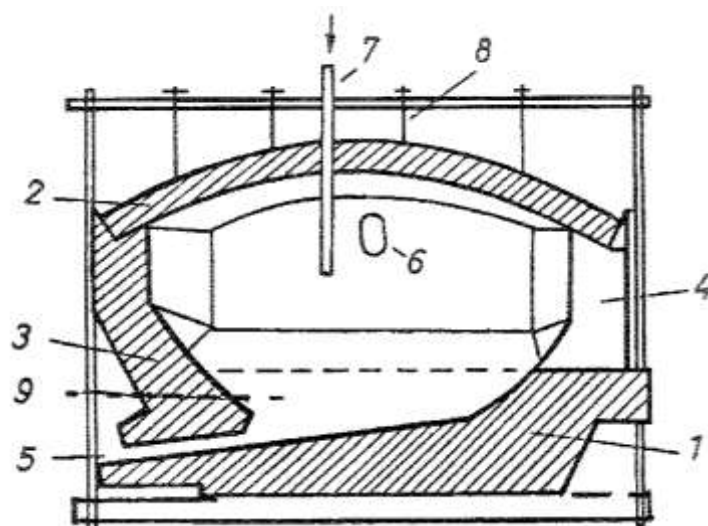
A Siemens- Martin – kemence az immár közel másfél évszázados története során lényeges műszaki fejlesztéseket élt meg. A termelékenység növelése és a termelési költségek csökkentése elsősorban a kemencetest befogadóképességének növelését és a tüzelés hatékonyságának fokozását követelte. A kezdeti 10-15 tonna befogadóképesség fokozatosan 50-60, majd 100-200, végül 500, sőt 900 tonnára növekedett. A tüzelés hatékonyságát kalóriadúsabb tüzelőanyagok felhasználásával és elégetésükhöz fokozatosan javított szerkezetű tűzfejek és égők kialakításával javították. Az 1930-as évektől a generátorgázhoz a tűzfejbe olajat vagy vízmentes kátrányt injektáltak, majd a generátorgázt teljesen kiváltották tisztán olaj, tisztán földgáz, ill. olaj és földgáz vegyes tüzeléssel. Olaj- és földgáztüzelés esetén a kemenceszerkezet egyszerűsödik, mert csak a levegőt kell előmelegíteni (3.16. ábra).



3.16. ábra Olajjal vagy földgázzal fűtött Siemens-Martin kemence fűtésének elve

Az utóbbi évtizedekben a lánghőmérséklet növelése és a metallurgiai folyamatokban keletkező CO-gáz elégetése céljából közvetlenül a tűzfejbe vagy boltozaton át benyúló lándzsával a kemencetérbe oxigént fúvatnak. A frissítés sebességét is fokozzák oxigénnel a fürdőbe merített oxigénlándzsa alkalmazásával.

A 3.15. és a 3.16. ábrák a kemenceszerkezet hosszmetSZete. A 3.17. ábrán a kemencetest keresztmetSZetét látjuk az elégetés hatékonyságát növelő boltozati oxigénlándzsával.



3.17. ábra Siemens-Martin kemence keresztmetszete

1- kemencefenék, 2- boltozat, 3- hátsófal, 4- adagoló ajtó, 5- csapolónyílás, 6- földgáz vagy olajégő, 7- oxigénlándzsa, 8- boltozatfelfüggesztők, 9- fémfürdő, felette salak

Az olaj, földgáz és oxigén intenzív felhasználása a Siemens - Martin - kemence technikai kezei között igen nagy hatékonyságot eredményezett, de egyidejűleg szerkezeti tűzállóanyagaival szemben megnövekedtek a követelmények és ezek kielégítésének költségei olyannyira, hogy az oxigénes konverterek megjelenése után az 1960-as évektől már nem volt versenyképes.

A hagyományos martinacélgyártás alapvető technológiai folyamatai:

- folyékony vagy szilárd állapotú nyersvas, majd acélhulladék (ócskavas) és salakképző (pl. mész, mészke) adagolása
- beolvasztás
- a fémolvadék frissítése vasoxid-dús salakkal
- elődezoxidálás
- csapolás
- dezoxidálás üstben.

A frissítés – a nagyobb hőmérséklet folytán – a kavarókemencében történő salakos frissítéstől eltérően játszódik le. A salakban oldott FeO egy része szabad (vegyületben nem kötött) állapotban van jelen és ebből, a hőmérséklet függvényében több- kevesebb képes a vasolvadékba (fémfürdőbe) átmenni; a szabad FeO megoszlik a salak és a fém között.

A reakció főleg a kemencefenéken és oldalfalakon játszódik le, mert ezek a helyek kedveznek a CO-buborékok létrejöttének. A felszálló buborékok jól átkavarják a fémeket és a salakot, hasonlóan a forrásban levő víz gőzbuborékaihoz. Erről a jelenségről kapta a karbonoxidáció a „főzés” elnevezést is.

A frissítés befejeztével a vasban sok oldott oxigén, FeO marad. Több mint amennyi a kész-acélban megengedhető. A többletet el kell belőle távolítani. Ez a folyamat a dezoxidáció, az oxigénelvonás, és ez olyan elemek adagolásával lehetséges, amelyeknek az oxigénhez való

vegyrokonsága nagyobb, mint a ferrumé, és oxidterméke nem oldódik a vasolvadéokban. Ilyenek leggyakrabban elődezoxidálás céljára a Mn, végdezoxidálásra a Si és az Al.

A kén FeS alakban jól oldódik a folyékony vasban. Csak kis része oxidálható ki, ezért a kén-telenítés általában CaO-dal, cserebomlás útján történik:



A martinacélgyártás nem volt igényes a nyersvas összetételével szemben, mert a kemence bélése lehetett savas kémhatású kvarc vagy bázikus kémhatású dolomit, ahogy ezt a frissítő-finomító savanyú, ill. bázikus salak megkívánta. A kemencében nemcsak szilárd nyersvas, hanem magasabb olvadáspontú acélhulladék és ócskavas is megömleszthető volt, s így megnyitotta a használt acél és hulladék újrahasznosításának műszaki-technológiai útját.

A martinacélgyártás – a több órás adagidő miatt – nem volt olyan termelékeny, mint a szélfrissítéssel konverteres acélgyártás, mert a nyersvas a frissítő oxigént a salak közvetítésével kapta. A salak viszont részben az oxidáló hatású füstgázból, részben a ráadagolt vasércből vette fel az oxigént. Bázikus bélésű kemencében mészdús salakkal hatékonyan lehetett foszfortalanítani és kén-teleníteni. Savanyú bélésű kemencében foszfor- és kénszegény nyersvas felett képzett SiO₂-dús salakkal kitűnő képlékenységgel rendelkező, dinamikus igénybevételnek jól ellenálló acél volt gyártható.

A Siemens-Martin kemencékben gyártott acél mennyisége hamarosan elérte, majd többszörösen meg is haladta a szélfrissítéssel konverteres acélok mennyiségét (3.1. ábra), s noha az ezredfordulóhoz közeledve a martinacélgyártást felváltotta az oxigénes konverteres és elektrokemencés acélgyártás, a technikátörténet bizonyítja, hogy az SM-kemencék és a martinacélgyártás nélkül az egyetemes társadalom nem tarthatna a mai fejlettség szintjén.

A XX. század első felében a fejlődés felgyorsulásához a nyersvas az anyagi (materiális) alapot, a martinélgártás a technológiát adta.

A dicsőségben egyaránt osztozkodhatnak a Siemens testvérek és a Martin testvérek. Siemensék a gáztüzelésű regeneratív kemence konstrukciójának megalkotásával (1856), Martinék a metallurgiai ismeretekre és gyakorlati tapasztalataikra alapozott és szívós kitartásukkal kidolgozott technológiával (1864). Pierre Martin a technológiáért 1867-ben a Párizsi Világkiállításon elnyerte a Nagydíjat és az Arany emlékérmét.

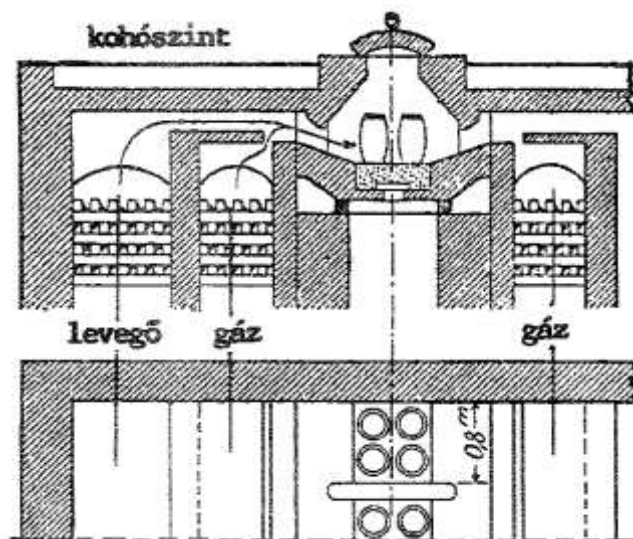
3.10. Acélgyártás tégelyben és elektrokemencében

3.10.1. Tégelyacélgyártás

Nyersvas és acél összeolvasztásával lehetséges acélgyártás kívülről fűtött kerámiatégelyekben időrendben megelőzte a kavaró acélgyártás feltalálását. Gyakorlati alkalmazása azonban csak szűk körre, nagyon kényes szerkezeti elemek és szerszámok acéljainak gyártására terjedt ki.

A tégelyacélgyártást 1740-ben Benjamin Huntsman angol órásmester találta fel. Ez volt az első acélfinomító eljárás. Angliában már a XVIII. században elterjedt, és az angol szerszám-acéloknak nagy hírnevet szerzett.

A főleg tűzálló agyagból és őrölt grafitból formázott, hónapokig tartó szárítás után kiégetett tégelyekben a betét kiváló minőségű faszenes nyersvasból és frisstűzön frissített acélféltérmékből állt. Ebben kevés volt a foszfor, a kén és az oxigén. Az acél C –tartalmát a betétarány-nyal pontosan be tudták állítani és a szükséges ötvözőelemekkel (Ni, Cr, W, Mo, V, Co) ötvözni is. A tégelyacélgyártással kezdődött meg az ötvözt acélok és nemesacélok (pl. szerszámacélok és gyorsacélok) gyártása. A tégelyeket faszen-, később kokszfűtésű, levegőfűjtású kemencében, a regeneratív tüzelés feltalálása után Siemens-rendszerű lángkemencében (3.18.ábra) izzították, s bennük a betét hígfolyóssá olvadt. Eközben a tégelyeket lezárva tartották, ezért külső szennyező anyag *nem juthatott az acélba*.



3.18. ábra Kohószint alá épített tégelyizzító kemence

Egy-egy tégelyben 10...40 kg acélt olvasztottak, egy-egy kemencében 15....50 tégelyt izzítottak; az adagidő 4-5 óra volt.

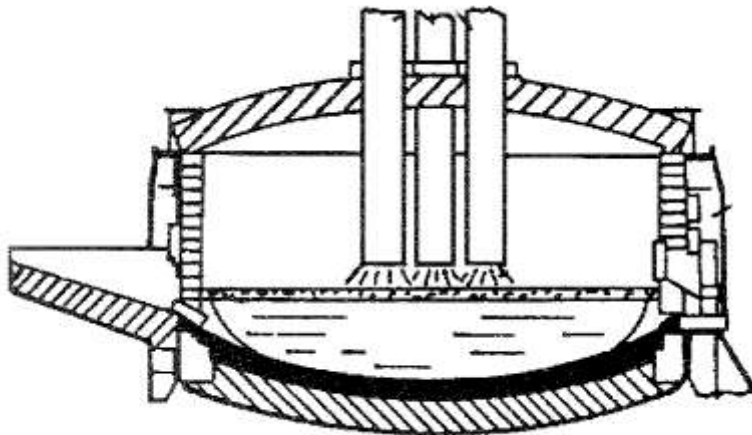
A tégelyacélgyártást a XX. század elején – a tégelyek viszonylag magas ára és kis tartóssága miatt – az elektroacélgyártás fokozatosan háttérbe szorította.

3.10.2. Acélgyártás elektrokemencében (ld.bővebben az Elektroacélgyártás jegyzetben)

A századforduló éveiben a villamosipar ösztönözte az elektroacélgyártás kifejlesztését. A gyakorlati megoldás Emilio Stassano nevéhez fűződik, ő 1898-ban villamos aknáskemencében gyártott először acélt. 1900-ban szabadalmaztatta Héroult azt az ívkemen-

cét, amely előnyös tulajdonságai révén gyorsan elterjedt. Az első indukciós kemencét Kjellin építette Svédországban 1900-ban.

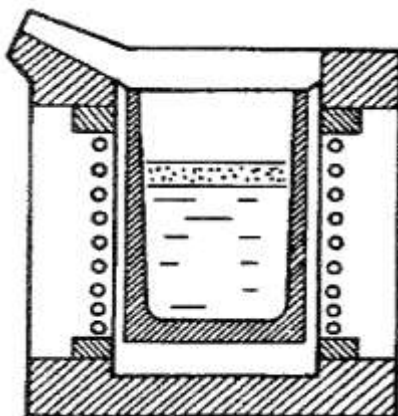
A villamos kemencék villamos ívvel vagy indukciós örvényárammal szolgáltatják a betét számára szükséges energiát (a 3.19. ábra egy háromfázisú ívkemence vázlata).



3.19.ábra Háromfázisú ívkemence.

Az ív árama a fémfördőn keresztül záródik, így azt közvetlenül is melegíti. A kemencék három elektróddal, elektródonként egy-egy fázissal dolgoznak. Az ívkemencékben ötvözött acélokat és nemesacélokat is gyártanak, ezért oxidáló és redukáló salakkal dolgoznak. Minthogy salakcserére is szükség van, a salak könnyebb eltávolítása érdekében a kemencék billenthetők.

Az indukciós kemencében (3.20. ábra) a primer tekercs árama a rövidrezárt szekunder tekercs szerepét játszó fémbetétben örvényáramot hoz létre, és ennek Joule-hője felmelegíti és megolvasztja a betétet.

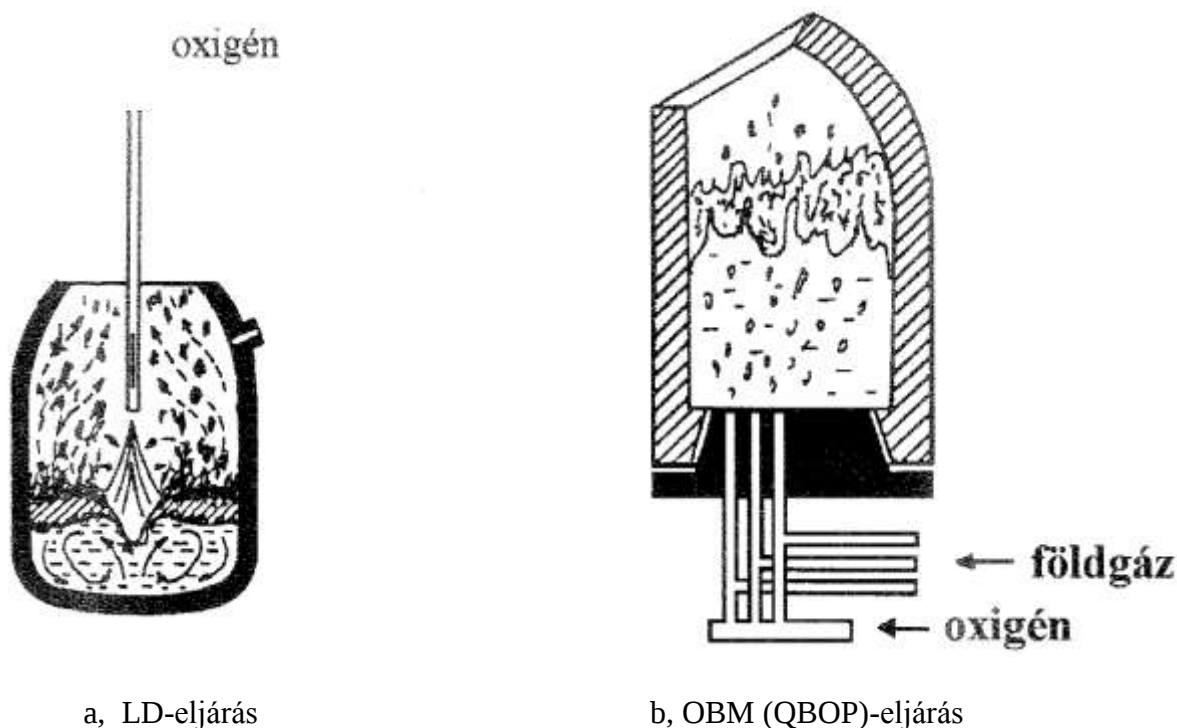


3.20.ábra Indukciós kemence

3.11. Acélgyártás oxigénos konverterben

(ld.bővebben e jegyzet későbbi fejezeteiben)

A Bessemer- és Thomas-féle konverterek technológiájából fejlődött ki az oxigénes konverteres acélgyártás. A lényegi különbség, hogy itt levegő helyett gáz alakú oxigént fúvatnak a folyékony nyersvasba. Felülről fúvat az LD-eljárás (3.21.a ábra), alulról az OBM (Q-BOP)-eljárás (3.21.b. ábra). Dolgoznak kombinált – egyidejűleg alulról és felülről fúvató – konverterek is.



3.21.a-b ábra Felső ill. alsó fúvatásos oxigénes konverterezés

Az oxigénes konverteres eljárások nem igényelnek sem szilíciumdús, sem foszfordús nyersvasat, mert a tiszta oxigénnel lejátszódó reakciók hőjéből a rendszerben több marad, mint a levegővel fúvató konverterben, amikor is a hő jelentős hányadát a nitrogén magával vitte.

Az LD-konverterbe vízhűtésű lándzsával fúvatják be az oxigént és gyakran a salakképző mészpórt is. Az OBM- (Amerikában Q-BOP) konverterbe fenékfúvókákon keresztül jut be az oxigén. Az oxidációval járó hő azonban a fúvóka beömlő nyílása körül rövid időn belül tönkretenné a tűzálló falazatot, emiatt hűtésről is gondoskodni kell. Ezt úgy oldják meg, hogy egyidejűleg endoterm kémiai folyamatokat is létrehoznak. Földgáz vagy olaj befúvásával a szénhidrogének bomlási hőigénye, H_2O vagy CO_2 befúvásával a disszociáció hőigénye vonja el az oxidációs hő egy részét.

A frissítés fizikai és kémiai folyamatainak lényege megegyezik a szélfrissítési eljárásokéval.

3.12. Acélgyártás direktredukciós termékekből

A bucakemencék felső felében és a nagyolvasztók aknájának felsőbb zónáiban az érc vas-oxidjait a felszálló CO-gázok redukálják. A reduktum vasszivacs, közbelső termék, amely a bucakemencék alsó felében acélmasszává lágyul, a nagyolvasztó medencéjében C-felvétel után nyersvassá olvad. Ha a vasszivacsot a bucakemencéből vagy nagyolvasztóból kiemelték

volna, darabos meddővel kevert vashordozó anyagot nyertek volna, amelyben a ferrum 85-90 % -a fémesen, a többi hányada vas-oxid alakban van jelen. Ezt megolvasztva vasolvadék és felette a meddőből és vas-oxidból álló salakolvadék keletkeznék.

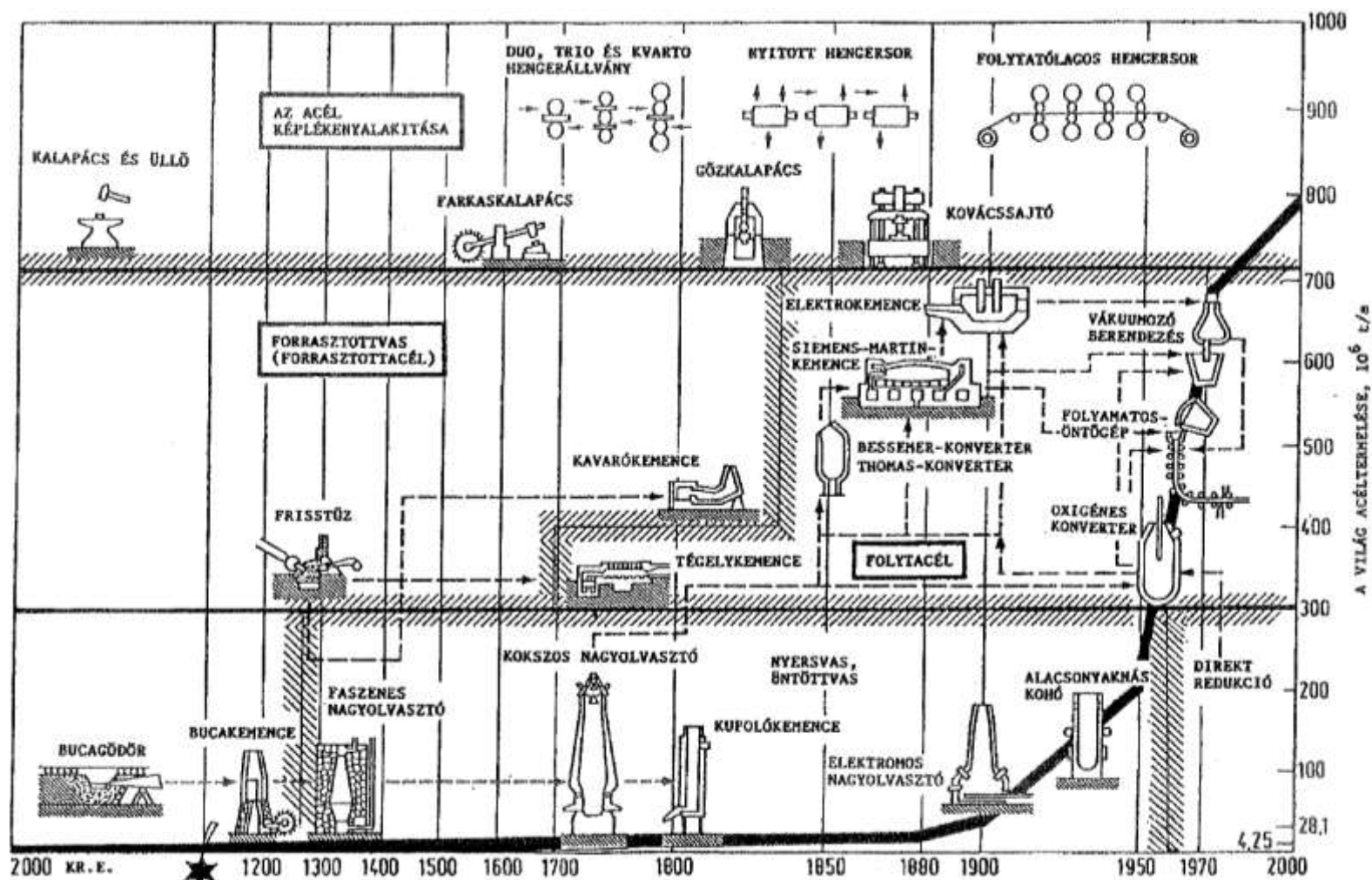
A fenti feltételezés a modern vaskohászati technológiákban megvalósult: ez a vasszivacs gyártás. Vasdús, kevés meddőt tartalmazó darabos ércből vagy darabosított érc-koncentrátumból korszerű berendezésekben (pl. aknás kemencékben, forgó dobkemencékben, redukáló kamrákban) kiváló minőségű vasszivacsot redukálnak, s ez az elektrokemencék kedvelt betétanyaga. A vasszivacsot szokásos direktredukciós terméknek, magát a gyártási eljárást direktredukciónak nevezni. A „direktredukció” fogalomkörbe azonban nemcsak vasszivacs-gyártás tartozik. A gyakorlat ugyanis a vasércből vagy vas-oxidokat tartalmazó anyagokból ferrumot kiredukáló technológiáknak több változatát különböztetik meg:

- A vaskohászati gyakorlat és tudomány ez idő szerint a koksos nagyolvasztós nyersvasgyártáson kívül minden más vasredukáló technológiát direktredukciós eljárásnak tekint, függetlenül attól, hogy milyen halmazállapotú a kiinduló érc vagy vashordozó anyag, milyen a folyamatok sorrendisége és milyen halmazállapotú, mekkora C-tartalmú a kinyert vas.
- Nemcsak a koksos nagyolvasztó terméke nevezhető nyersvasnak, hanem minden folyékony halmazállapotú 2-3 % C-tartalmú direktredukciós termék, amelynek C-tartalmát az acélgyártás során csökkenteni kell (azaz frissítéssel dolgozható fel acéllá); ha a C-tartalom viszonylag kicsi (< 2 %), akkor acélféltérterméknek is nevezhető.
- Noha az „olvadékredukció” elnevezés magyar értelmezése szerint elsősorban a folyamat mechanizmusára utal, nem arra, hogy a végtermék folyékony, a hazai és nemzetközi gyakorlatban ez az elnevezés (Schmelzreduction, smelting reduction) terjedt el azokra a technológiákra is, amelynek első lépcsőjében a redukció kisebb hányada szilárd állapotban játszódik le, de olvadék állapotban fejeződik be.

3.13. Az acélgyártás és a kapcsolódó technológiai fázisok történetének időrendi áttekintése

A 3.22. ábra több forrás felhasználásával készült, azok részbeni átalakításával és kiegészítésével. Az ábrát két vízszintes vonal három részre osztja. Az alsó harmad a ferrum ércből történő kinyerésének technológiáit vázolja fel fejlődésük időrendi sorrendjében; a középső harmad az acélgyártásé; a felső az acélt feldolgozó, képlékenyalakító technológiáké. Az alsó harmadból két függőleges baloldaltól a bucagödröt és a bucakemencét az acélgyártás harmadába emeli, mint ősi direktredukciós eljárást; a jobb szélén a modern direktredukciós eljárások vannak elkülönítve.

A középső harmadban egy megtört függőleges elválasztja egymástól a forrasztott- ill. folytacélt termelő technológiákat. A vastag diagramvonal a világ évenkénti acéltermelésének idealizált görbéje. Figyelemre méltó, hogy az évenkénti termelés tömege 1950-ben (60 évvel ezelőtt, a II.vh után) még csak 200 millió tonna volt, az ezredfordulón már 800 millió tonna, ma -2013-ban- pedig eléri a 1.5 milliárdnyi tonnát.



3.22. ábra Az acélgártás és a képlékenyalakítás technológiájának, ill. a világ acéltermelésének fejlődése

4. ACÉLGYÁRTÁS OXIGÉNES KONVERTERBEN

(a BOS acélgyártás szimulációja [7])

A www.steeluniversity.org honlapon az oxigén konverteres acélgyártás tananyaga az alábbi fejezeteket öleli fel (dőlt betűkkel az eredeti angol szöveg, alatta magyarul a fordítás):

1.	<i>Basic Oxygen Steelmaking: Introduction</i>	Bázikus oxigén acélgyártás (BOS) - Bevezetés
2.	<i>Critical Operations of BOS</i>	BOS kritikus műveletei
3.	<i>History of Steelmaking</i>	Az acélgyártás története
4.	<i>Thermodynamics of Steelmaking</i>	Az acélgyártás termodinamikája
5.	<i>Phase Diagram of Refining Slags</i>	A kikészítő salakok fázisdiagramja
6.	<i>Description of the Vessel</i>	A konverter leírás
7.	<i>Inputs, Additions and Outputs</i>	Beviendő anyagok, adalékok és termékek
8.	<i>Sequence of Operations</i>	Műveleti sorrend
9.	<i>Chemical Reactions</i>	Kémiai reakciók
10.	<i>Mass and Heat Balance</i>	Tömeg és hőmérleg
11.	<i>End-Point Control</i>	Végpontszabályozás
12.	<i>Nozzle Design for Top-Blown Converters</i>	Fúvóka kialakítás felsőfúvású konverterekre
13.	<i>Tuyere Design for Bottom-Blown Converters</i>	Fúvóka kialakítás fenékfúvású konverterekre
14.	<i>Process Control Parameters, Systems and Models</i>	Folyamatszabályozó paraméterek, rendszerek és modellek
15.	<i>Bottom Stirring with Nitrogen and Argon</i>	Fenékkeverés nitrogénnel és argonnal
16.	<i>Slag/Metal Reactions</i>	Salak/fém reakciók
17.	<i>Slag Formation and Constitution</i>	Salakkialakítás és összetétel
18.	<i>Changes in Metal Composition</i>	Változás a fém összetételében
19.	<i>Dephosphorization in the BOP I</i>	Foszfortalánítás I. a konverterben
20.	<i>Dephosphorization in the BOP II</i>	Foszfortalánítás II. a konverterben
21.	<i>Refractory Materials</i>	Tűzállóanyagok
22.	<i>Lining Protection Techniques</i>	Bélést védő technikák
23.	<i>Tapping</i>	Csapolás
24.	<i>Exhaust Gas and Fume Treatment</i>	Füstgáz és füstkezelés
25.	<i>Slag Treatment</i>	Salakkezelés

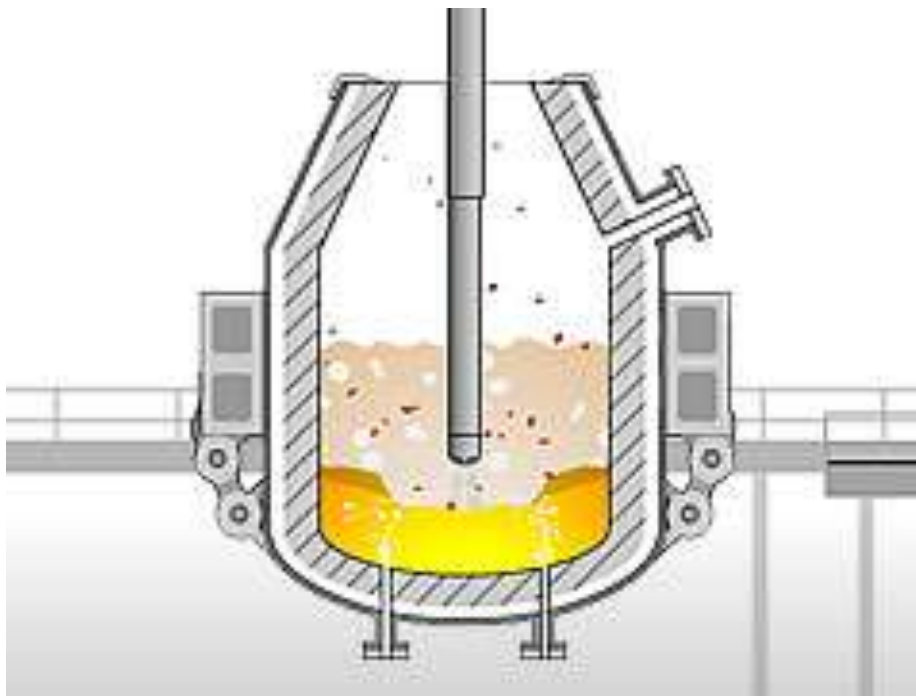
E fejezetek áttekintő jelleggel elemzik a vonatkozó tananyagrészeket azért, hogy a virtuális acélgyártás (szimuláció) előtt elméleti-gyakorlati szempontból a szimulációt végző személy képben legyen. Ennél sokkal részletesebb elemzés szerepel a Károly Gyula – Józsa Róbert: **Konverteres acélgyártás** c. jegyzetben [8], ezért javasolandó szimulációt megelőzően ennek a tananyagnak az elsajátítása, s azon videórészek megtekintése, mely e jegyzet számára készültek a konverteres acélgyártás megértése céljából (a [8] jegyzet forrásként a steeluniversity itt felsorolt 25 pontjában foglaltakat is figyelembevette, felhasználta, ettől függetlenül a steeluniversity ezen 25 pontja is elemezhető, animációi-videói segédeszközként hasznosíthatóak). Ezek előrebocsajtása után szerepeltetjük az oxigén konverteres acélgyártás szimulációjára vonatkozó anyagrész lényegi részeit magyarra fordítva.

A **konverteres acélgyártás szimulációja** egy dokumentum felhasználó-útmutatónak készült dokumentum, ami a http://www.steeluniversity.org/Steel_Processing/Basic_Oxygen_Steelmaking-on található. Ezt az interaktív szimulációt a tananyag szerzői [7] **oktatási és**

gyakorlási eszköznek készítették mind az acélmetsallurgia hallgatói, mind az acélipar alkalmazottai számára.

4.1. Bevezetés a bázikus oxigénes acélgyártásba

A bázikus oxigénes acélgyártás (BOS) (4.1. ábra)



4.1. ábra Acélgyártás bázikus oxigénes konverterben

a legelterjedtebben alkalmazott eljárás nyersacélnak folyékony nyersvasból (folyékony fém) történő előállítására [9-10]. Az eljárás során a folyékony fém karbontartalma az oxigénnek a folyékony fémbe történő befúvása révén – oxidáció útján – csökken. E célra több különböző típusú kemence szolgál, ezeket konvertereknek is hívják, mivel a folyékony fém acéllá konvertálásához használják, ezek az ún. felső fúvatású, fenékfúvatású avagy kombinált fúvatású konverterek.

A függőleges lándzsán keresztüli felső fúvatást 1952-53-ban találták fel Ausztriában Linzben és Donawitzben, innen eredően az eljárás LD (Linz -Donawitz) vagy BOS (Bázikus oxigénes eljárás) néven ismert. A fenékfúvatású eljárások az oxigénen kívül szénhidrogén gázt (propán vagy földgáz), vagy tüzelő olaj-szénhidrogént használnak, amelyek a fúvókazónában hűtik a tűzálló bélést. A megfelelő eljárásokat OBM-nek (Oxygen Bottom-blowing Maxhütte), Q-BOP-nak (Quick Basic Oxygen Process) és LWS-nek (Loire-Wendel.Sidelor) hívják. Egyik előnyük az igen hatékony fém-salak keverés az oxigén fúvatás hatására.

Az 1970-es évek végén kifejlesztett kombinált fúvatás a legutóbbi fejlesztés. Semleges(öblítő) gáznak (argon vagy nitrogén), valamint oxigénnek a konverter fenékén való korlátozott befúvatása hatékony keverést biztosít. A megfelelő eljárások LBE (Lance Bubbling Equilibrium), LET (Lance Equilibrium Tuyeres), K-BOP (Kawasaki Basic Oxygen Process), K-OBM (Kawasaki Oxygen Bottom-blowing Maxhütte) stb. néven ismertek és most ezek a legjobban elterjedt felsőfúvatású konverter-fajták.

A folyékony nyersvas kéntelenítését általában a folyékony fém konverterbe adagolás előtt hajtják végre. Különböző folyósítókat használnak a különböző kéntartalmaknál, például égetett meszet, kalciumkarbidot és magnéziumot.

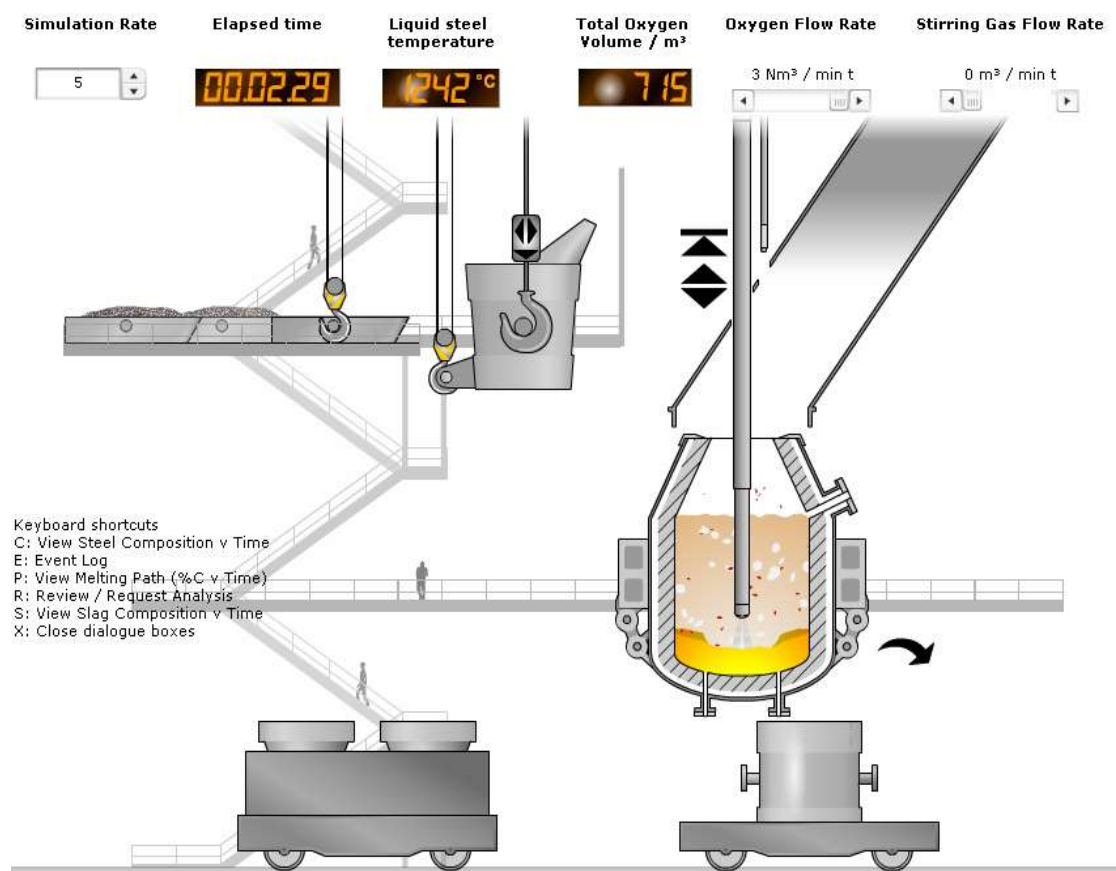
A folyékony fém foszfortalanítását Japánban fejlesztették ki az 1980-as évek elején. Ebben az előkezelő műveletben a folyékony nyersvas P-tartalmának nagyobb részét távolítják el oxidáló folyósítókkal (égetett mész és vasérc keveréke) a folyékony fémrel teli üstben a konverterbe adagolás előtt. Ez a kezelést eddig egyáltalán nem alkalmazták Japánon kívül.

4.2. Szimulációs célok

Ennek a szimulációnak az a célja, hogy gondoskodj a bázikus oxigén konverterről (BOK), kezeld a folyékony nyersvasat a szükséges adalékokkal és fúvass be oxigént, valamint csapold le az adagot az üstbe az **előírt időben, összetétellel és hőmérsékleten**.

Célul kell kitűznöd a **költség minimalizálását** az egész műveletre vonatkozóan.

4.3. Üzem alaprajz és leírás



4.2. ábra Az oxigén konverteres acélgyártás szimulációjához használt elrendezés
(www.steeluniversity.org / Steel Processing/Basic Oxygen Steelmaking 4-1.ábra)

Az üzem a szimulációban a 4.2. ábrán látható elrendezésű. A szimuláció kezdetén egy animáció mutatja azt, hogy hogyan adagolják a konverterbe először a hulladék fém és adalékokat, például az égetett meszet és dolomitot (a felhasználó megválasztása szerint). A

szilárdanyagok bevitele után a folyékony nyersvasat öntik be a konverterbe a szállító üstből. A szimuláció összegező ernyővel fejeződik be akkor, amikor az acélt az üstbe csapolták.

4.4. Szimulációs lehetőségek

4.4.1. Használoi szintek

A szimulációt két különböző felhasználói csoport alkalmazására fejlesztették ki:

- Metallurgiai, anyagtudományi és más mérnöki diszciplínák
- Acélipari művek technikusai szintje

4.4.1.1 Egyetemi hallgatói szint

Ezen a szinten az az elvárás, hogy a problémát tudományosan közelítsd meg, a releváns termodinamikai és kinetikai elméletek felhasználásával annak érdekében, hogy döntéseket hozz a különböző műveleti lehetőségekkel kapcsolatban. Például a használonak el kell végeznie egy teljes hő és tömegmérleg-számítást annak érdekében, hogy meghatározza a hulladék és a salak adalékok mennyiségét és a szükséges összes oxigén térfogatát.

Ezen a szinten láthatóvá válnak a használó számára a meg nem olvadt szilárd anyagok, pl. a hulladék és a vasérc.

4.4.1.2 Acélipari technikus szint

Ezen a szinten is elvárják a használotól a probléma tudományos megközelítését. Azonban a használonak korlátozott számú célt kell befejeznie a szimulációban. Például a meg nem olvadt szilárd anyag nem válik láthatóvá ezen a szinten.

4.4.2. Szimuláció sebesség

A szimulációt x1 és x32 közti különböző sebességgel lehet lefuttatni. A sebességet bármikor meg lehet változtatni a szimuláció során. Azonban akkor, amikor fontos esemény következik be, a szimuláció automatikusan csökken le x1-szintre.

4.4.3. Megcélzott acélfajta

A szimuláció számos különböző acélfajtát tartalmaz a különböző műveleti lehetőségek bemutatására.

Az általános rendeltetésű **szerkezeti acél (Szerkezeti acél)** viszonylag igénytelen fajta, amely minimális kezelést igényel és ezért **kezdő használonak** ajánlott. Fő feladatod annak biztosítása, hogy a karbon 0,1 és 0,16% között álljon be.

A **TiNb igen kis karbontartalmú acél (TiNb ULC acél)**, gépkocsi karosszéria-elemekre, 0,01 %-nál kisebb karbon-előírással abból a célból, hogy az alakíthatóságot optimalizálja. Ezért fő prioritásod a hőmérséklet szabályozás a fúvatás végén annak érdekében, hogy a maximum alatt tartsad a hőmérsékletet, míg eléred az előírt kis értéket.

A **csőacél (cső-acél)** a gáz szállítására szolgál és **igen igényes** fajta, mivel a nagy szilárdság és a nagy törő szívósság rendkívül kis szennyező szintet (S,P,H,O és N), valamint zár-

ványszintet igényel. Csak a nagyobb tapasztalatú felhasználónak ajánlott ezzel a fajttal foglalkozni.

Az általános **gépészeti (Járműipari acél)** hőkezelhető gyengén ötvözött acél viszonylag nagy karbon tartalommal. Nagyfotosságú a helyes induló hőmérséklet a célul kitűzött hőmérséklet elérésére a 0,30 és 0,45 %C közti karbon tartalom beállításakor.

4.1. táblázat Maximális összetételi koncentrációk (%-ban) négy, a szimulációban szereplő kiválasztott acélra

Elemek	Szerkezeti acél	TiNb ULC acél	Csőacél	Járműipari acél
C	0,16	0,01	0,08	0,45
Si	0,25	0,25	0,23	0,40
Mn	1,5	0,85	1,1	0,90
P	0,025	0,075	0,008	0,035
S	0,10	0,05	0,01	0,08
Cr	0,10	0,05	0,06	1,2
B	0,0005	0,005	0,005	0,005
Cu	0,15	0,08	0,06	0,35
Ni	0,15	0,08	0,05	0,30
Nb	0,05	0,03	0,018	0
Ti	0,01	0,035	0,01	0
V	0,01	0	0,01	0,01
Mo	0,04	0,01	0,01	0,30
Ca	0	0	0,005	0

4.2. táblázat Előírt csapolási hőmérsékletek a négy kiválasztott acélfajtára, °C

	Minimum	Maximum
Szerkezeti acél	1630	1660
TiNb ULC acél	0665	0695
Vezetékcső acél	1655	1685
Járműipari acél	1655	1685

4.5. Ütemezés tervezése

Mielőtt indítod a szimulációt, fontos, hogy előre tervezzél. Az első teendő egy hő és tömeg mérleg számítás befejezése annak érdekében, hogy meghatározd a folyékony nyersvas, a hulladék, vasérc, salak adalékok és a folyékony nyersvas előírt karbon tartalomra való oxidációjához szükséges oxigén-mennyiséget és hőmérsékletet. Aztán gondolkodj azon, hogyan éred el az előírt értékeket a megkívánt időben.

4.3. táblázat Példa a nyersvas összetételére és csapolási (előírt) hőmérsékletre igen kis karbontartalmú acél fajtára. A karbon-, szilícium- és foszfortartalmat egyaránt csökkenteni kell, míg a mangán szinten maradhat. A hőmérsékletet is növelni kell.

	Folyékony nyersvas összetétele, súly%	Csapoláskori összetétel, súly%	Összetételi eltérés, súly%
--	---------------------------------------	--------------------------------	----------------------------

C	4,5	0,01	-4,49
Si	0,4	0,25	-0,15
Mn	0,5	0,85	+0,35
P	0,08	0,075	-0,005
Hőmérséklet	1350°C	1680°C	+330°C

4.5.1. Összetétel

Némi badagolást végre kell hajtani annak érdekében, hogy beletalálj az előírt összetételbe. Íme azok a kulcskérdések, amelyekre válaszolnod kell

- Milyen adalékokat lehet felhasználnod, hogy elérd ezt?
- Mennyi adalékra (kg-ban) van szükséged?
- Ez az adalék nagyon befolyásolja a többi elemet, ha igen, mennyire?
- Mikor kell az adagolást elvégezni?
- Az adalékok mennyire vannak hatással a költségre, az acél összetételére és a hőmérsékletre?

4.4. táblázat: A rendelkezésre álló adalékok összetétele és költsége

ADALÉK ANYAG	összetétel, %	Ár \$/t
Nyersvas	4.5%C, 0.5%Mn, 0.4%Si, 0.08%P, 0.02%S + Fe bal.	185
Könnyű hulladék	0.05%C, 0.12%Mn, 0.015%P, 0.015%S, 0.06%O, 0.003%Ce, 0.26%Cr, 0.02%Cu, 0.14%Mo, 0.001%Nb, 0.4%Ni 0.001%Sn, 0.015%Ti, 0.005%V, 0.009%W + Fe bal.	190
Nehéz hulladék	0.05%C, 0.12%Mn, 0.015%P, 0.015%S, 0.06%O, 0.003%Ce, 0.26%Cr, 0.02%Cu, 0.14%Mo, 0.001%Nb, 0.4%Ni, 0.001%Sn, 0.015%Ti, 0.005%V, 0.009%W + Fe bal.	150
Vasérc	99.1%FeO, 0.3%Al ₂ O ₃ , 0.5%CaO, 0.1%MgO, 0.001%P	85
Égetettmész	94.9%CaO, 1.2%Al ₂ O ₃ , 1.8%MgO, 2.1%SiO ₂	85
Dolomit	59.5%CaO, 38.5%MgO, 2%SiO ₂	85

4.5 táblázat: A beadagolt elemek hasznosulása (%).

Elem	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	B	Ni
Hasznosulás	95	98	95	98	80	99	90	100	100
Elem	Nb	Ti	V	Mo	Ca	N	H	O	Ar
Hasznosulás	100	90	100	100	15	40	100	100	100
Elem	As	Ce	Co	Cu	Mg	Pb	Sn	W	Zn
Hasznosulás	100	100	100	100	100	100	100	100	100

4.5.1. Hőmérséklet

Annak érdekében, hogy korrekt csapolási hőmérsékletet érjél el, fontos a különböző adalékoknak az acél hőmérsékletére kifejtett hatásának figyelembe vétele.

1. A pihentetés körülményei között, amikor a gázkeverést már befejezték és nincs oxigén befúvatás, az acél hőmérséklete kb. 1-2 °C/perc értékkel hűl.
2. A legtöbb adalék minden egyes beadott tonnájára (1000 kg) további 5°C hőmérsékletesést okoz.
3. A foszfor és a szilícium oxidálása erőteljesen exotermikus és körülbelül 26 MJ/tonna per 0,1% per oxidált nyersvas-tonna hőt termel, ami közel 3°C/tonna per 0,1%-kal egyenlő.
4. A karbon oxidálódása is exotermikus és körülbelül 13 MJ/tonna per oxidált 0,1% hőt termel, ami mintegy 1,4°C/tonna per 0,1%-kal egyenlő.
5. A folyékony nyersvas vagy acél hőmérsékletének növelése 9,0 vagy 9,4 MJ/t hőmennyiséget igényel

Gondosan kiszámítva az összes időt a konverterbe történő beadagolástól a csapolásáig, lehetővé válik egy hőmérséklet-idő görbe becslése..

4.5.1.1 A likvidusz hőmérséklet kiszámítása

Igen fontos annak megelőzése, hogy az acél fürdő hőmérséklete a likvidusz hőmérséklet alá essen (azaz azon hőmérséklet alá, amelyen az acél kezd megdermedni). A T_{likv} nagymértékben függ az összetételtől, és az alábbi egyenlet segítségével lehet megközelíteni:

%C<0,5 esetében:

$$T_{likv} (^{\circ}\text{C}) = 1537 - 73,1 \%C - 4\%Mn - 14 \%Si - 45 \%S - 30 \%P - 1,5 \%Cr - 2,5 \%Al - 3,5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad (4.1)$$

0,5<%C<4,4 esetében:

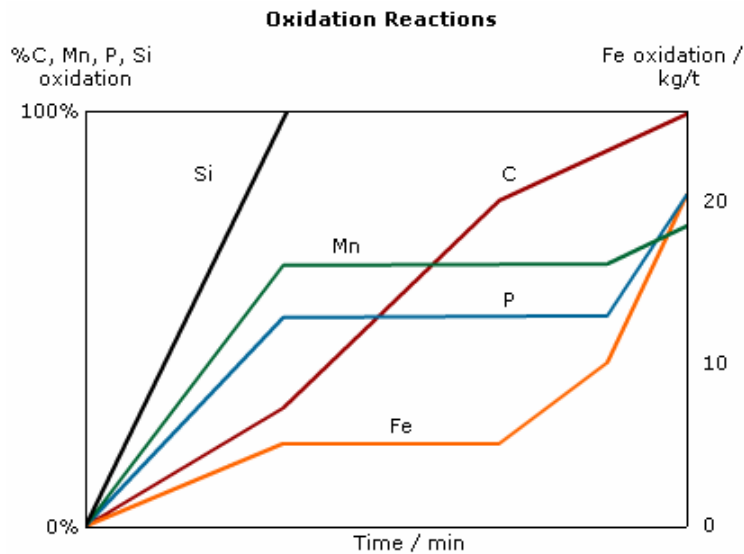
$$T_{likv} (^{\circ}\text{C}) = 1531 - 61, \%C - 4 \%Mn - 14 \%Si - 45 \%S - 30 \%P - 1,5 \%Cr - 2,5\%Al - 3,5 \%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad (4.2)$$

%C>4,4 esetében

$$T_{likv} (^{\circ}\text{C}) = 389 \%C - 10,5 \%Mn + 105 \%Si + 140 \%S + 128 \%P - 506 \quad (4.3)$$

4.5.2. Az oxigénes fúvatási folyamat szakaszai

A BOP alatt három jellemző reakciós periódust kell átgondolni: a szilícium oxidálódását, a teljes dekarbonizációt és a karbon diffúziót. Ezeknek mind egymástól eltérő reakció-jellege van. A 4.3. ábrán látható az áttekintésük.



4.3. ábra Az oxinéses konverterekben lejátszódó oxidációs reakciók

4.5.2.1. A szilícium oxidálódásának szakasza

A fúvatás –megközelítően- első harmadában a Si nagyobb része oxidálódik némi Fe-vel együtt. Jó gyakorlat az FeO tartalom növelése egy jó habos salak biztosítására mindjárt a fúvatás kezdetén, majd annak stabilizálása a lándzsa süllyesztésével addig, amíg a hab emelkedése megáll.

Ez alatt a periódus alatt oxidálódik a P és a Mn nagy része is. A beadagolt oxigén maradéka a karbonnal reagál.

4.5.2.2. A karbonoxidáció szakasza

Normális körülmények között minden bevitt oxigén reagál a karbonnal. Azonban akkor, amikor a lándzsa pozíciója túl magas, az oxigén egy része ehelyett az Fe-t oxidálja. Másrészt, ha a lándzsa túl alacsony, az előzetesen képződött FeO (és a habos salak) redukálódik és a maradék oxigén a C-nal reagál.

4.5.2.3 A karbondiffúzió periódusa

A fúvatás végén, amikor a karbon tartalom 0,8%-nál kisebb, a dekarbonizáció sebessége lényegesen csökken és most fokozódóan behatárolt a karbonnak az acélban diffundálásával. A periódus alatti dekarbonizációra egy megközelítő összefüggést mutat(a maradék oxigén az Fe-t oxidálja):

$$\Delta\%C = \frac{V_{O_2}}{0.98 + \frac{0.15}{(\%C)^2}} \quad (4.4)$$

ahol

$\Delta\%C$ = változás a karbon tartalomban, súly%-ban
 $\%C$ = pillanatnyi karbon tartalom, súly%-ban
 V_{O_2} = bevitt oxigén m³/tonnában

4.6. Felhasználó interface

Ez a szakasz a szimuláció lefutásának alapvető „mechanikáját” írja le, azaz azt, hogyan mozog a láncza, hogyan kell szabályoznod az oxigén áramot, stb.

Azok az alapvető tudományos összefüggések (kémia, termodinamika, reakciókinetika, stb.), amelyekre szükséged lesz az ötvözők mennyiségeinek, a folyamat paramétereknek, stb. kiszámítása érdekében, a 4.7. fejezetben szerepelnek.

Az általában használatos szabályzók magukban foglalják:

- **Lépő szabályzókat:** a mennyiségek kiválasztására használják, fel és le nyilakat tartalmaznak, amelyekre rá lehet kattintani a mennyiség növelésére vagy csökkentésére, vagy használhatod a fel és le nyilakat a billentyűzeten, amikor már kiválasztottad a szabályzást.

4.6.1. Szabályzás a szimuláció alatt

Mihelyt megindul a szimuláció, az információ különböző forrásait be lehet mutatni és/vagy visszahívni a menüben megadott megfelelő kulcs lenyomásával a képernyő alsó bal sarkában. Kényelmedre ezek a kulcsok az alábbiak:

A:	Adagolás végrehajtása
C:	Acélösszetétel/ idő ábra
E:	Esemény napló
P:	Olvasás lefolyásának ábrája (%C/ idő)
R	Áttekintés/ megkért elemzés
S:	Salakösszetétel/ idő ábra
X	Záró dialógus doboz

4.6.1.1. Beadagolások (A-billentyű)

A folyékony nyersvas fúvatása alatt adagolhatsz vasércet, égetett meszet és dolomitot. Ezen adalékok mindegyikének van egy lépő szabályzója, amelyet a beadagolandó mennyiség megválasztására használnak. Hiba esetében minden érték a kezdeti zéróra áll. Minden adalék egységnyi költsége kijelzésre kerül, a megválasztott mennyiség kiszámított költségével együtt.

TANÁCS: Mozgassa a kurzort az adalék címkére a baloldalon az összetételére és jellemző kihozatali arányára vonatkozó információkért

Raw Material	Unit cost	Mass	Cost
Iron Ore	Composition: 0.5%CaO, 99.099%FeO, 0.1%MgO, 0.001%(P)		
Lime	\$85.00 / kg	1600 kg	136.00/kg
Dolomite	\$85.00 / kg	1750 kg	148.75/kg
Total:		3350 kg	\$284.75
Clear Cancel Order			

4.4. ábra A beadagolásra vonatkozó információs tábla

(<http://www.steeluniversity.org/Steel Processing/Basic Oxygen Steelmaking> 7-1.ábra)

Jegyezd meg, hogy a végrehajtott adagolások nem eredményezik az acél összetételének pillanatszerű változását, mert véges időt vesz igénybe az oldódásuk. Várható, hogy az erősen kevert beadagolások nagy hőmérsékleteken gyorsan oldódnak, míg kisebb hőmérsékleteken végrehajtott beadagolások kevés keveréssel vagy anélkül több percet fognak igénybe venni az oldódáshoz.

4.6.1.2. Acélösszetétel-idő összefüggés megtekintése (C-billetnyű)

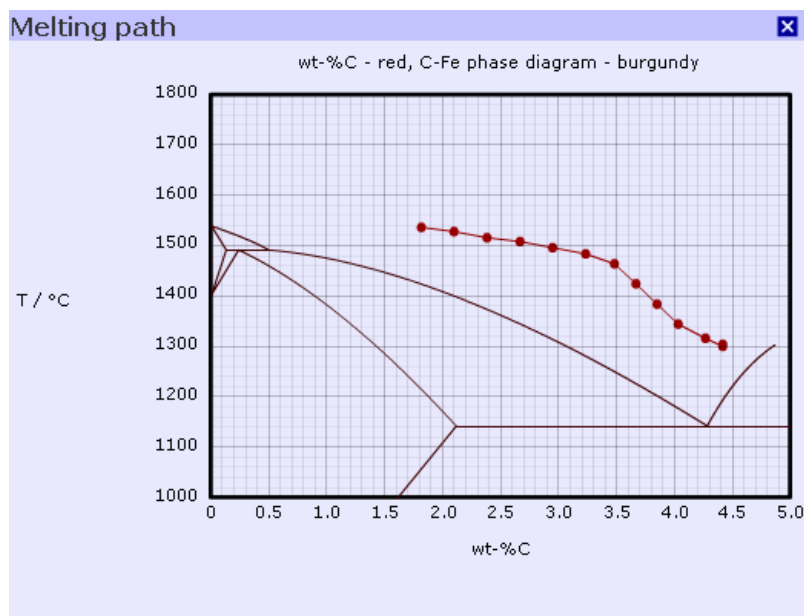
„C”-t lenyomva a billetnyüzeten megjelenik egy diagram avval kapcsolatban, hogy hogyan változott az acél összetétele az időben. Az ebben a diagramban kivetített elemek magukba foglalják a C, Si, Mn és P elemeket. Ez az információ létfontosságú lehet annak meghatározására, hogy milyen adalékokat vigyél be és mikor.

4.6.1.3. Eseménynapló megtekintése (E-billetnyű)

Az eseménynapló kronologikus jegyzőkönyvként szolgál minden jelentősebb lépésről, beleértve a beadagolásokat is. Hasznos abban, hogy nyomon kövesd azt, mit történt eddig a szimuláció alatt. Abban is igen hasznos, hogy segítsen téged az eredmények elemzésében a szimuláció végén, mivel a napló gyakran fog nyomokat szolgáltatni avval kapcsolatban, hogy hol mellőzted, vagy alkalmaztad hibásan a különböző kritériumokat.

4.6.1.4. Olvasztás lefolyásának megtekintése (P-billetnyű)

Az olvasztás lefolyása a karbon tartalommal, a hőmérséklettel és a szimuláció alatt eltelt idővel kapcsolatos információk összessége a C-Fe fázisdiagram (4.5. ábra)-ba telepítve. Minden pont egy percet reprezentál, míg a hőmérséklet és a karbon tartalom értékeit az X- és az Y-tengelyről lehet leolvasni.



4.5. ábra Olvadáspont diagram, ahol a C-tartalom és hőmérséklet látható az idő függvényében

(<http://www.steeluniversity.org/Steel Processing/Basic Oxygen Steelmaking 7-2.ábra>)

Bizonyosodj meg arról, hogy az olvasztás lefolyása nem esik a likvidusz hőmérséklet alá, amely esetben az adag részben vagy egészben megdermedhet. A megdermedés természetesen az adag leselejtezését eredményezi.

4.6.1.5. A megkért kémiai összetétel megtekintése (R billetnyű)

Mindenkor megtekintheted a legújabb kémiai elemzéseket az R billetnyű lenyomásával. Ezért nincs időbűntetés. A legtöbb esetben az acél kémiai összetétele változni fog miután az utolsó elemzést elkészítették. Új elemzés kezdeményezésére nyomd meg a „**Vég új próbát**” gombot. Az elemzés költsége 120\$, 40\$ az aktuális elemzésre és 80\$ a szublandzsa fogyó alkatrészére. Az eredmények megérkezése megközelítően 3 szimulációs percet vesz igénybe, azaz körülbelül 22 valós másodpercet, ha a szimulációs sebességet x8-ra állítottad.

A próbavételi időpontot a dialógus doboz felső részének közelében vetítik ki. Tudnod kell, hogy az összetétel változhat azután, amikor a próbát kivetted.

4.6.1.6 A salakösszetétel-idő összefüggés megtekintése (S billetnyű)

A billentyűzetten az „S”-t lenyomva megjelenik egy diagram arról, hogyan változott a salak összetétele az időben. A diagramban megjelent oxidok: CaO, FeO_x, MnO, MgO és SiO₂. Elsődleges alkalmazása az ennek a diagramnak, hogy meghatározd, milyen salak adalékokat kell bevinni és mikor. Követve azt is, hogy hogyan változik az FeO_x a salakban, lehetséges ítéletet mondanod arról, mennyire jól választottad meg az oxigén fúvatási módot.

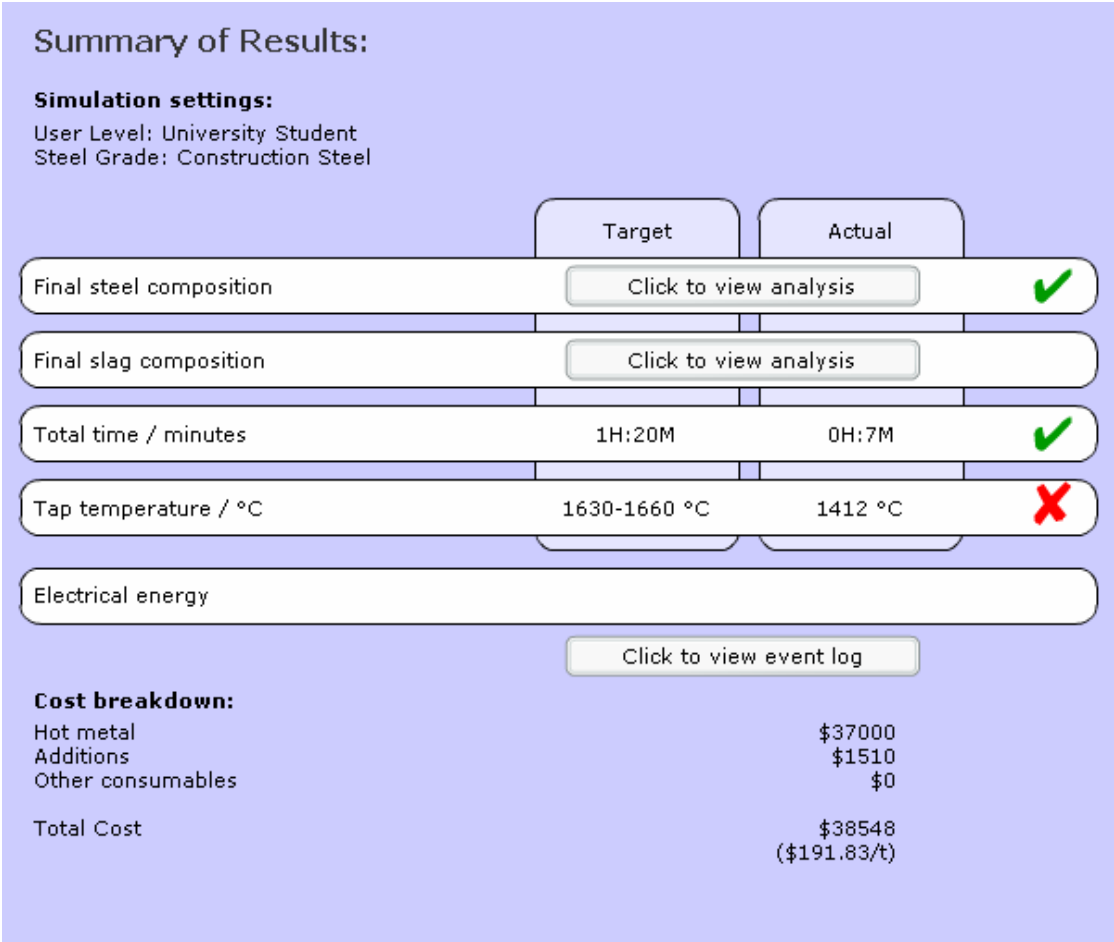
Az üzemi technikus szinten nem láthatod meg ezt az információt a szimuláció alatt. Azonban ez lehetséges lesz az összegező képernyőn úgy, hogy felhasználhatod egy postmortem részeként.

4.6.1.7. Dialógus doboz zárása (X billetnyű)

Az „X” lenyomásával ezen dialógus dobozok bármelyike záródik.

4.6.2. Szimulációs eredmények

Mihelyt befejeződött a csapolás, a szimuláció befejeződik és az adag eredményei megjelenítésre kerülnek az összes üzemi költséggel együtt, \$ per tonnában kifejezve. 3.5. ábra)



4.6. ábra Végső eredményeket mutató tábla

(<http://www,steeluniversity.org/Steel Processing/Basic Oxygen Steelmaking> 7-3.ábra)

4.7. Elvi alapokul szolgáló tudományos összefüggések

Ez a fejezet azokat az elvi alapokul szolgáló tudományos kulcs-elméleteket és összefüggéseket mutatja be, amelyek szükségesek a szimuláció eredményes befejezéséhez. Semmi esetre sincs szándékában az acélgyártó elmélet és gyakorlat széleskörű kezelése – ehhez a felhasználó egyéb kiváló publikációk felé van irányítva.

4.7.1. Adalékok számítása

Hulladékot, salak- és vasoxid adalékokat különböző okokból viszünk be a konverterbe

- A folyékony fém hőmérsékletének beállítására
- A folyékony fém összetételének beállítására
- A salakösszetétel és ezzel tulajdonságai megváltoztatására.

4.7.1.1. Elemek beadagolása

A legegyszerűbb esetben, amikor egy tiszta (szín) elemet adagolunk, az $m_{\text{adalék}}$ szükséges adalék-mennyiséget egyszerűen a következő összefüggés adja meg:

$$m_{\text{additive}} = \frac{\Delta\%X \times m_{\text{steel}}}{100\%} \quad (4.5)$$

ahol

$m_{\text{additive}} = m_{\text{adalék}}$, a szükséges adalék mennyisége
 $\Delta\%X$ =szükséges növelés súly% X-ben (azaz $\%X_{\text{cél}} - \%X_{\text{pillanatnyi}}$)
 $m_{\text{acél}}$ = az acél tömege

Példa:

Tegyük fel, hogy 250 000 kg acél pillanatnyilag 0,01%Ni-t tartalmaz. Mennyi elemi Ni-t kell beadagolni a célul kitűzött 1,0% Ni –tartalom eléréséhez?

$$m_{\text{adalék}} = m_{\text{additive}} = \frac{(1.0 - 0.01)\% \times 250,000 \text{ kg}}{100\%} = 2,475 \text{ kg}$$

4.7.1.2. Más elemek felvétele

Amikor hulladékot adagolunk, tisztában kell lenni avval, és ha szükséges, ki kell számítani a vason kívüli egyéb elem hatását az acél teljes összetételére vonatkozóan. Adott elem új százalékos szintjét a (4.6) egyenlettel számítjuk ki:

$$\%X_{\text{steel, after}} = \frac{m_{\text{scrap}} \times \%X_{\text{scrap}} \times \text{recovery rate of } X + m_{\text{steel}} \times \%X_{\text{steel}}}{100 \times (m_{\text{scrap}} + m_{\text{steel}})} \quad (4.6)$$

ahol

$\%X_{\text{steel, after}} = \%X_{\text{acél, új}}$, az acélban az elem új százalékos szintje súly%-ban
 $m_{\text{scrap}} = m_{\text{hull}}$, a hulladék tömege kg-ban
 $\%X_{\text{scrap}} = \%X_{\text{hull}}$, a hulladékban az elem százalékos szintje súly %-ban
 $m_{\text{steel}} = m_{\text{acél}}$, az acél tömege kg-ban
 $\%X_{\text{steel}} = \%X_{\text{acél}}$, az acélban az elem százalékos szintje súly %-ban
Recovery rate, kinyerési arány

Példa

Számítsd ki az új karbon-tartalmat, ha 10 000 kg nehéz hulladékot adtál 250 000 kg folyékony nyersvasához.

A folyékony nyersvas 4,5% C-t - tartalmaz (4.4.táblázat) és a karbon hasznosulási aránya 95%-ot ér el (4.5. táblázat)

$$\%C_{\text{acél új}} = \frac{10,000 \text{ kg} \times 0.05\% \times 95\% + 250,000 \times 4.5\%}{100\% \times (10,000 \text{ kg} + 250,000 \text{ kg})} = 4.33\%C$$

Magától értetődik, ha nagy mennyiségű hulladékot adagolsz, a karbon tartalom jelentősen csökken. Azonban nem lehetséges csupán a hulladék adagolásával a folyékony nyersvas hígítása az előírt karbon tartalomra. Ilyen nagymennyiségű hulladék beadagolása az egész fűrdő kemencébe fagyását okozná.

4.7.1.3. Keveredési idő

Jegyezd meg, hogy a beadagolások eredményeképpen nem változik meg azonnal az acél összetétele, mivel véges időt vesz igénybe az oldódás. A szimulációban győződj meg arról, hogy elegendő időt engedtel-e az adalékok felolvadására és eloszlására a következő irányelvek figyelembe vételével:

- A hulladék adagolások gyorsabban oldódnak, mint a salak- vagy vasoxid-adalékok
- Az oxigén befűvatása felgyorsítja az oldódás folyamatát, mivel a meginduló oxidációs reakciók hőt visznek be a rendszerbe.

4.7.2. Fontos reakciók

A folyékony nyersvas kikészítése gyors oxidációs reakciókkal a befűvott oxigénnel érintkezve az egyéb jelenlevő elemekkel együtt olyan feltételek között megy végbe, amelyek messze vannak a termodinamikus egyensúlytól. A három legfontosabb reakció a következő:



A $CO \rightarrow CO_2$ -vé történő utóégése (4.9. egyenlet) csak részleges, azaz a meglevő CO-nak csak egy része oxidálódik CO_2 -vé. Ezeket a gázalakú reakció termékeket (CO és CO_2) elszívják a füstgázernyőn keresztül. A $CO_2/(CO+CO_2)$ arányt utóégetési aránynak (PCR) hívják.

Egyéb fontos reakciók, amelyeket figyelembe vesz a szimuláció, a következő:



Ezek az oxidok az előzőleg beadott oxidokkal, azaz az égetett mésszel és dolomittal együtt olyan folyékony salakot képeznek, amely a fémfűrdő felszínére úszik. A salak összetétele felettébb fontos, mivel az sok különböző tulajdonságot szabályoz, mint például:

- L_S kénmegoszlási arány
- L_P foszformegoszlási arány
- L_{Mn} mangánmegoszlási arány

- A salak likvidusz hőmérséklete

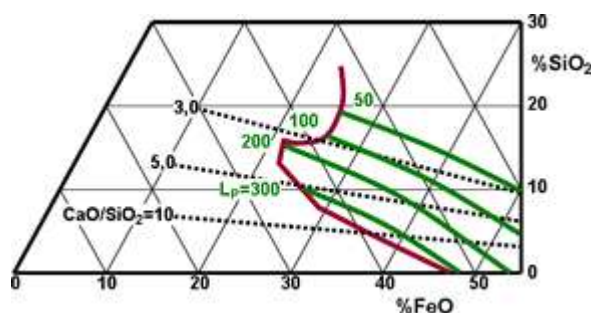
Ezek az arányok arra utalnak, hogy miképpen oszlanak meg az elemek a salak és az acél között, például az $L_P = 1$ azt mutatja, hogy az acélban levő foszfor szintje [%P] egyenlő a salakban levő szinttel (%P).

4.7.2.1. Foszformegoszlási arány

A bázikus oxigénes acélgártó eljárás utolsó szakaszában végbemenő foszfortalanítás igen fontos, mivel a körülmények előnyösebbek a primér és a szekundér acélgártás többi folyamatához képest. Ezért kritikus a salak olyan összetételének fenntartása, amely elősegíti a foszfor eltávolítását.

A 4.7. ábra azt mutatja, hogy hogyan változik a foszformegoszlási arány a különböző salakösszetételekkel. Nagy arány fenntartása nehéz, mivel csupán egy igen keskeny összetétel-tartomány áll rendelkezésre. Ezen kívül 50°C hőmérséklet emelkedés 1,6 faktossal csökkenti az L_P -t ($\text{CaO/SiO}_2 = 3$ bázicitásnál).

$$L_P = \frac{(\%P)_{\text{slag}}}{[\%P]_{\text{steel}}} \text{ egyensúlyban} \quad (4.15)$$



4.7. ábra A foszformegoszlási arány (L_P) $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-2\%P}_2\text{O}_5\text{-1.5\%Al}_2\text{O}_3\text{-3\%MnO-5\%MgO}$ salakban 1650 °C-on

4.7.2.2. Foszfortalanítás kinetikája a fúvatást követő keverés alatt

Azt a sebességet, amellyel az acél foszfortalanodik a fúvatást követő pl. nitrogénes vagy argonos keverés alatt, az alábbi összefüggés szabályozza:

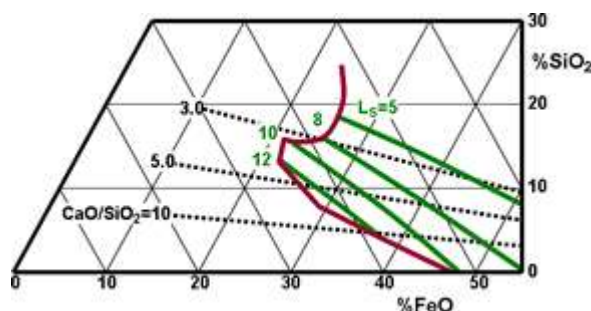
$$\frac{d\%P}{dt} = k_c \times \frac{A}{V} \times [\%P - \%P_{eq}] = -\beta \times \sqrt{\frac{D_P \times Q}{A}} \times \frac{A}{V} \times [\%P - \%P_{eq}] \quad (4.16)$$

$\frac{d\%P}{dt}$	=	ahol
$\%P_{eq}$	=	$\%P_{egyensúly}$
k_c	=	a folyékony acélban levő P tömegátadási együtthatója
A	=	a salak-fém érintkezési felület (m^2)
V	=	az acél térfogata (m^3)
$\%P$	=	az acél P-tartalma t időpontban
$\%P_{egyens}$	=	egyensúlyi P-tartalom t időpontban
β	=	tapasztalati együttható ($\sim 500 m^{-1/2}$)
D_P	=	P diffúziós együtthatója a folyékony acélban ($m^2 s^{-1}$)
Q	=	gáztérfogat-áramlási sebesség a határfelületen keresztül

4.7.2.3. Kénmegoszlási arány

Bár a kéntelenítésnek nincs prioritása a BOA-ban mégis van korlátozott S-eltávolítás a salak/fém határfelület reakciói nyomán. A 4.8 ábra azt mutatja, hogy hogyan változik a kénmegoszlási arány a salak összetételével. Kérlek, jegyezd meg, hogy a folyékony salakok területén az L_S gyakorlatilag független a hőmérséklettől.

$$L_S = \frac{(\%S)_{slag}}{[\%S]_{steel}} \quad \text{egyensúly esetén} \quad (4.17)$$



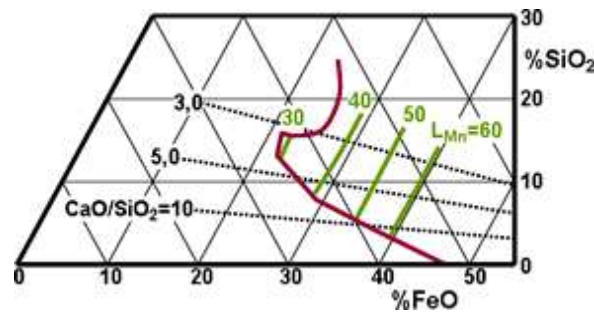
4.8. ábra A kénmegoszlási arány (L_S) CaO-SiO₂-FeO-2%P₂O₅-1.5%Al₂O₃-3%MnO-5%MgO salakban 1650 °C-on

4.7.2.4. Mangánmegoszlási arány

A folyékony nyersvasban levő mangán nagyobb része oxidálódik az oxigénes fúvatás első részében. Némiképp maradó mangánt fel is vehet a salak vagy visszamehet az acélba a salak/fém határfelület oxidációs/redukációs reakciói folytán.

A mangánmegoszlási arány enyhén hőmérséklet-függő. 50°C hőmérséklet emelkedés $\sim 1,25$ faktorrallyal csökkenti az L_{Mn} -t.

$$L_{\text{Mn}} = \frac{(\% \text{Mn})_{\text{slag}}}{[\% \text{Mn}]_{\text{steel}}} \text{ egyensúly esetén} \quad (4.18)$$



4.9. ábra A mangánmegoszlási arány (L_{Mn}) $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-2\%P}_2\text{O}_5\text{-1.5\%Al}_2\text{O}_3\text{-3\%MnO-5\%MgO}$ salakban 1650 °C-on

4.8. HŐ- ÉS TÖMEGMÉRLEGEK FELÍRÁSA

4.8.1. Bevezetés

A tömeg-és hőmérlegek alapvető eszközök az alábbiakra:

- Betétszámítás
- Bizonyos tételek /salak stb.)összetételének beállítása
- A hőmérséklet beállítása
- Anyag-és hőveszteségek kiértékelésének diagnosztikája

4.8.2 Tömegmérleg

Szakaszos üzemű reaktorban, pl. ahol az adagok között kiürítik a konvertert, a tömegmérleg az anyagbevitelt és kihozatalokat mért súlyuk és elemzésük alapján hasonlítja össze. A kettő közti különbség, ha egyáltalán van ilyen, ezeknek a paramétereknek bizonytalanságaira vezethető vissza vagy bizonyos bevitt anyagok (tűzálló-kopás, magával ragadott salak, stb.) vagy kimenő anyagok (füstök, porok, stb.) gyenge identifikációja miatt.

$$\sum \text{bevétel} = \sum \text{kihozatal} (+ \text{veszteségek}) \quad (4.19)$$

Figyelembe vehető:

- Teljes mérleg
- Bizonyos entitásokra vonatkozó mérleg
- Elemekre (Fe , O_2 , CaO , stb.) vonatkozó mérleg.

$$\frac{1}{100} \sum_i Q_{E_i} \cdot \%X_{E_i} = \frac{1}{100} \sum_j Q_{S_j} \cdot \%X_{S_j} (+ \text{losses}) \quad (4.20)$$

A kontextustól függően az alábbiakra lehet használni ezt az egyenletet:

- Losses: veszteségek becslésére

- Egy bevitel (Input: Q_{Ei}) vagy kihozatal (Output: Q_{Sj}) mennyiségének kiértékelésére
- Egy bevitel (Input: $\%X_{Ei}$) vagy kihozatal (Output: $\%X_{Sj}$) összetételének kiértékelésére

A tömegmérlegek pontos felállítása mindig kritikus első lépés az energiamérleg érvényességének garantálására.

4.8.3. Hőmérleg

4.8.3.1. Termodinamikai függvények és egységek

A hőcserék mérésére szolgáló termodinamikai függvény a H entalpia. Adott anyagra az entalpiaváltozás, mint a hőmérséklet függvénye – fázisátalakulás hiányában – a C_p hőkapacitásból számítható ki:

$$H_{T2} - H_{T1} = \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT \quad (4.21)$$

Az entalpia SI egysége a Joule(J). Egyéb gyakorlati egység:

- **Kaloria** (cal) : 1 cal = 4,184 J
- **Termi** (th) : 1 th = 10^6 cal
- **Kilowattóra** (kWh): = 1 kWh = 3,6 MJ = 0,86 th

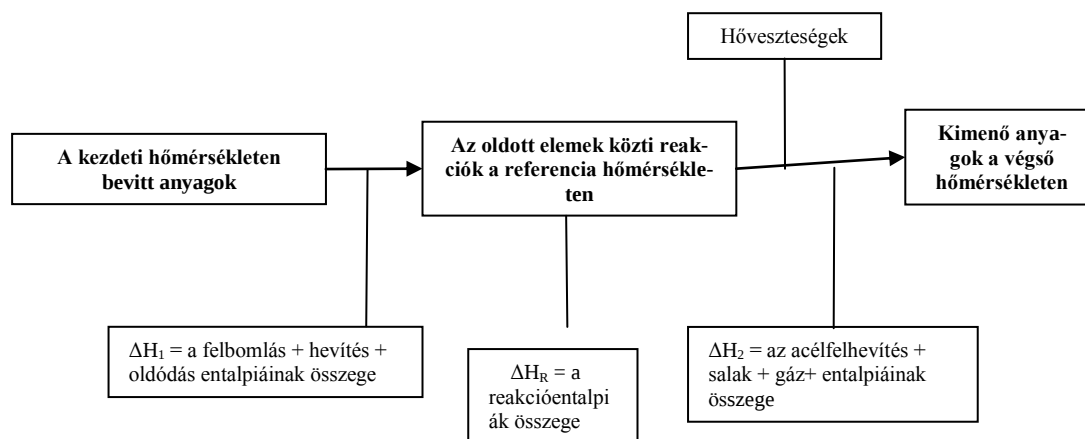
A különböző anyagok hőmérséklettel, fázisátalakulással és kémiai reakciókkal kapcsolatos, entalpia változatokként kifejezett, a vas és acélgyártáshoz tartozó alkalmazások számára szolgáló alapvető adatok kivonatát adják meg az alábbi táblázatok.

4.8.3.2. A hőmérleg felállításának alapelvei

A hőmérleg felállítására gyakorlati módszer abból áll, hogy minden egyes releváns kémiai elemre egyenként gyűjti össze az átalakulásokat és összegezi azokat a végén. Ehhez a számításhoz a termodinamika első törvényének második alapelvét használják fel: „a reakcióhő csak a kezdeti és a végső állapotoktól függ és nem azoktól a közbeni állapotoktól, amelyen a rendszer keresztülmehet”. Ezért elégséges kifejezni a kémiai átalakulások entalpiáját egy önkényesen megválasztott hőmérsékletre (például 1600 °C-ra a teljes betétszámításhoz vagy egy kezdeti acél-hőmérsékletre egy egyszerű hőmérséklet kiigazító kezelés esetében) és a reagálók (illetve reakció termékek) entalpia változásait kifejezni a kezdeti (illetve végső) állapotok és ezen referencia hőmérséklet között.

Például az alább vázolt eljárást lehet alkalmazni:

$$\Delta H_1 + \Delta H_R + \Delta H_2 + \text{hővesztés} = 0 \quad (4.22)$$



4.10. ábra A hőmérleg felállításának elvei

A 4.6-4.9. táblázatok használatosak a ΔH_1 , ΔH_2 és ΔH_R kifejezések kiszámítására. A ΔH_R értékek a reagálóra és a reakciótermékekre vannak megadva 1600°C-ra. Ezek a hőmérséklettől néhány száz fok tartományban független első megközelítések. Jegyezd meg, hogy ezek a kifejezések pozitívak az endotermikus és negatívak az exotermikus reakciókra.

Az alkalmazástól függően ezek a hőmérlegek a releváns tömegmérlegekkel együtt az alábbiakra használhatók:

- Adagdiagnosztikára (a hővesztések kiértékelésére)
- Adagszámításra (Az előírt hőmérsékletű folyékony acél eléréséhez szükséges anyagok mennyiségeinek kiszámítása)
- Hőmérséklet-beállítási számításokra (acél-hőmérséklet variációk exotermikus és endotermikus anyagok beadására és reakciójára). Jegyezd meg, hogy a (4.22) egyenlettel kiértékelt ΔH_2 kifejezés a kihozatali anyagok (folyékony acél, salak és a művelet alatt lehetségesen felszabaduló gázok) entalpia változásait reprezentálja a $\Delta T_{\text{acél}} = T_f - T_i$ hőmérséklet-különbségre. Az acél hőmérsékletváltozása a 4.6 táblázat C_p értékeit felhasználva tehát

$$\Delta T_{\text{steel}} = \frac{\Delta H_2}{0.82 Q_{\text{steel}} + 2.04 Q_{\text{slag}}} \quad (4.23)$$

ahol

$T_{\text{steel,acél}}$ = az acél hőmérséklete °C-ban
 ΔH_2 = a hevítő entalpiák összege MJ-ban
 $Q_{\text{steel, acél}}$ = az acél tömege, tonnában
 $Q_{\text{slag, salak}}$ = a salak tömege, tonnában

4.6. táblázat Anyagok entalpia értékei a hőmérséklet függvényében

	$H(1400^\circ\text{C}) - H(25^\circ\text{C}), \text{MJ kg}^{-1}$	$C_p(1400^\circ\text{C}), \text{kJ K}^{-1} \text{kg}^{-1}$
Folyékony acél 1400 °C-on	1,30-1,37	0,87
	$H(1600^\circ\text{C}) - H(25^\circ\text{C}), \text{MJ kg}^{-1}$	$C_p(1600^\circ\text{C}), \text{kJ K}^{-1} \text{kg}^{-1}$
Gyengén ötvözött acél (1600 °C-on)	1,35	0,82

Kikészítő salak (1600 °C-on)	2,14		2,04	
Vasérc, $\text{Fe}_2\text{O}_3(=\text{Fe}_{\text{foly}} + \text{O})$	4,43			
CaO	1,50		1,03	
	H (1400 °C) – H (25 °C)		C_p (1600 °C)	
	MJ kg^{-1}	MJ m^{-3}	$\text{kJ K}^{-1}\text{kg}^{-1}$	$\text{kJ K}^{-1}\text{m}^{-3}$
Ar	0.82	1.46	0.53	0.93
CO	1.86	2.33	1.28	1.61
CO ₂	1.90	3.78	1.36	2.71
N ₂	1.84	2.30	1.28	0.95
O ₂	1.70	2.43	1.17	1.68

4.7 táblázat Különböző elemek oxidációs reakcióinak entalpiái

X elem oxidálása X_nO_m -mé	Hevítés 25-ről 1600°C-ra + oldódás MJ kg^{-1}	C_p X elemre 1600°C-on $\text{kJ K}^{-1}\text{kg}^{-1}$	X oxidációja 1600 °C-on oldott O ₂ -vel MJ kg^{-1}	X oxidációja 1600 °C-on O ₂ gázzal MJ kg^{-1}	O ₂ mennyisége	
					kg	m ³
C a CO-ban		2.025	-1.93 [*] -3.37 ^{**}	-9.4 [*] -10.84 ^{**}	1.33	0.93
C a CO ₂ -ben		2.025	-15.35 [*] -16.79 ^{**}	-30.35 [*] -31.79 ^{**}	2.67	1.87
Al az Al ₂ O ₃ -ban		1.175	- 22.32	- 27.32	0.89	0.62
Cr a Cr ₂ O ₃ -ban		0.95	- 7.76	- 10.36	0.46	0.32
Fe a folyékony .FeO-ban		0.82	- 2.49	- 4.10	0.29	0.20
Fe az Fe ₂ O ₃ -ban		0.82	- 4.06	- 6.48	0.43	0.30
Mn a MnO-ban		0.835	- 5.34	- 6.97	0.29	0.20
P a C ₃ P-ban ^{***}		0.61	- 23.8	- 31.05	1.29	0.90
Si a C ₂ S ^{***} -ben		0.91	-24.4	-29,35	1.14	0.80

- (') a folyékony acélban
- ('') a folyékony nyersvasban
- ('''') a 3 CaO-P₂O₅ és 2 CaO-SiO₂ képződéséhez szükséges CaO –val 1600°C-on

4.8. táblázat Az oxigén folyékony acélban oldódásának reakciói 1600 °C-on (MJ/kg O₂)

O ₂ gázból 25 °C-on - 5.62	A salakban lévő FeO _x -ből 1600 °C-on 8.7	Igen stabilis oxidokból 1600 °C-on 18
---	--	---

4.9. táblázat Ferroötvözetek felbomlási entalpiája 25°C-on (MJ/kg ötvözet).

Nagy C Ferro-Cr (64%Cr 5%C) 0.11	Rafinált Ferro-Cr (73%Cr 0.5%C) - 0.025	Nagy C Ferro-Mn (78%Mn 7%C) 0.10	Rafinált Ferro-Mn (80%Mn 1.5%C) 0.075	Ferro- szilícium (75%Si) 0.37	Ferro- szilícium (50%Si) 0.70	Silico- mangán (35%Si) 0.71
--	---	--	---	--	--	--------------------------------------

4.8.3.3. Felhasználási példa acél felhevítésére aluminotermiával

A hő és tömegmérleg példaként végezd el az acél hőmérséklet-változásának kiszámítását. A kezdeti 1620° esetében mennyi lesz az acél hőmérséklete 1 kg Al(+ O₂-gáz)per acél-tonna beadagolását követően?

A 4.20 egyenletben látható hőmérleget alkalmazva nyerjük a szükséges paramétereket.

Az anyagszámítás arra utal, hogy 0,89 kg O₂ szükséges az Al kg-jára 1,89 kg Al₂O₃ képződéséhez (lásd a 4.7 táblázatot).

1. ΔH_1 kiszámítása: -5,13 MJ , ami az alábbiakat foglalja magába:
 - a. 1 kg Al felhevítése és oldódása:
 - i. -0,17 MJ (1600°C-ra hevítés + oldódás, lásd a 4.7 táblázatot)
 - ii. + 1,175.10⁻³x20 (1600-ról 1620°C-ra hevítés)
 - b. 0,89 kg O₂ hevítése és oldódása:
 - c. -5,62x0,89 MJ (1600°C-ra hevítés + oldódás, lásd a 4.8. táblázatot)
 - d. +1,17.10⁻³ x 20 x 0,89 (1600-ról 1620°C-ra hevítés)
2. ΔH_R kiszámítása: -22,32 MJ (lásd a 4.7. táblázatot)
3. Így $\Delta H_2 = - (\Delta H_1 + \Delta H_R) = 27,45$ MJ

A megfelelő hőmérsékletváltozás egy tonna acélra, figyelembe véve egy tipikusan 20 kg/tonna (a képződött Al₂O₃-mat is beleértve) salakot és mellőzve a hővesztéseket:

$$\Delta T_{\text{acél}} = \Delta T_{\text{steel}} = \frac{27.45}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 31.9^\circ\text{C}$$

Amennyiben reakció lép fel oldott oxigént használva a gázalakú oxigén helyett, szükséges az oxigén oldódási entalpiáját levonni a ΔH_1 -ből, azaz (-5,62x0,89 MJ/kg Al). A hőmérsékletváltozás így módon:

$$\Delta T_{\text{acél}} = \Delta T_{\text{steel}} = \frac{27.45 - 5.62 \times 0.89}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 26.1^\circ\text{C}$$

Amennyiben a salakban levő vasoxidok redukciójából keletkező oxigénnel jön létre reakció, ehhez az utolsó ΔH_1 értékhez hozzá kell adni az FeO_x felbomlási entalpiáját, azaz (8,7x0,89 MJ/kg Al). Ebben az esetben a hőmérséklet változás a következő lenne:

$$\Delta T_{\text{acél}} = \Delta T_{\text{steel}} = \frac{27.45 - 5.62 \times 0.89 - 8.7 \times 0.89}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 17.1^{\circ}\text{C}$$

4.9. Betétszámítás

4.9.1. Mérlegegyenletek kiválasztása

A folyékony nyersvas és az oxigén közti reakció termékei vagy a salakba (Fe,Si,Mn,P,Cr, stb.) vagy a gázfázisba (a C CO- és CO₂-ként) jutnak. Az elemek megoszlása a folyékony fém, salak és gáz között a befúvatott oxigén mennyiségétől, valamint a fűrdő és az oxigén érintkezésének körülményeitől függ. A fűtatás körülményei az alábbiakat befolyásolják:

- A gáz összetételét; az utóégetés arányát: $PCR=CO_2/(CO+CO_2)$, ahol CO és CO₂ térfogathányadok.
- Az Fe oxidáció fokozatát a salakban: $Fe^{3+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$. A felső fűtatásnál ez az arány körülbelül 0,3, ami az $O_{kapcsolt} : Fe/Fe_{oxidált} = 0,33$ tömegarányának felel meg.

Ezen túlmenően fontos az is, hogy előírjunk egy oxidált Fe-mennyiséget, szokásosan a salak rögzített vastartalma révén. Rozsdaálló acélokra a Cr oxidálódását veszik figyelembe, szokásosan az oxigén dekarbonizációs aránya segítségével.

Ebben az egyszerűsített rendszerben világos, hogy egy adott összetételű acélra és amennyiben a már megtárgyalt három paraméter (gázösszetétel, az Fe oxidációs foka és az Fe oxidált mennyisége) rögzítésével, 4 egyenlet szükséges annak érdekében, hogy kiértékeljük az oxigén, a folyékony acél, a salak és a gáz mennyiségét egy adott mennyiségű folyékony nyersvas kezelésének megfelelően (vagy hogy egy adott mennyiségű acélt gyártunk le). Ezek az egyenletek az Fe, O, gáz és a salakban levő, Fe-on kívüli elemek (Si, Mn és P) mérlegei. Könnyen belátható, hogy ezek az egyenletek függetlenek.

További korlátozást igényel egy újabb beviteli változó (vagy az előbbi megszorítások egyikének kikapcsolása). Ez a helyzet a jellemző ipari feltételekre:

- Az acél hőmérséklete rögzített. Ez a korlátozás endotermikus /hulladék, érc, stb.) vagy exotermikus (ferroszilícium, szén, stb.) adalékanyagok beadagolását igényli.
- Égetett mész beadagolása a megkívánt salak-tulajdonságok elérésére. Ezt a korlátozást ki lehet fejezni a salak-összetételre (CaO tartalom, vagy CaO/SiO₂ bázicitási arány vagy (CaO+MgO)/(SiO₂+P₂O₅)-ra vonatkozó további feltétellel vagy az égetett mész arány rögzítése segítségével.

A salak MgO-tartalmának rögzítése a tűzálló bélés védelme érdekében. Egy mindentől független MgO bevitel szükséges például égetett dolomitmész alakjában.

4.10. táblázat A bázikus oxigénes eljárás beviteli és kihozatali anyagai.

Bevitel	Folyékony nyersvas	A (P_{Fe}) súly rögzített (vagy ismeretlen) és a hőmérséklet rögzített
	Hulladék vagy érc	A (P_{Fe}) súly rögzített (vagy ismeretlen) és a hőmérséklet rögzített
	Égetett mész	A (P_{Chx}) súly ismeretlen, az összetétel és a hőmérséklet rögzített
	Oxigén	A (P_O) súly ismeretlen, az összetétel és a hőmérséklet rögzített

Kihozatal	Folyékony acél	A (P_A) ismeretlen (vagy rögzített), az összetétel és a hőmérséklet rögzített
	Salak	A (P_L) súly ismeretlen, a hőmérséklet rögzített A vasoxid és az oxidációs fok rögzített (=> %Fe _L ,(%O _{Fe}) _L) A teljes összetételt ki lehet számítani az elemek mérlegéből (Si, P, stb.)
	Gáz	A (P_G)súly ismeretlen Az átlagos hőmérséklet és az utóégetési arány (PCR) rögzített

Így egy minimális anyagigényű tipikus betétnek 6 ismeretlene van és 6 mérleg-egyenletet igényel:

- Fe mérleg
- mérleg
- Gáz mérleg
- Az Fe-n kívüli egyéb salakalkotó mérlege
- Bázicitás-egyenlet mérleg
- Energiamérleg.

4.9.2. A Simplex módszer alapelvei mérleg egyenletek megoldására

Általánosságban a szigorúan szükséges anyagoknál több áll rendelkezésre a betét összeállításakor (különböző minőségű hulladékok, ferroötvözetek, stb.). Az optimális betét kiszámításának gyakorlati módszere a Simplex Algoritmus használata, ami a $z = f(c,P)$ betétköltség objektív függvényének minimalizálása, egy lineáris egyenlet a különböző anyagok súlyának kifejezésére:

$$z = \sum_j c_j \cdot P_j \tag{4.24}$$

Ahol
 P_j = A különböző szóbjövő anyagok (folyékony nyersvas, hulladékok, stb.,
salak, gáz)
 c_j = költség, beleértve a felhasználásukkal kapcsolatos és az esetleges deponálási vagy valorizálási (gáz) költségeket

A P_j változók egyéb mérleg-megkötöttségeknek, valamint az anyagok rendelkezésre állásának, elemzési határoknak, stb., mint egyéb lehetséges megkötéseknek vannak alárendelve:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot P_j \{ \leq, =, \geq \} b_i \quad i = 1, \dots, m \tag{4.25}$$

Az anyagok rendelkezésre állásával kapcsolatos megkötéseken kívül bizonyos anyagokra maximális vagy minimális súlyokat írhatunk elő (pl. gondoskodás egy minimális érc mennyiségről a végső hőmérséklet-beállításhoz), vagy bizonyos anyag-összeállításhoz (például a hulladék-tárolók maximális súly- és térfogat-kapacitása), bizonyos anyagokra súlyokat írhatunk elő (pl. szilárd nyersvas, belső hulladék).Az analitikai határ-megkötöttségeken túl előírhatunk egy maximális Cu-(vagy más szennyező elem-) tartalmat az acélban, a salakban az MgO-tartalmat a bélés védelme érdekében, stb.

A Simplex Módszer **azon** lehetősége, hogy önkényesen határoz meg bizonyos anyag mennyiségeket, azzal **az** előnnyel jár, hogy a betétszámításhoz (a folyékony acél súlya rögzített és a folyékony nyersvasé és egyéb betétanyagoké ismeretlen) és az adag diagnosztikai számításaihoz egyazon számítási modult használhatunk (a beadagolt anyagok ismertek és az elméleti acélsúlyt az aktuális anyagokkal és a hőveszteségekkel együtt kiszámítottuk).

4.9.3. Hogyan írjuk fel a mérlegegyenleteket

Az itteni egyenleteket minimális számú anyagot tartalmazó betétre írtuk fel. A nagyobb számú rendelkezésreálló anyagra való transzponálás közvetlen.

4.9.3.1. Fe-mérleg

$$[\%Fe_{Fte} \cdot P_{Fte} + \%Fe_{Fer} \cdot P_{Fer} + \%Fe_M \cdot P_M] = [\%Fe_A \cdot P_A + \%Fe_L \cdot P_L] \quad (4.26)$$

4.9.3.2. O-mérleg

A C, Mn, P, Si elemek oxidálásához felhasznált oxigén mennyiségét ezen elemek Q_C , Q_{Mn} , Q_P és Q_{Si} oxidjainak mennyisége alapján számítottuk ki.

$$Q_C = 0.01 \cdot [\%C_{Fte} \cdot P_{Fte} + \%C_{Fer} \cdot P_{Fer} - \%C_A \cdot P_A] \quad (4.27)$$

(és hasonlóan a Mn-ra, P-ra és Si-ra).

Figyelembe véve a salak összetételéből számított, az Fe oxidálásához felhasznált oxigén mennyiségét és az acélban oldott oxigén mennyiségét, az oxigén mérleg az alábbi:

$$P_O + 0.01 \cdot \%O_M \cdot P_M = \left[\frac{16}{12} \cdot (1 - PCR) + \frac{32}{12} \cdot PCR \right] \cdot Q_C + \frac{16}{55} \cdot Q_{Mn} + \frac{80}{62} \cdot Q_P + \frac{32}{28} \cdot Q_{Si} + 0.01 \cdot (\%O_{Fe})_M \cdot P_L + 0.01 \cdot \%O_A \cdot P_A \quad (4.28)$$

4.9.3.3. Gázmérleg

$$P_G = \left[\frac{28}{12} \cdot (1 - TCS) + \frac{44}{12} \cdot (TCS) \right] \cdot Q_C \quad (4.29)$$

Amennyiben keverő gázt (Ar, N₂, stb.) használunk, P_{Ar} , $P_{N_2, \text{stb-k}}$ hozzáadása szükséges.

4.9.3.4. Az Fe-n kívüli salakalkotók mérlege

$$\begin{aligned} & \frac{71}{55} \cdot Q_{Mn} + \frac{142}{62} \cdot Q_P + \frac{60}{28} \cdot Q_{Si} + 0.01 \cdot \%CaO_{Chx} \cdot P_{Chx} \\ & = 0.01 \cdot [100 - \%Fe_L - (\%O_{Fe})_L] \cdot P_L \end{aligned} \quad (4.30)$$

4.9.3.5. Bázicitás egyenleg

Amennyiben például a $v = \%CaO/\%SiO_2$ bázicitást figyelembe vesszük:

$$0.01 \cdot \% \text{CaO}_{\text{Chx}} \cdot P_{\text{Chx}} = v \cdot \frac{60}{28} \cdot Q_{\text{Si}} \quad (4.31)$$

4.9.3.6. Energiamérleg

A **4.8.3 Hőmérleg** fejezet (4.22) egyenletét használjuk, 1600 °C-t fogadva el referenciaként, így a 4.6-4.9. táblázatokat egyszerűen lehet felhasználni. Jegyezd meg, hogy ezekben a táblázatokban a súly kg-ban, az entalpia **MJ**-ban vagy **kJ**-ban szerepel.

1.lépés

A beadagolt anyagokat kezdeti állapotukból ezen elemek 1600°C hőmérsékletű folyékony fémekben oldott állapotára hozzuk (kivéve az égetett meszet, amelyet csak egyszerűen felhevítünk)

$$\begin{aligned} \Delta H_1 = & 0,00087(1600 - T_{\text{Fte}})P_{\text{Fte}} \quad (\text{folyékony fém hevítése – lásd a 4.6. táblázatot}) \\ & + 1,35P_{\text{Fer}} + 4,43 P_{\text{M}} \quad (\text{a hulladék és az érc hevítése és oldódása – lásd a 4.6 táblázatot}) \\ & + 1,5 P_{\text{Chx}} \quad (\text{az égetett mész hevítése – lásd a 4.6. táblázatot}) \\ & - 5,62 P_{\text{O}} \quad (\text{az oxigén hevítése és oldódása – lásd 4.8. táblázatot}) \end{aligned}$$

A 4.9. táblázatban és a 4.7. táblázat első oszlopában levő adatokat is használd fel, amennyiben ferroötvözetet is beadagoltál.

2.lépés

Az oldott elemek közti reakciók entalpiája 1600 °C-on (3.7. táblázat).

$$\begin{aligned} \Delta H_2 = & [-3.37 \cdot (1 - \text{PCR}) - 16.79 \cdot \text{PCR}] \cdot Q_{\text{C}} \\ & - 5.34 \cdot Q_{\text{Mn}} - 23.8 \cdot Q_{\text{P}} - 24.4 \cdot Q_{\text{Si}} - 0.0296 \cdot \% \text{Fe}_L \cdot P_L \end{aligned} \quad (4.32)$$

3.lépés

Az acélt, salakot és gázt végső hőmérsékleteire hozzuk.

$$\begin{aligned} \Delta H_3 = & 0,00082(T_{\text{A}} - 1600)P_{\text{A}} \quad (\Delta T_{\text{acél}} - \text{lásd a 4.6 táblázatot}) \\ & + 0,00204(T_{\text{L}} - 1600)P_{\text{L}} \quad (\Delta T_{\text{salak}} - \text{lásd a 4.6 táblázatot}) \\ & + [\{ 0,00128(T_{\text{G}} - 1600) \} (1 - \text{PCR}) + \{ 0,00136(T_{\text{G}} - 1600) \} \text{PCR}] Q_{\text{C}} \\ & \quad (\Delta T_{\text{gas CO+CO}_2\text{-re-lásd 4.6 táblázatot}) \end{aligned}$$

A következő megfelelő tagokat add hozzá, amennyiben argont/vagy nitrogént alkalmaztál keverőgázként:

$$+ \{ 0,82 + 0,00053(T_{\text{G}} - 1600) \} P_{\text{Ar}} + \{ 1,84 + 0,00128(T_{\text{G}} - 16010) \} P_{\text{N}_2}$$

4.11. táblázat A hő-és tömegmérleg kiinduló értékei

Foly. nyersvas összetétele 4,5%C, 0,5%Mn, 0,08%P, 0,4%Si, (azaz 94,52%Fe) 1350°C- on

Hulladék összetétele	100%Fe.- Érc nincs.
Égetett mész	100%CaO
Folyékony .acél összetétele	0,05%C,0,12%Mn,0,01%P, (azaz 99,73%Fe) 1650°C-on
Salak	%CaO/%SiO ₂ =4, oxidált Fe tartalom 18% 1650°C-on
Gáz	PCR=0,08 kiszívva átlagosan 1500°C hőmérsékleten
Hővesztések	65 MJ/t acél
:	

4.9.4. Számszerű alkalmazás

Az 1 tonna acélra vonatkozó adagszámítás első lépése a C, Mn, P és Si oxidálódott mennyiségeinek kiszámítása:

$$\begin{aligned}
 Q_C &= 0,045 P_{\text{Fte}} - 0,5 \\
 Q_{\text{Mn}} &= 0,005 P_{\text{Fte}} - 1,2 \\
 Q_P &= 0,0008 P_{\text{Fte}} - 0,1 \\
 Q_{\text{Si}} &= 0,004 P_{\text{Fte}}
 \end{aligned}$$

Ezután mind a 6 hő-és tömegmérleget kiszámítjuk a 4.12 táblázatnak megfelelően:

4.12. táblázat Hő-és tömegmérleg-záró egyenletek.

Fe mérleg	$0,9452 \cdot P_{\text{Fte}} + P_{\text{Fer}} - 0,18 \cdot P_L = 997,30$
O mérleg	$0,0718 \cdot P_{\text{Fte}} + P_O + 0,0544 \cdot P_L = 1,098$
Gázmérleg	$0,1098 P_{\text{Fte}} - P_G = 1,22$
Fe-n kívüli salak-alkotók mérlege	$0,0169 \cdot P_{\text{Fte}} + P_{\text{Chx}} - 0,7606 \cdot P_L = 1,778$
Salakbázicitás	$0,0343 \cdot P_{\text{Fte}} - P_{\text{Chx}} = 0$
Energiamérleg	$- 0,1287 \cdot P_{\text{Fte}} + 1,35 \cdot P_{\text{Fer}} + 1,5 \cdot P_{\text{Chx}} - 5,62 \cdot P_O - 0,3462 \cdot P_L = -117,2$

Végül a tömegeket számítjuk ki:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Fte}} &= 885,3 \text{ kg} \\
 P_{\text{Fer}} &= 171,6 \text{ kg} \\
 P_{\text{Chx}} &= 30,4 \text{ kg} \\
 P_O &= 65,6 \text{ kg} \\
 P_A &= 1000 \text{ kg} \\
 P_L &= 57,2 \text{ kg} \\
 P_G &= 96,0 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

5. ACÉLGYÁRTÁS ÍVFÉNYES ELEKTROKEMENCÉBEN

(az EAF acélgyártás szimulációja [7])

A www.steeluniversity.org honlapon az elektroacélgyártás tananyaga az alábbi fejezeteket öleli fel (vastag dőlt betűkkel az eredeti angol szöveg, alatta magyarul a fordítás):

1.	<i>EAF Introduction</i>	Villamos ívkemence : Bevezetés
2.	<i>Developments in EAF Technology</i>	Fejlesztések a VIK technológiában
3.	<i>Basic Equipment and Operation</i>	Alapberendezés és művelet
4.	<i>Furnace Layout</i>	Kemence tervrajz
5.	<i>Electrical Equipment</i>	Kemence szerkezet
6.	<i>Melting</i>	Olvasztás
7.	<i>Burners</i>	Égők
8.	<i>Raw Materials</i>	Nyersanyagok
9.	<i>Raw Materials Preparation</i>	Nyersanyagok előkészítése
10.	<i>Alloy Yield</i>	Ötvözők előkészítése
11.	<i>Electrode Breakage</i>	Elektródatörés
12.	<i>Slag Foaming</i>	Salakhabosítás
13.	<i>Slag Foamability</i>	Salakhabosság
14.	<i>Slag Reduction</i>	Salakredukálás
15.	<i>Deslagging</i>	Lesalakolás
16.	<i>Tapping</i>	Csapolás
17.	<i>Exercise: EAF Operation</i>	Gyakorlat:EAF kemencei műveletek

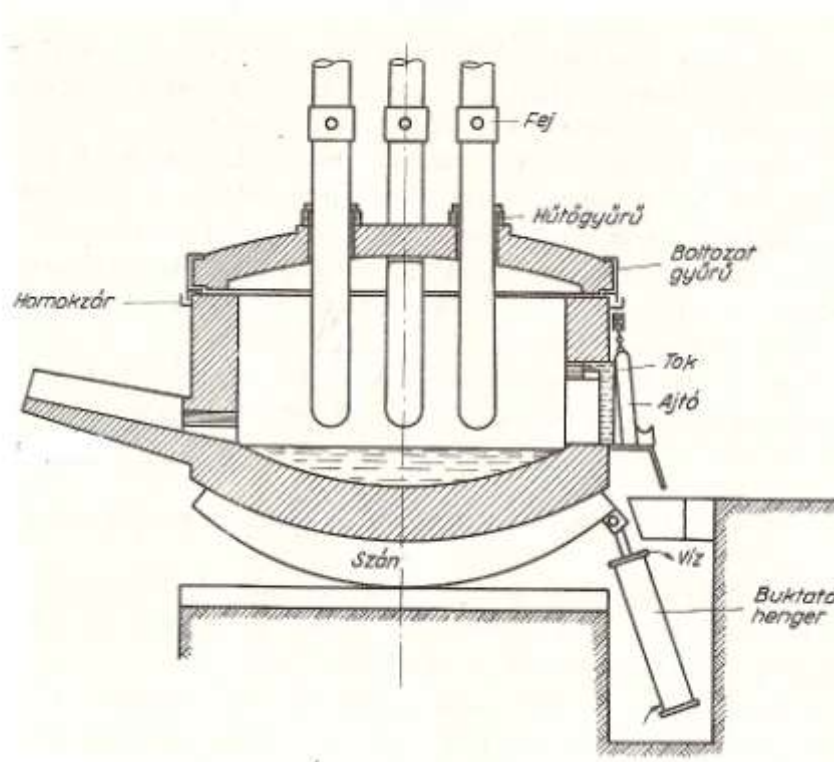
E fejezetek áttekintő jelleggel elemzik a vonatkozó tananyagrészeket azért, hogy a virtuális acélgyártás (szimuláció) előtt elméleti-gyakorlati szempontból a szimulációt végző személy képből legyen. Ennél sokkal részletesebb elemzés szerepel a Károly Gyula – Kiss László-Harcsik Béla: **Elektroacélgyártás** c. jegyzetben [11], ezért javasolandó szimulációt megelőzően ennek a tananyagnak az elsajátítása, s azon videórészletek megtekintése, mely e jegyzet számára készültek a konverteres acélgyártás megértése céljából (a [11] jegyzet forrásként a steeluniversity itt felsorolt 17 pontjában foglaltakat is figyelembevette, felhasználta, ettől függetlenül a steeluniversity ezen 17 pontja is elemezhető, animációi-videói segédeszközként hasznosíthatóak). Ezek előrebocsajtása után szerepeltetjük az elektro- acélgyártás szimulációjára vonatkozó anyagrész lényegi részeit magyarra fordítva.

Az *elektroacélgyártás szimulációja* egy dokumentum felhasználó-útmutatónak készült dokumentum, ami a <http://www.steeluniversity.org/Steel Processing/Electric Arc Furnace-on> található. Ezt az interaktív szimulációt a tananyag szerzői [7] **oktatási és gyakorlási eszköznek** készítették mind az acélmetallurgia hallgatói, mind az acélipar alkalmazottai számára.

5.1. Bevezetés a villamos ívkemencés – elektro – (EAF) acélgyártásba

5.1.1 Alapkonceptiók

A villamos ívkemence (VIK) manapság a legáltalánosabb módszer az acél hulladékból – ócskavasból – való reciklálására.



5.1. ábra Acélglyártás elektrokemencében

Az acélhulladék széles választékban áll rendelkezésre mind az összetétel (a karbonacéltól az erősen ötvözött szerszámacélig), mind pedig a geometriája (a finomra szedrezt acéltól a nagy tartóig) tekintetében. A hulladék elektródák és villamos áram segítségével végzett megolvasztásával új funkcionális acél állítható elő régi termékekből. Nyersanyagforrások feltárása helyett alapvető acél elemeket és értékes ötvözőket lehet újra hasznosítani, ami mind gazdaságossági, mind környezeti szempontból előnyös.

5.1.2. Hevítés és olvasztás

Az acélhulladék olvasztásához szükséges hőmennyiséget az a villamos ív szolgáltatja, amely az elektródák és a hulladék között jön létre a kemencében. Normál villamos ívkemencék villamos teljesítménye a kemence nagyságától függően 50-120 MW tartományban van. A hulladék megolvasztása az acélhulladék összetételétől függően 1500-1550 °C hőmérséklet-tartományban megy végbe.

Amint megolvadt a hulladék, a hőmérsékletet szokásosan úgy emelik, hogy a kikészítő reakciók lefolyhassanak. Oxigént és korbont lehet befúvatni az acélba, illetve a salakfázisba. Azonban a reakciók olyan termékeket is eredményezhetnek, amelyek károsak az acél minőségére és amelyekkel gondosan kell bánni. Ennek érdekében salakot alakítanak ki salakképző anyagok, mint például égetett mész, dolomit és folyópát segítségével. A salak, mivel kisebb a sűrűsége, mint az acélé, általában felúszik az acél felületére. A salak azon kívül, hogy abszorbeálja a szennyezőket az acélból, az atmoszférától is védi az acélt. Továbbá védi a kemence falazatát a villamos ívektől, ezzel növelve a villamos hatékonyságot. Ezért nagyfontosságú a salak minőségének biztosítása és megőrzése a habosítás segítségével. (Lásd O szekció).

Mihelyt a hulladékot megolvasztották és a megfelelő összetételt, valamint hőmérsékletet beállították a kikészítéskor, az acélt üstbe csapolják üstmetallurgiai kezelésre és leöntésre.

A csapolás vagy csatornán, vagy a kemence fenekén elhelyezett csapoló nyíláson keresztül történhet.

5.1.3. Más műveleti megfontolások

Első látásra az elektroacélgyártás alapvető folyamatai eléggé simának tűnnek, - egyszerűen azt feltételezve, hogy rendelkezésre áll elegendő villamos energia az acélhulladék felhevítésére és megolvasztására. Azonban az egész folyamat rendkívüli hőmérséklet-viszonyok között megy végbe, ami komplikálja a kemence karbantartását és egyéb problémák megoldását igényli. Például annak érdekében, hogy a kemence tűzálló falazatát védjék, vízhűtőses paneleket építenek be a kemence falába. Gondos ellenőrzés hiányában ezek túlhevülhetnek és a folyamat hőmérsékletét ennek megfelelően kell beállítani. Az egész folyamat alatt egyensúlyban kell tartani az árambevitelt az elektromos energia legjobb felhasználására, amit az olvasztár ellenőriz.

Az elektródákat gondosan kell kezelni korlátozott mechanikai szívóssága miatt. Amennyiben a kemencét túl sok durva hulladékkal töltötték meg, az elektródákat gondosan kell leengedni a drága törések elkerülése érdekében.

Az elektródák folyamatosan kopnak a hevítés és az olvasztás alatt és méréseket kell végezni a „rövid elektródok” elkerülésére.

Ez a néhány példa a sok eseményből, ami adódhat az elektroacél gyártásakor. Azonban ebben a szimulációban néhány szempontot egyszerűsítettünk kellett annak érdekében, hogy az elektroacél gyártásának szimulálását megnyerővé és érdekessé tegyük.

5.2. Szimulációs célok

A szimuláció célja az, hogy az elektrokemencébe kerülő hulladék anyagokat úgy válassza ki és olvassza meg, hogy a választott acélfajta **célzott összetételét** elérjék és a megkívánt **időtartam alatt és hőmérséklettel** csapolják le.

Célja lehet az egész művelet **költség-minimalizálása** is.

5.3 Szimulációs lehetőségek

5.3.1. Szimuláció sebesség

A szimulációt x1 és x32 közötti sebességtartományban lehet lefolytatni. A sebességet bármikor lehet változtatni a szimuláció alatt. A szimuláció sebességének növelése előnyös lehet bizonyos szimulációs szakaszban. Azonban bizonyos műveletek gondos monitoringot igényelnek és ezért elővigyázattal javasolt ennek a lehetőségnek alkalmazása.

5.3.2. Megcélzott acélfajta

A szimulációban négy különbözőacélfajtát gyárthat.

Az általános célú **szerkezeti acél**-fajta viszonylag igénytelen fajta, amely minimális kezelést igényel és ezért ajánlott az ujsütetű felhasználónak. Fő feladatod a pontos ötvözőadagolás biztosítása.

A **TiNb ultra kis karbontartalmú acél** a gépkocsi karosszéria alkatrészei számára, karbon-előírása 0,0035% maximum az alakíthatóság optimalizálása céljából. Ezért legfőbb prioritás olyan nyersanyagok kiválasztása, amelyeknek viszonylag kicsi a karbon-tartalmuk, mivel azt csökkenteni kell a következő szekundér acélgyártó műveletek során.

A **cső-acél** a gáz szétosztására szolgál és igen igényes fajta, mivel a nagy szilárdság és a nagy törő szívósság rendkívül kis szennyező szintet (S,P,H,O és N) igényel. Csak a nagyobb tapasztalatú felhasználónak ajánlott ezzel a fajtával próbálkozni.

A **járműipari acél** hőkezelhető, alacsony ötvöztetésű fajta. Jellemzően Cr és Mo ötvöztetésű.

Figyelembe kell venni, hogy a különböző acélfajtákra vonatkozóan megcélzott összetétel ebben a szimulációban a szekundér kezelés előtt igényelt szint. Meg kell jegyezni, hogy ezek az értékek **nem azonosak** az acél öntés előtti végső összetételével.

5.1. táblázat Cél-összetételek a szimuláció négy acélfajtájára

	Szerkezeti acél		TiNb ULC acél		Cső-acél		Járműipari acél	
	min	max	min	max	min	max	min	max
C	0,10	0,130	0,05	0,10	0,040	0,060	0,030	0,450
Si	0,10	0,50	0,15	0,50	0,100	0,300		0,450
Mn	1,0	1,50	0,65	1,20	0,900	1,300	0,060	1,200
P		0,025	0,055	0,075		0,008		0,035
S		0,10		0,050		0,010		0,080
Cr		0,10		0,050		0,060		1,200
Al				0,055		0,035		0,030
B		0,0005		0,005		0,005		0,005
Cu		0,15		0,080		0,060		0,350
Ni		0,15		0,080		0,050		0,300
Nb		0,050		0,030		0,018		
Ti		0,010		0,035		0,010		
V		0,010		-		0,010		0,010
M		0,040		0,010		0,010		0,300

5.4. Ütemezés tervezése

Mielőtt indítod a szimulációt, fontos, hogy előre tervezzél. Minél jobban készíted elő, annál jobb eredményeket tudsz elérni, amikor futtatod a szimulációt. Az elektroacélgyártó szimuláció három vizuális szakaszból áll. Az első két szakaszban azokat az anyagokat készíted elő, amit felhasználasz a kiválasztott acélfajta gyártásához és a harmadik, majd a befejező szakaszban meg fogod olvasztani anyagaidat a kemencében és kikészíted azt a kitűzött követelmények szerint.

1. Az **acélfajta** kiválasztása és a cél-összetételnek megfelelő hulladék anyagok keverése.
2. A kiválasztott anyagok **kosarakba** rakása
3. Berakás, olvasztás és kikészítés a **villamos ívkemencébe**
 - A kosarakban levő hulladék berakása a kemencébe
 - A hulladék felhevítése és megolvasztása
 - Ötvözők és salakképzők beadagolása
 - Karbon és oxigén befúvatása habos salak elérésére

- A működő berendezések ellenőrzése
- Csapolás

5.5. A hulladék előkészítése

5.5.1. A hulladék kiválasztása

A szimuláció megkezdésekor tíz különböző hulladék anyag listájával rendelkezel. Elnevezésük az US szabvány szerinti – a hulladék osztályozására nincs nemzetközi szabvány. Ezen anyagok mindegyikének vannak jellemző tulajdonságaik, mint amilyen az összetétel, halmazsűrűség, alak és ár. A szimulációban a tényleges összetétel +5%-kal szór az anyagban levő minden elem összetételét illetően.

MEGJEGYZÉS: Ha valamely hulladékfajta átlagos karbontartalma a megállapítás szerint 0,1%, a tényleges érték 0,095 és 0,105% között lesz

Ez annyit jelent, hogy a megolvasztott anyagkeverék tényleges összetétele kissé különbözik a számított összetételtől az első szakaszban. A 5.2 táblázat azoknak az anyagoknak a listáját tartalmazza, amit bemutattál az előkészítés első szakaszában.

5.2. táblázat Hulladékanyagok

Hulladékanyag	Átlagos összetétel, %	Halmazsűrűség kg/m ³	Alak	Ár \$/t
No1 Nehéz	0.025 %C, 0.017 %Si, 0.025 %P, 0.033 %S, 0.2 %Cr, 0.15 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.85	CS	160
No2 Nehéz	0.03 %C, 0.022 %Si, 0.028 %P, 0.035 %S, 0.26 %Cr, 0.18 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.75	CS	140
Visszatérő Gyengén ötvözött	0.17 %C, 0.04 %Si, 0.31 %Mn, 0.013 %P, 0.0014 %S, 0.26 %Cr, 0.4 %Ni, 0.001 %Nb, 0.015 %Ti, 0.005 %V, 0.14 %Mo +Fe bal.	3.0	CS	240
Lemez és szerke- zeti	0.25 %C, 0.25 %Si, 1.0 %Mn, 0.025 %P, 0.025 %S, 0.15 %Cr, 0.05 %Mo, 0.15 %Ni, 0.22 %Sn +Fe bal.	2.0	CS	290
Visszatérő Saválló acél	0.015 %C, 0.33 %Si, 1.64 %Mn, 0.014 %P, 0.002 %S, 18.32 %Cr, 8.08 %Ni, 0.01 %Nb, 0.004 %Ti, 0.01 %V, 1.3 %Mo, 0.16 %N +Fe bal.	3.0	CS	330
No1 Köteg	0.027 %C, 0.012 %Si, 0.12 %Mn, 0.01 %P, 0.006 %S, 0.032 %Cr, 0.02 %Ni, 0.001 %Ti +Fe bal.	1.2	FS	180

No2 Köteg	0.04 %C, 0.016 %Si, 0.12 %Mn, 0.014 %P, 0.008 %S, 0.04 %Cr, 0.03 %Ni, 0.0014 %Ti +Fe bal.	1.1	FS	170
DRI Direkt redukált vas	2.4 %C, 0.1 %P, 0.01 %S, 0.02 %Ti, 0.03 %Nb, 0.02 %V +Fe bal.	1.65	FS	220
Shredder	0.03 %C, 0.015 %Si, 0.02 %P, 0.03 %S, 0.12 %Cr, 0.1 %Ni, 0.02 %Mo +Fe bal.	1.5	VFS	200
No1 Bála	0.03 %C, 0.01 %Si, 0.02 %P, 0.02 %S, 0.08 %Cr, 0.06 %Ni, 0.01 %Mo +Fe bal.	1.5	VFS	210

D = darabos hulladék, A = apró hulladék, IA = igen apró hulladék

A 5.1. táblázatból nyert adatok segítségével képes leszel arra, hogy kiválasztott acélfajtára vonatkozó célösszetételhez közeli anyag keveréket állíts össze. Nehéz vagy lehetetlen pontosan elérni az összetételt, azonban egy szoros illeszkedés is elfogadható és bármely hiányzó elemet be lehet adagolni a következő műveleti lépésekben később a szimulációban.

Egy adag előírt tömege megközelítően **100 tonna acél**. Anyagaid kiválasztásakor ajánlatos a kemence kapacitás határai által adott tömeg és térfogat határokon belül maradni:

- .A hulladék tömegének határa = 90 tonna (a maradék 10 tonna kapacitásra még szükség lehet.további hozagok számára a folyamat során.)
- .A hulladék térfogatának határa max. 100 m³. Az aktuális határ igen nagy mértékben függ a felhasznált különböző hulladékfajta halmazsűrűségétől és attól is, hogyan vannak elosztva az adagoló kosarakban.

Figyelemmel kell lenni arra, hogy hulladék anyagok halmazsűrűsége különböző, amit szintén meg kell fontolni. Az olyan anyagok, mint a „visszatérő gyengén ötvözött” hulladék szorosabban van beadva és nagy a halmazsűrűsége, ezért adott tömegre kisebb a térfogata. Más anyagok, mint például a „sredderezett hulladék”, ami nagymennyiségű levegőt tartalmaz, amelynek ezért kisebb a halmazsűrűsége, nagyobb térfogatot fog igényelni.

Amikor az anyagok megválasztását végrehajtod, szembekerülsz a kérdéses keveréked árával. Azonban a tényleges ár (költség) kizárólag attól függ, hogy mennyit adagolsz be a kosarakba a következő lépésben.

Emlékezz arra, hogy nem csupán egy helyes út létezik a szimuláció céljainak eléréséhez és a választott legyártandó acél sikeres előállításához. Az eljárásmodok száma nagy, ami széles lehetőség skálát biztosít ahhoz, hogy rátalálj saját utadra a szimuláció végcéljainak elérése felé.

Ha készen vagy a nyersanyagok kiválasztásával, kattints a **Következő**-re majd a **Hulladék-térre**.

5.5.1.1 Alkalmazó interface

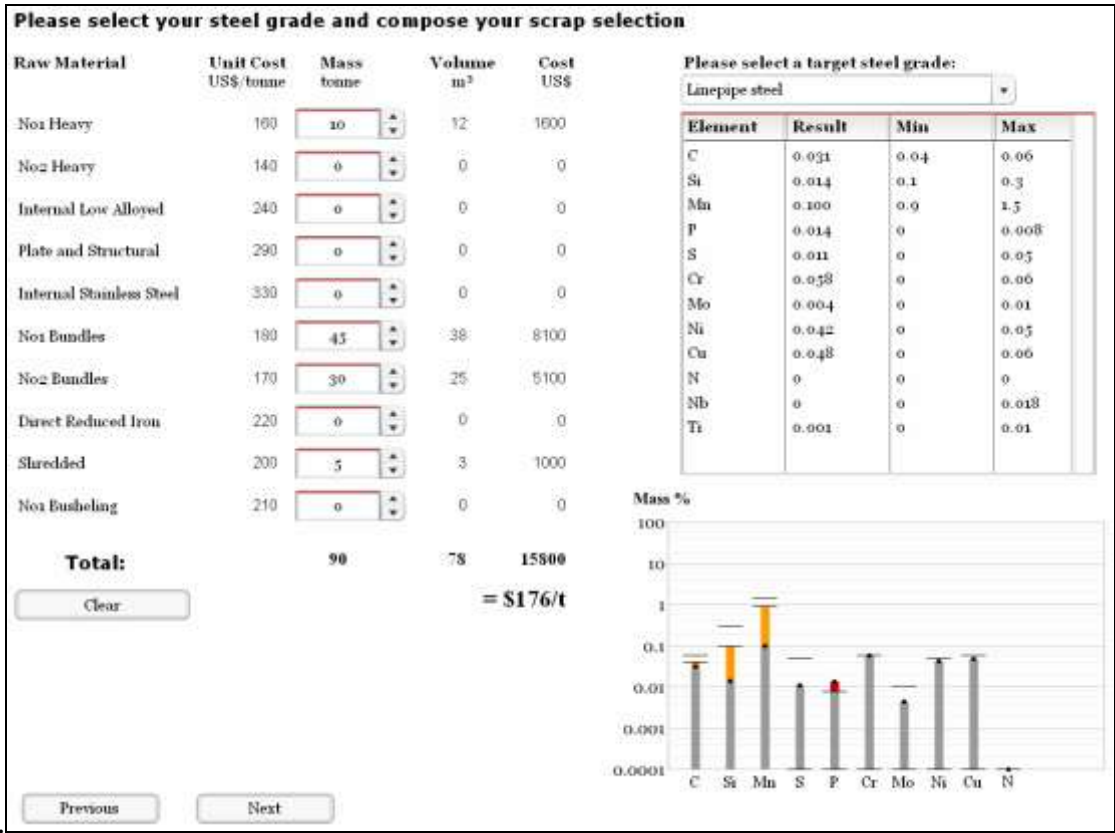
Ebben a példában az alkalmazó **szerkezeti acél** gyártását határozta el. A táblázat bemutatja a hulladék keverékben lévő minden elem számított hányadát minden elem célszámaival együtt. Az oszlopdiaagram vizuálisan támasztja alá az összesített

összetételt. A narancs és vörös oszlopok az egyes elemekre vonatkozó hiányt vagy felesleget érzékelteti. Az y-skála logaritmikus és csak az acélban levő legközönségesebb elemek vannak bemutatva.

Példa

Nehéz lehet a megcélzott összetétel nagypontosságú beállítása. Az 5.2. ábrán nyersanyagokat választottak ki annak érdekében, hogy csővezeték acél gyártásához alkalmas összetételt érjenek el. 10 tonna No1 Nehéz, 45 tonna No1 Köteg, 30 tonna No2 Köteg és 5 tonna Szedderezett hulladékot választottak ki. Az összes kiválasztott tömeg 90 tonna, ami a megengedett tömeg-maximum.

A célösszetételt megjelenítő oszlop-diagram azt mutatja, hogy a Si és Mn tartalom kisebb, mint a minimális cél-összetétel (narancs oszlop), ezért ezt a két elemet ötvö-zéssel ki kell egészíteni a folyamat során, ezért foszfortalanításra lesz szükség a cél-összetétel beállítása érdekében. Ezzel ellentétben a foszfor tartalom túl nagy (vörös oszlop).



5.2. ábra Acélminőségválasztás és ahhoz acélhulladék válogatás

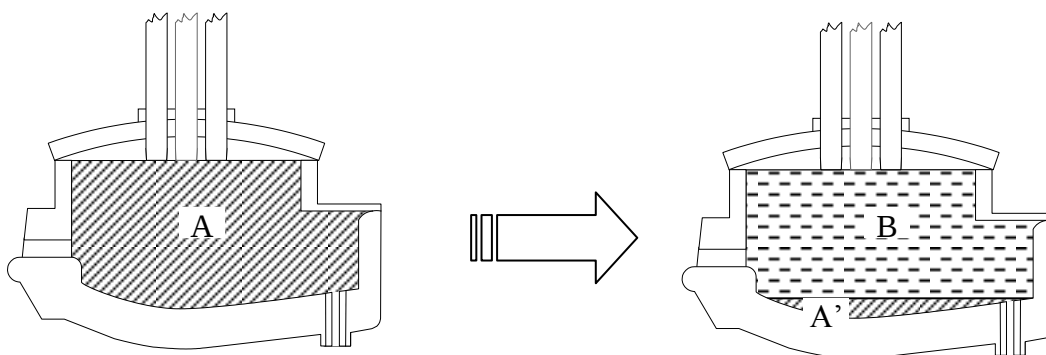
5.5.2. A hulladék berakása a kosarakba

Miután kiválasztásra kerültek a hulladék anyagok és a következő szakasz megkezdődik, az első feladat a hulladék elosztása a három előkészített kosárba. Kérem figyelembe venni:

- A kemence térfogata = 40 m³
- Mindegyik kosár tartalmát egymást követően kell megolvasztani annak érdekében, hogy a legjobban legyen kihasználva a kemence kapacitása.

Az első hulladék-kosárra vonatkozó térfogathatár a kemence térfogathatárára van beállítva (5.2. ábra). Mivel a folyékony acél sűrűsége jóval nagyobb, mint a hulladék halmazsűrűsége, az első kosár térfogata jelentősen fog csökkenni a megolvasztás után és több teret fog meghagyni a második, valamint a harmadik kosárból származó hulladéknak. Mivel bizonyos kemence-térfogatot az első kosárból származó olvadék (fürdő) foglal el, ezért a máso-

dik és a harmadik kosár térfogat-határait a kemence nettó kapacitása határozza meg, azaz (A – A’).



5.3. ábra Az „A” térfogattól az olvasztás előrehaladtával felszabadul a „B”-térfogat

Teljesen tőled függ, hogy hány kosarat akarsz felhasználni (1 és 3 között) anyagaind kemencébe szállításához és hogy milyen rendben kívánod a különböző hulladék anyagokat elhelyezni a kosarakban.

TANÁCS: Kerüld az egyes kosarak túlterhelését darabos hulladékkal, mivel az növeli az elektroda-törések lehetőségét. A javaslat az, hogy **az összes tömegnek nem több, mint 30%-a** álljon darabos hulladékból minden egyes kosárban. Ha szükséges, osszd szét darabos hulladékodat a három kosár között.

5.5.2.1. Felhasználó interface

A hulladék kosárba rakása a következő lépésekből áll:

- Kattints egy bunkerre a hulladék típusának kiválasztására. Alapértelmezésénél fogva lesz berakva az első kosár, ahogy jelzi a nyíl.
- Alkalmazd a „Tömegátvitel” szabályozót a szállítandó hulladék mennyiségének növelésére vagy csökkentésére.
- Anyagváltoztatás céljából kattints egy másik bunkerre. A kiürült bunkerek hatástalanítva lesznek. MEGJEGYZÉS: Mihelyt megváltoztattad a hulladék-típust, nem mehetsz vissza, hogy kivedd a korábban berakott anyagot a kosárból.
- Figyelmeztető jelzés jelenik meg, ha megkísérelöd a kosár túltöltését.
- Ha megvagy elégedve az első kosárral, kattints a második kosárra a berakás megkezdésére. MEGJEGYZÉS: Mihelyt kosarat cseréltél, nem mehetsz vissza, nem módosíthatod az előző kosár tartalmát.
- Ha befejezted kosaraid megrakását, kattints a **KÖVETKEZŐ**re a folytatás céljából.

Példa

Három kosár áll rendelkezésre a hulladék-téren. Minden egyes kosárnak 40 m³ a térfogata. Az előző példa folytatásaként a 4.3. ábra a vezetékcső acélfajta gyártásához kiválasztott hulladékot részben berakták a kosarakba. Az első kosár megtelt hulladékkal és a második kosár anyaga van kiválasztás alatt. Megjegyzendő, hogy az alkalmazó már éppen átszállított

15 tonna No2 Köteg- anyagot a 2 # kosárba. A fekete terület a 2# és a 3# kosarakban a megelőző kosárból származó hulladék folyékony köbtartalmára utal.

Scrap Yard

Load your selected material into the 3 baskets in order. Think about the volume limits and amount of coarse scrap in each basket. Click on the next basket to start loading it. Note that once you have left a basket, you cannot go back to alter its contents.

Scrap bins

No1 Heavy

5 t

6 m³

0 t

0 m³

Coarse Scrap

0.85 tonnes/m³

No2 Heavy

0 t

0 m³

Coarse Scrap

0.75 tonnes/m³

Internal Low Alloyed

0 t

0 m³

Coarse Scrap

3 tonnes/m³

Plate and Structural

0 t

0 m³

Coarse Scrap

2 tonnes/m³

Internal Stainless Steel

0 t

0 m³

Coarse Scrap

3 tonnes/m³

No1 Bundles

20 t

17 m³

0 t

0 m³

Fine Scrap

1.2 tonnes/m³

No2 Bundles

0 t

0 m³

Fine Scrap

1.2 tonnes/m³

Direct Reduced Iron

0 t

0 m³

Fine Scrap

1.65 tonnes/m³

Shredded

5 t

3 m³

Very Fine Scrap

1.5 tonnes/m³

Not Bundling

0 t

0 m³

Very Fine Scrap

1.5 tonnes/m³

Transfer mass / t

15

Scrap baskets

Total selected mass / tonnes:

#1

Current volume: 39 m³

#2

Volume limit: 34 m³

Current volume: 13 m³

#3

Volume limit: 32 m³

Current volume: 0 m³

Next

5.4. ábra Hulladékválogatás

5.6. Kemence művelet

Elérkeztél az elektrokemencéhez. Ahogyan említést történt a bevezetőben, a salak fontos szerepet játszik a folyamatban. Ezért a salakképző anyagokat is be kell adagolni ebben a szakaszban. Most a kosarak tartalmát egymás után be lehet adagolni az elektrokemencébe, így a kiválasztott hulladékokat meg lehet olvasztani.

5.6.1. A kemence berakása

Használd a darut a kosarak felemelésére és kemencéhez szállítására. Bizonyosodj meg arról, hogy a tetőt már elforgatták-e. Mihelyt az első kosár a kemence felett van, kattints az ajtó-ikonra a kosáron, hogy kiüsitse tartalmát a kemencébe. Mozdítsd el a kosár/darút a tető bezárása előtt.

5.6.2. Elektródák

A villamos teljesítmény három elektróda közt oszlik meg, ezek olvasztják meg a hulladékot ívet húzva egymás és a hulladék között. Az elektródák a folyamat alatt fokozatosan kopnak különböző sebességgel az áram bekapcsolásától kezdve. Bizonyos helyzetkiiagazítást kell végrehajtani az elektródákon annak érdekében, hogy biztosak legyünk abban, hogy mind a három kapcsolatban van az anyaggal és így az energiaátvitel hatékony.

Az elektródák törekeny természetűek és **200 US\$/elektróda** költséggel fogynak. Megjegyzendő, hogy ezt a költséget is hozzá kell adni összes költségedhez elektróda-törés esetében.

5.6.3. Teljesítmény-fokozat szabályozás

Négy fokozat szabályozás van a villamos teljesítményre vonatkozóan:

5.3. táblázat Fokozat szabályozás és a vonatkozó villamos teljesítmény-szintek

Fokozat szabályozás	Teljesítmény-szint
0	0 MW
1	75 MW
2	90 MW
3	105 MW
4	120 MW

Ezek mindegyikét ki lehet választani a hevítés és a beolvasztás alatt, a teljesítményigénytől függően. A villamos teljesítménnyel kapcsolatos **költség 0,57 \$ / kWh**.

Amint befejeződött a beolvasztás, alkalom nyílik a pillanatnyi összetétel elemzésére próbát venni. A vizsgálat segíthet neked abban, hogy döntéseket hozzál a következő tevékenységekre, például ötvözők hozzáadására, az oxigén befúvatásának folytatására, stb. vonatkozóan.

5.6.4. Vízhűtéses panelek.

Amint az adag alatt fokozatosan növekszik a hőmérséklet, az elektrokemence rendkívüli termikus körülményeknek van kitéve. A kemence falainak és a fenéknek különlegesen nagy a túlhevítési kockázata, ezért vízhűtéses panelekkel van felszerelve. Még így is állékonysága korlátozottá válhat túl nagy hőmérsékleteken. Acélfajtád megcélzott követelményeinek elérése miatt az is fontos, hogy tartós munkakörülményeket teremtsünk a kemencére (u.m. változtatás a fokozat szabályozásban).

A vízhűtéses panel hőmérsékletekről egy szín-sémából nyerhetünk információt:

- Minden szekció zöld, $T_{\text{víz}} < 75^{\circ}\text{C}$
- Egy narancs szekció, $T_{\text{víz}} = 75 - 90^{\circ}\text{C}$
- Egy vörös szekció, $T = 90 - 105^{\circ}\text{C}$
- Minden szekció vörös, $T > 105^{\circ}\text{C}$

MEGJEGYZÉS: A teljesítményt (áramot) automatikusan kikapcsolják, ha a víz hőmérséklete eléri a 110°C-t. Nem lesz képes bekapcsolni a teljesítményt azelőtt, mielőtt 80°C-ra le nem süllyes a hőmérséklet.

5.6.5. Adalékok

Az egész beolvasztás és kikészítés során adalékolhatsz anyagokat az ötvöző elemek szintjének növelésére, az acél dezoxidálására, az acél kéntelenítésére vagy a salak tömegének növelésére. Az adalékok teljes listáját lehet látni a 4.4. táblázatban.

Segítségként, hogy hogyan kell pontosan kiszámítani az ötvöző adalékokat, nézd meg az 5.8.3 fejezetet

5.4. táblázat A beolvasztás és a kikészítés során rendelkezésre álló adalékok listája

Adalékok	Összetétel	Halomsűrűség	Alak	Ár
----------	------------	--------------	------	----

		tonna m ⁻³		\$/tonna
Al	99,15%Al,0,82%Fe,0,03%Cu	2,4	Kavics	1400
Karbon	99,9%C, 0,03%Cu	1	Por	280
Cr-karbüré	7,82%C,0,23%Si,0,021P,0,051%S, 70,11%Cr,0,0092%Ti	3,5	Kavics	590
Cr-karbüré (kis S)	8,12%C,0,34%Si,0,017%P,0,024%S, 69,92%Cr	3,5	Kavics	660
Dolomit	38,5%MgO, 2%SiO ₂ 0,005%P, 0,15%S + CaO a többi	1	Por	120
Szállópor	20,03%Cr,11,2%Ni,4,44%Mn, 0,91%Si,11,2%Ni,4,44%Mn, 0,001%S + Fe a többi	0,9	Por	120
FeMn,HC	76,5%Mn,6,7%C,1,0%Si,0,03%S, 0,3%P + Fe a többi	4,0	Kavics	350
FeMn,LC	81,5%Mn,0,85%C,0,5%Si,0,1%S 0,25%P, + Fe a többi	4,0	Kavics	600
FeMo	0,044%C,0,14%Si,0,044%P, 0,092%S,62,02%Mo + Fe a többi	6,0	Kavics	16800
FeSi75	0,08%C,60,3%Si,0,014%P, 0,002%S,1,23%Al,0,05%Ti + Fe	2,5	Kavics	700
FeSi75 (kisTi)	0,008%C,75,6%Si,0,003%P, 0,024%Al,0,014%Ti + Fe a többi	2,5	Kavics	840
FeV	0,25%C,0,72%Si,0,031%P,0,081%S 1,23%Al,78,82%V + Fe a többi	3,5	Kavics	8400
Folypát	20%CaO,20%MgO,20%SiO ₂ , 0,001%P,0,06%S + CaF ₂ a többi	1	Por	180
Vasoxid	0,3%Al ₂ O ₃ 0,5%CaO,0,1%MgO, 0,001%P + FeO a többi	1,8	Por	140
Égetett mész	1,2%Al ₂ O ₃ ,1,8%MgO,2,1%SiO ₂ , 0,01%P,0,01%S, + CaO a többi	1	Por	120
Hengerműi reve	0,65%C,0,4%Si,0,60%Mn,0,019%P, 0,002%S,0,2%Cr,0,25%Ni,0,05%V, 0,1%Mo + Fe a többi	1,6	Por	0
SiC	30%C,70%Si	1,5	Kavics	610

SiCr	1,82%C,25,33%Si,0,014%P, 0,01%S, 38,23%Cr + Fe a többi	3,5	Kavics	940
Forgács	0,03%P,0,113%S,0,698%Cr, 0,538%Mo +Fe a többi	1	IA	110

5.6.6. Olvasztás és kikészítés

5.6.6.1. Salakképző adalékok

A salak olyan tulajdonságai, mint a viszkozitás, kén-kapacitás, foszfor-kapacitás, stb az összetétel és a hőmérséklet függvényei. Ennek a szimulációnak egyik fő célja megfelelő salaktulajdonságok fenntartása olyan salakképző anyagok adagolásával, mint az égetett mész, dolomit és/vagy a folyópát. A salakba jutó fémoxidok némelyike savas, így bázikus salakképző anyagok hozzáadásával segítjük a salak bázicitásának megfelelő szinten tartását. Nagy salak-bázicitás (azaz nagy égetett mész:kovasav arány) előnyös a foszfortalanításra is, de figyelemmel kell lennünk arra, hogy ne telítsük túl a salakot égetett mésszel, mert ez a salak viszkozitását növeli, ami által a salak hatékonysága csökken.

TANÁCS: 1,2 és 2,5 közötti salak bázicitás segít habos salak elérésében és jó feltételeket teremt a kéntelenítésre.

5.6.6.2. Karbon és oxigén befúvatása

Az anyagok megolvadása alatt és azt követően számos vegyület és elem kezd reakcióba lépni egymással. Annak érdekében, hogy elérjük az acélban az egyes elem megkívánt szintjét, a reakciós folyamatokat megkönnyíthetjük oxigén lándzsával való acélfürdőbe fúvatásával.

Az oxid-reakciók egyike során szénmonoxid CO (g) képződik, ami különösen fontos a habos salak kialakítása szempontjából. A lándzsán keresztül történő karbonbefúvás a salakfázisba CO-buborékokat képez az oxigénnel való reakció eredményeként. Ezek a buborékok aztán segítenek a salak „habossá” tételében. A habos salak védi az acélfürdőt az atmoszférával való reakcióba lépéstől és egyben növeli is a villamos hatékonyságot, lefedve az elektródákból kilépő ívet. Ez termikus hatékonyságot biztosít és lehetővé teszi, hogy a nagyobb fe- szültséggel dolgozzunk a kemence falainak és tetőjének meghiúsodása nélkül. Az ívek lefedése abban is segít, hogy megelőzze az ívnek kitett nitrogén disszociálását és acélfürdőbe jutását.

Ebben a szimulációban a karbon és oxigén befúvatásával kapcsolatos költségek:

- Lehetséges karbon befúvatási sebesség: **50 – 150 kg / perc**
- Költség: **0,28 \$ /kg**
- Lehetséges oxigénbefúvatási sebesség: **100-150 Nm³ /perc**
- Költség: **0,10 \$ / Nm³**

5.6.6.3 A foszfor és a kén eltávolítása

Sajnálatosan a foszfor eltávolításának körülményei ellentétesek a kén eltávolítását elősegítő feltételekkel. Ebből kifolyólag ha be is vittük ezeket a salak fázisba, visszajuthatnak az acélba.

Foszfor

A foszfor visszatartása a salakban a hőmérséklettől és a folyékony acél oxigén-aktivitásától, valamint a salak bázicitásától és FeO-tartalmától függ. Nagyobb hőmérsékleteken vagy kisebb FeO-szinteken a foszfor visszamegy a salakból az acél-fürdőbe. Ezért a foszfor eltávolítását szokásosan a lehető legkorábban hajtják végre az adag során, amikor a hőmérséklet alacsony.

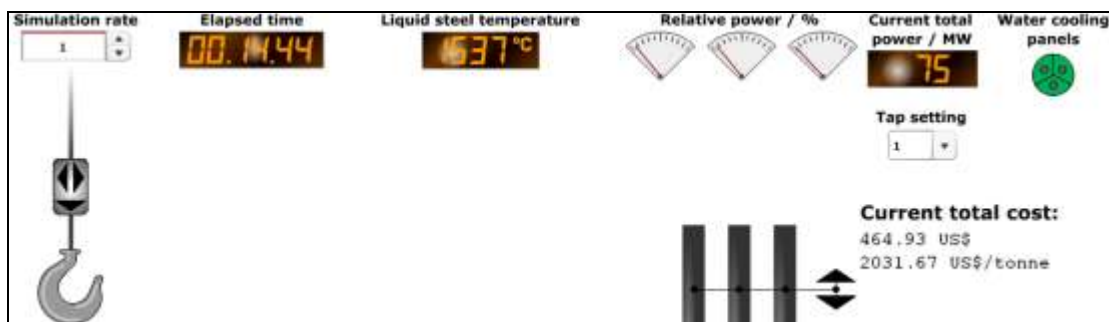
Kén

A kén folyékony acélból való eltávolítása érdekében fontos egy szulfidképző ágens, például kalcium vegyület felhasználása. A szulfidképző reakciókat redukáló atmoszféra, kis oxigén-szint, nagy salak-tömeg és nagy hőmérséklet segíti elő. Mindezeket az adag későbbi során érik el.

5.6.7. Csapolás

A csapolás akkor következik be, amikor megnyomjuk a kemence-test alatti fordító gombot. A folyékony acél üstbe csapolásának megindításával ténylegesen befejeződik a szimuláció folyamata. Amikor befejeződik a csapolás, azaz már nincs több acél a kemencében, a szimuláció automatikusan az összegező ernyőn végződik.

5.6.8. Alkalmazó interface



5.5. ábra Felhasználói felület a Kemence képernyő felső részén

A kemence képernyő felső részén az alábbiakkal találkozunk:

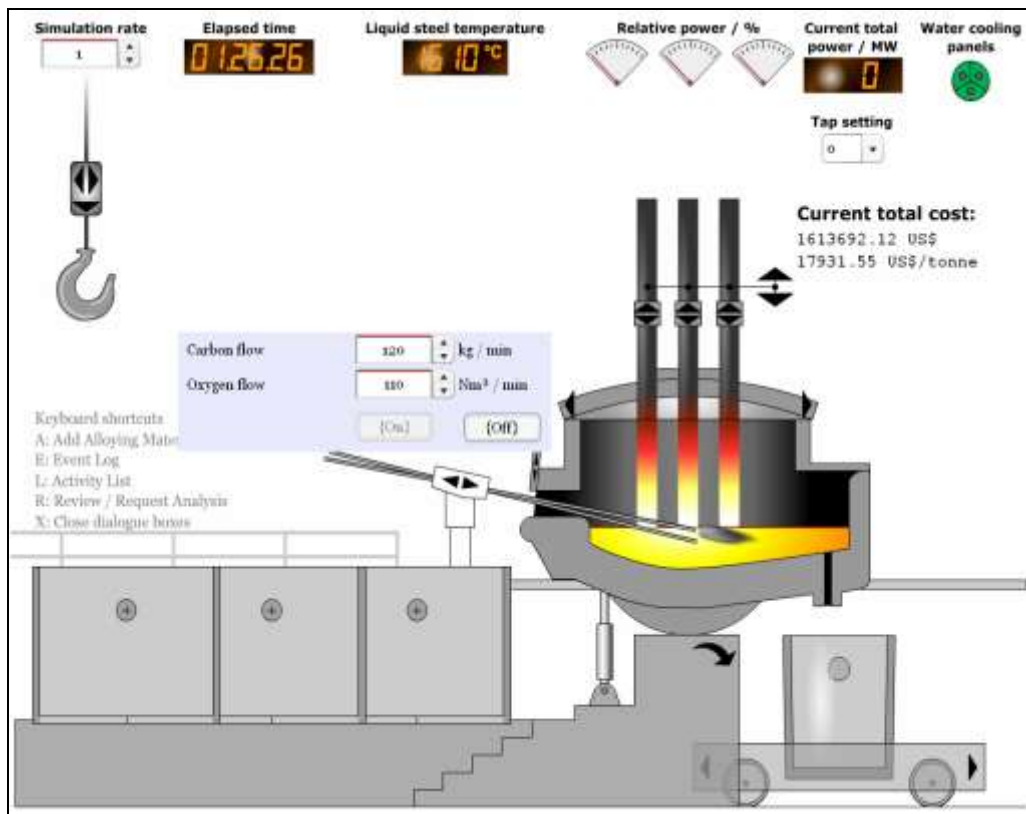
- **Szimulációs sebesség** – kattints ide a szimuláció sebességének növelésére vagy csökkentésére 1 és 32 között.
- **Eltelt idő** – jelzi a szimuláció kezdetétől eltelt időt ÓÓ:PP:MM-ben.
- **Folyékony acél hőmérséklete** - °C ban kifejezve.
- **Relatív teljesítmény** – mutatja a pillanatnyi teljesítményt minden elektródára. Használható annak megállapítására, hogy mikor olvadt meg minden hulladék és még fontosabban, mennyi villamos energia ment át az elektródáktól a hulladékba vagy az acélfürdőbe.

- **Pillanatnyi összes teljesítmény** – MW-ban kifejezve.
- **Fokozatbeállítás** – kattints ide a villamos fokozat beállítására 0 és 4 között, a megfelelő teljesítmény-szint a 15. táblázatban.
- **Vízhűtéses panelek** – a víz hőmérsékletet mutatja a hűtő rendszerben, lásd a 4.6.4 fejezetet.

Az ernyő felső részén levő információkon túl az elektródák és a hulladék felületi hőmérsékletére vonatkozó vizuális bemutatás is van. A hulladék színe szürkétől vörösig változik a hőmérséklet emelkedésével. Másrészt az elektródák gyorsan hevülnek fel és ezért a szín is gyorsan változik, bemutatva az elektróda különböző helyeinek felszíni hőmérsékletét.

- **Hulladék kosarak** a horog felett kis ellenőrző dobozzal ellátott darú segítségével a kemencéhez jutnak.
- **Kemence-tető** kinyílik vagy zár, amint a valamelyik oldalon levő gombot megnyomjuk. Figyelemmel kell lenni arra, hogy az elektródákat teljesen felemeljük a tető nyitása előtt.
- **Elektródákat** együttesen emeljük vagy süllyesztjük a fel és le nyilak alkalmazásával a kemence bal oldalán.
- **Egyes elektródák utánfogása** fel és le is szükséges, azaz illeszkedés az elektróda csúcsán jelentkező kopáshoz. A fel és le való utánfogás elérhető mindegyik elektródán a fel vagy le nyilak megnyomásával.

A karbon és oxigén lándzsákat a salakajtó-nyíláson keresztül tolják be vagy húzzák vissza. A salak ajtó nyitása vagy zárása az ajtóra kattintással. Amint teljesen betolták a karbon és oxigén lándzsát, megjelenik a karbon és oxigén áramlás szabályozója. Aztán lehetséges a befűtési sebesség beállítása vagy a C/O befűtés leállítása.



5.6. ábra Kemence képernyő

5.6.9. Billentyűzet gyors beavatkozásra

Attól függetlenül, hogy hogyan tervezted meg szimulációs utadat, szükséged lesz néhány beavatkozásra az adag során. Erre való néhány beavatkozó billentyűzet.

5.6.9.1. Ötvözők beadagolása (A - billentyűzet)

A lenyomásával a billentyűzeten választhatsz az ötvöző anyagok között. Ha rendelkeztél, rendelkezésed összes költségét is megkapod.

5.6.9.2. Eseménynapló bemutatása (E - billentyűzet)

Az E lenyomásával az eseménynaplóhoz jutsz. Az eseménynaplót le lehet másolni a szimulációból, vagy közvetlenül ki lehet nyomtatni az egér baloldali kattintásával és aztán a dialógus-dobozból való nyomtatás megválasztásával.

5.6.9.3. Analízis ismertetés (R - billentyűzet)

Az R lenyomásával a kemencében levő keverék pillanatnyi összetételét kapod meg. Attól a pillanattól kezdve, amikor elkezdted ezt a műveletet, mindig megkapod a megelőző próba elemzését és a „Végy egy új próbát”-ra kell kattintanod új próba nyeléséhez. A narancs számok mutatják az elemek nem elég nagy koncentrációját a keverékben, a vörös számok a fölös koncentrációkat és a zöld számok az acél fajta megcélzott összetételi tartományában fekszenek.

. Egy próba költsége **40 \$**

5.6.9.4. Dialógus doboz zárása

Felmerülhet, hogy ki kell lépni valamely dialógus dobozból (például riasztás, vezérlés, stb.), ilyenkor kattints az X-re a billentyűzeten.

5.7. Az eredmények összegzése

Az összesített képernyő-kijelzések a futtatás eredményeit adják meg az összes, US\$/tonnában kifejezett gyártási költséggel együtt. Amennyiben teljesítetted az összes kritériumot az acélfajtára vonatkozóan, a felső jobb sarokban egy ikon látható a steeluniversity.org igazolására. Sikeres futtatásod megjutalmazására kinyomtathatsz egy igazolást. Ennek érdekében kattints az ikonra, ha felülvizsgáltad az összegezést.

Az összegező képernyőn az esemény-áttekintés is megjelenik az E lenyomásával. Láthatod az acél összetételét is az A lenyomásával és a salak-elemzést is a megfelelő S –re kattintással.

Summary of results:			
Simulation settings: User level: University Student Steel grade: Construction Steel			
	Target	Actual	
Final steel composition	Click to view analysis...		✓
Final slag composition	Click to view analysis...		
Total time / minutes	1H:20M	1H:8M	✓
Tap temperature / °C	1630-1660 °C	1623 °C	✓
Electrical energy	30891 kWh	343 kWh/tonne	
Cost breakdown:			
Power		17608 US\$	
Scrap		16200 US\$	
Additions		0 US\$	
Other consumables		0 US\$	
Total cost		33808 US\$	

5.7. ábra Összegző képernyő

5.8. Elvi alapokul szolgáló tudományos összefüggések

Ez a fejezet néhány olyan, fontosabb tudományos összefüggést foglal össze, amelyek alátámasztják az ezzel a szimulációval kapcsolatban releváns kémiai és termodinamikai ismereteket.

5.8.1. Hőmérséklet

Számítsd ki a likvidusz hőmérsékletet az irodalomban talál képlet segítségével:

$$T_{\text{likv}} = 1537 - \left[\begin{array}{cc} 78\%C & +7.6\%Si + 4.9\%Mn + 34\%P \\ +30\%S & +5\%Cu + 3.1\%Ni + 1.3\%Cr \end{array} \right]$$

(5.1)

5.8.2. Fontos reakciók

Az olyan elemeknek, mint az alumínium, szilícium, króm, karbon, foszfor és vas, nagy az oxigénhez való affinitása és mivel viszonylag kicsi a sűrűségük, felúsznak a salakfázisba. Mindezen reakciók exotermikusak, azaz többlet energiát szállítanak a hulladék megolvasztásához és felhevítéséhez. A szimuláció termodinamikai és kinetikai modelje feltételezi, hogy az a reakció, amely a legkisebb oldott oxigén tartalmat biztosítja, fogja szabályozni az acélban oldott oxigén aktivitását.

A következő reakciók nagymértékben exotermikusak és a 5.5. táblázatból nyert információk és a becsült munkahőmérséklet segítségével kiszámíthatod a reakciókból származó hevítő energiát

5.5. táblázat Eexotermikus reakciók

Reakció	$\Delta G^{\circ}=A + B \times T$	
	A Jmol ⁻¹	B Jmol ⁻¹ K ⁻¹
2 <u>Al</u> + 3 <u>O</u> = Al ₂ O ₃	-1243950	395,79
<u>C</u> + <u>O</u> = CO (g)	-21790	-39,75
2 <u>Cr</u> + 3 <u>O</u> = Cr ₂ O ₃	-823545	360,79
Fe + <u>O</u> = FeO	-121090	52,5
<u>Si</u> + 2 <u>O</u> = SiO ₂	-571935	225,28

5.8.3. Az ötvöző adagolás számítása

Ötvözőket számos okból adagolunk a kemencébe

- Az acél végső összetételének beállítására
- .Az acél dezoxidálására az oxigénnel való reagálás és olyan oxidok képzése segítségével, amelyek a salakban abszorbeálódnak
- .A salak összetételének módosítására, hogy olyan salakhoz jussunk, amely hatékonyabb a kéntelenítésre és a dezoxidálásra.

5.8.3.1. Adalékok számítása a célösszetétel elérésére

A legtöbb esetben, mikor ötvözőket adagolunk az acélba, a hozaganyag egynél több elemet tartalmaz. Az olyan adalékanyagokat, amelyek 2 vagy több komponens keveréke, néha mester ötvözetnek nevezünk. Ilyen adalékok felhasználásakor számításba kell venni a mester ötvözetben levő megkívánt elem mennyiségét, valamint az elemre vonatkozó kihozatali arányt. A „kihozatali arány” egyes elem azon mennyisége, amely ténylegesen növeli az elem mennyiségét a folyékony acélban, szemben a salakba jutó hányaddal stb.

$$m_{\text{additive}} = \frac{100 \times \Delta\%X \times \text{ladle mass}}{\%X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X}$$

ahol

$$m_{\text{adagolt}} = \frac{100 \times \Delta\%X \times \text{üst tömeg}}{\%X \text{ a mester ötvőben} \times X \text{ kinyerési aránya}} \tag{5.2}$$

Példa

250 tonna acél 0,12 % Mn-t tartalmaz. Számítsd ki, hogy mennyi nagy karbontartalmú ferromangánt (HC FeMn) kell beadagolni 1,4% Mn tartalom eléréséhez. A felhasznált ferroötvözet 76,5% Mn-t tartalmaz és a Mn-re vonatkozó tipikus kihozatali arány 95%. Behelyettesítve ezeket az értékeket adódik:

$$m_{\text{HCF eMn}} = \frac{100\% \times (1.4 - 0.12)\% \times 250,000 \text{ kg}}{76.5\% \times 95\%} = 4,403 \text{ kg}$$

Egyéb elem felvétele

Mester ötvözet beadagolásakor az is fontos, hogy tisztában legyünk vele és ha szükséges, számításba is vegyük a többi elem hatását az acél összetételére, A **felvételek** mennyisége (azaz a növekmény) egy adott elemre vonatkozóan a 34. egyenlet átrendezésével adódik:

$$\Delta\%X = \frac{m_{\text{additive}} \times \%X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X}{100 \times \text{steel mass}}$$

ahol

$$\Delta\%X = \frac{m_{\text{adagolt}} \times \%X \text{ a mester ötvözőben} \times X \text{ kinyerési aránya}}{100 \times \text{acéltömeg}} \quad (5.3)$$

Példa

Az előző példából számítsd ki a karbonfelvétel mennyiségét, a HC FeMn 6,7% Mn-t tartalmaz és 95% a kihozatali arány:

$$\Delta\%C = \frac{4,403 \text{ kg} \times 6.7\% \times 95\%}{100\% \times 250,000 \text{ kg}} = 0.112\%C$$

Világos, hogy ilyen karbon-növekedés kritikus lehet bizonyos kis karbon tartalmú és ultra alacsony karbontartalmú acélfajták esetében. Ilyen esetekben szükségessé válhat a sokkal drágább kis karbont tartalmazó vagy nagy-tisztaságú ferromangán felhasználása.

Keveredési idő

Fontos tudni, hogy az üstbe adagolt ötvözők **nem** eredményezik azonnal az acél összetételének megváltozását, mert bizonyos időt vesz igénybe a feloldódásuk. A szimulációban légy meggyőződve arról, hogy elégséges időt engedtel a beadott ötvözők feloldódására a következő trendek megfigyelésével:

- A por és finom részecske-alakú adalékok gyorsabban oldódnak fel, mint a durva részecskék vagy kavicsok;
- A keveredési idők nőnek a hőmérséklet csökkenésével.

5.8.4. Dezoxidáció

Az alumínium igen hatékony dezoxidáló szer és az alábbi reakció szerint szabályozza az oxigén aktivitást a folyékony acélban:



amelyre a vonatkozó egyensúlyi állandó az alábbi képlettel adódik:

$$K_{\text{Al-O}} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{O}}^3 \cdot a_{\text{Al}}^2} \quad (5.5)$$

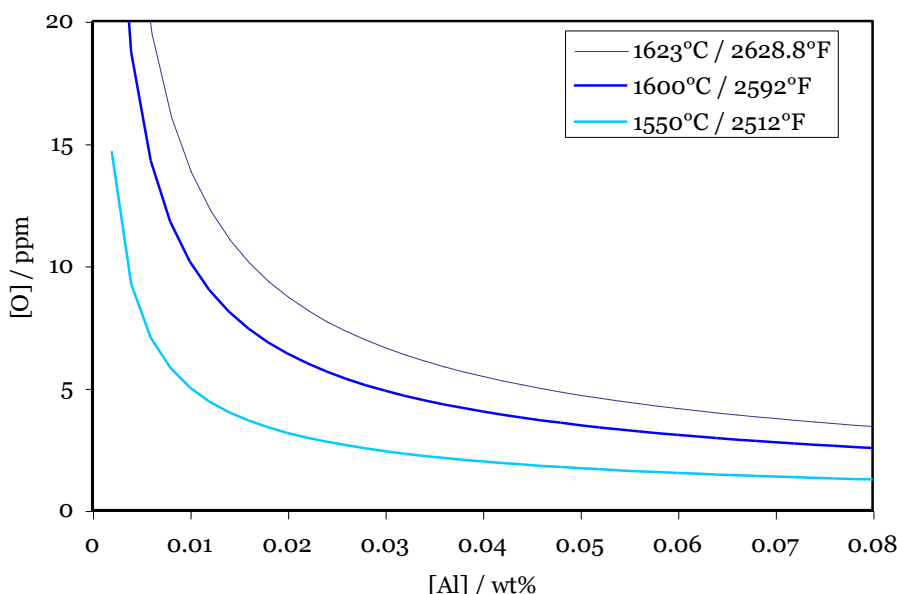
ahol

$$\log K_{\text{Al-O}} = \frac{62,780}{T[\text{K}]} - 20.5 \quad (5.6)$$

Az (5.6) egyenlet átrendezésével az oxigén aktivitás:

$$a_{\text{O}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 \cdot K_{\text{Al-O}}}} \quad (5.7)$$

Az 5.8. ábrában az a_{O} és a_{Al} közötti összefüggés van felrajzolva három különböző hőmérsékletre. Ebből azt látjuk, hogy az **aluminiummal dezoxidálás kisebb hőmérsékleteken hatékonyabb.**

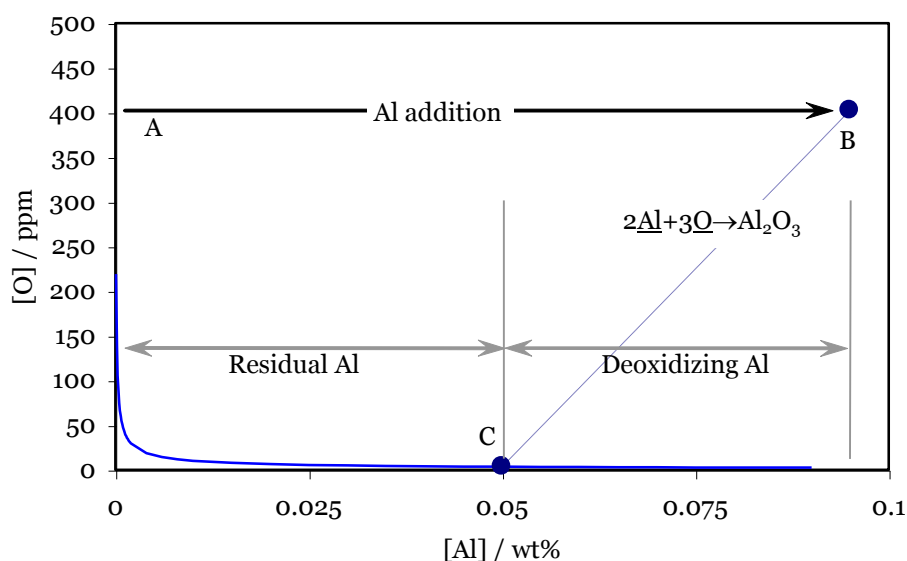


5.8. ábra Al-O egyensúlyi görbe három különböző hőmérsékleten

Bár az aluminium egyike a legerősebb dezoxidenseknek, ne felejtsük el, hogy az oldott oxigént más elemmel is lehet szabályozni. Ezért a többi elemre is fontos kiszámítani az egyensúlyi állandókat (lásd 5.8.2 fejezetet) annak meghatározására, hogy melyik elem lép reakcióba az oxigénnel és képez oxidokat, míg a többi elem oxidjai redukálódnak.

- Számítsd ki az oxigén aktivitást az alábbi reakció termodinamikai egyensúlya alapján az Al, C, Cr, Fe és a Si elemekre:
- $x.\text{Me} + y.\text{O} \leftrightarrow \text{Me}_x\text{O}_y$

Állapítsd meg, hogy melyik reakció eredményezi a legkisebb oxigén aktivitást.



5.9. ábra Az adagolandó Al számítása az oxigén aktivitásának csökkentésére

Tételezzünk fel 400 ppm kiinduló oxigén tartalmat és alumínium-mentességet, ezt A pont reprezentálja a diagramon.

Mintegy 0,095% alumínium hozzáadásra utal a B pont. Mivel ez jóval az egyensúlyi Al-O görbe felett van, az alumínium és az oxigén reakcióba lép, Al_2O_3 képződik. Sztöchiometriát feltételezve 2 Al-atom (=54 tömegegység) reagál 3 oxigén-atommal (=48 tömegegység), így követve a görbét egészen a C pontig – ami az egyensúlyi koncentráció ezen a hőmérsékleten. A dezoxidáláshoz szükséges súlyszázalék alumínium ezért:

$$\% \text{Al}_{\text{dezox}} \approx \frac{54}{48} [\% \text{O}]_{\text{kezdő}} \quad (5.8)$$

Amikor a **beadagolandó összes alumíniumot** számítjuk ki, akkor ezt az értéket hozzá kell adni az acél megcélzott (vagy visszamaradó) Al tartalmához.

Példa

450 ppm (0,045%) oxigén-tartalmú acélt kell Al-mal dezoxidálni a csapoláskor. 60%-os kihozatali arányt feltételezve és 0,04% előírt Al-tartalmat, számítsd ki a 98%-os Al szükséges mennyiségét.

$$\begin{aligned} &\text{Alumínium a dezoxidálásra (az (5.8) egyenlethől)} \quad (54/48) \times 0,045\% = 0,051\% \\ &+ \quad \text{Előírt alumínium } 0,040\% \\ &= \quad \text{Összes szükséges alumínium} \quad 0,091\% \end{aligned}$$

Most használd fel az (5.4) egyenletet az ötvöző beadagolandó tömegének kiszámítására.

$$m_{\text{Al}} = \frac{100\% \times 0,091\% \times 250,000 \text{ kg}}{98\% \times 60\%} = 386 \text{ kg} \quad (5.9)$$

5.8.5. Habos salak

A karbonnak az acélba és az oxigénnek a salakba fúvatásával CO buborékok képződnek és **habos salak** képződik. A következő reakció megy végbe:



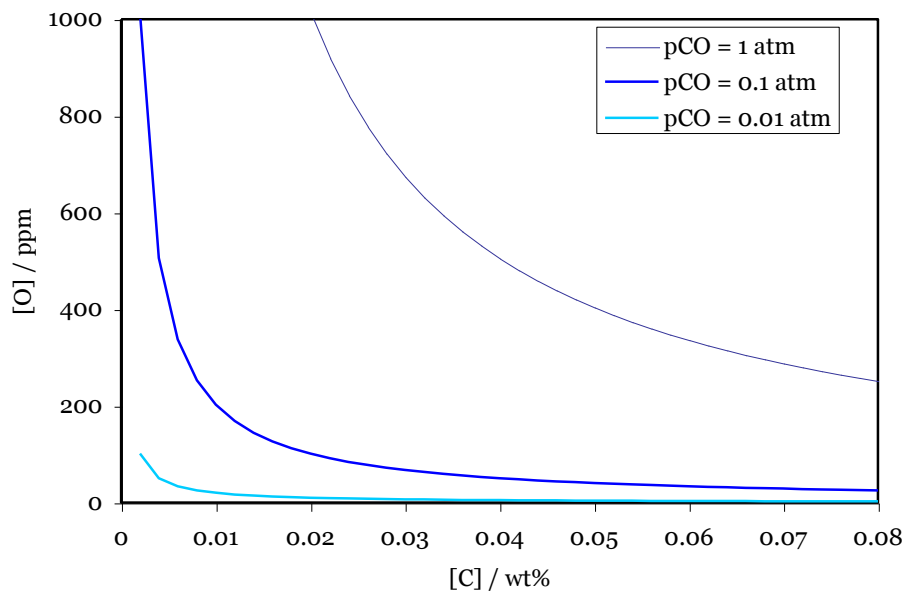
amelyre az egyensúlyi állandó az alábbi egyenletből:

$$K_{C-O} = \frac{P_{CO}}{a_C \cdot a_O} \quad (5.11)$$

Kis koncentrációkra a C és O aktivitások koncentrációikkal egyenlő, így:

$$K_{C-O} = \frac{P_{CO}}{[\%C] \cdot [\%O]} \quad (5.12)$$

$$\log K_{C-O} = \frac{1.168}{T[K]} + 2.07 \quad (5.13)$$



5.10. ábra Al-O egyensúlyi görbe három különböző hőmérsékleten

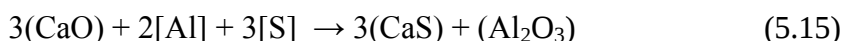
Fontos az is, hogy fenntartsuk az **1,2 és 2,5 közti salakbázicitást** a salak habosításának megkönnyítésére. További korlátozás, hogy ne legyen túl sok szilárd (maximum 5 tonna) vagy túl kevés folyékony, legalább 50 tonna.

A bázicitást az alábbi egyenlet felhasználásával számítjuk ki:

$$\text{Bázicitás} = \frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)} \quad (5.14)$$

5.8.6. Kéntelenítés

Bizonyos acélfajták, mint például a gáz és olajvezetékhez használtak igen kis kéntartalmat igényelnek a jobb hegesztési és alakítási tulajdonságok biztosítására. A kéntelenítést a kénnek a folyékony acél és salak közti cserélődése segíti elő. A végbemenő reakciókat az acélban oldott alumínium és kén tartalom uralja valamint az égetett mész, alumíniumoxid és kalciumszulfid tartalom a salakban. Általában ezt az alábbi reakció írja le:



A gyakorlatban az elektrokemencében az alábbiakkal érik el a kéntelenítést:

- **Szintetikus CaO-alapú kéntelenítő salak** beadagolásával az üstbe csapoláskor;
- Az acél **alumíniumos dezoxidálásával** igen kis oxigénaktivitásig (különben az Al elsősorban az oxigénnel reagál);

Égetett meszet, dolomitot vagy folyópátot a szimuláció bármely pontjában be lehet adagolni. Nyomd meg **A.t**, hogy hozzájuss az **Adagolj Ötvöző Anyagokat** dialógus dobozhoz, amelyből kiválaszthatod a beadagolandó anyagokat

- Határozd meg a beviendő **adalékok tömegét**. Minél több salakképzőt adagolsz be, annál több kén eltávolítani, de ezt szembe kell állítani a salak költségével.
- A **salak összetételét** becsülni kell, mivel a salak összetételének megelemzése túl sok időt venne igénybe a folyamat alatt. A salakelemzés azonban rendelkezésre áll a szimuláció összegezésében. Fontos megkísérelni és biztosítani a nagy CaO/Al₂ arányt, mivel egy nagy CaO-koncentrációjú salaknak nagyobb az L_S megoszlási aránya és így hatékonyabb a kén eltávolításában.

Elméletben a [S%]_{egy} ‘egyensúlyi’ kén koncentráció adott salakra az alábbi:

$$[\%S]_{\text{egyens}} = [\%S]_0 \frac{\left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_S}\right)}{1 + \left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_S}\right)} \quad (5.16)$$

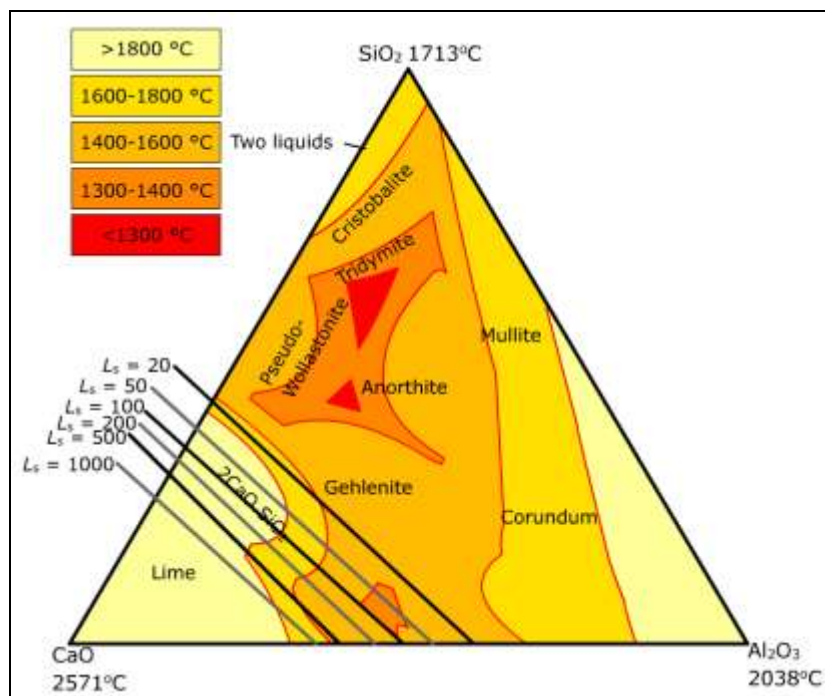
ahol

[S%]₀ = a kezdeti kén koncentráció súly%-ban

W_S = a salak súlya kg-ban

W_m = a fém súlya kg-ban

L_S = a salak és az acél közti kénmegoszlási arány



5.12. ábra L_S values for the ternary system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$. at 1600 °C.

Az L_S értékét a salakösszetétel, az acélban oldott alumínium és oxigén tartalom, valamint a hőmérséklet komplex függvénye határozza meg. Világos, hogy a salakképző adalékok mennyiségének és költségének csökkentése érdekében nagy L_S érték szükséges. Általában kis oldott oxigén tartalom szükséges, valamint 1600 °C feletti hőmérséklet. A megcélzott salakösszetétel kijelölésére az 5.11 diagramban adott egy használható ternér salakdiagram, L_S értékekkel együtt.

Az (5.16) egyenletet át lehet alakítani az előírt kén koncentráció eléréséhez szükséges salak mennyiség meghatározására, azaz $[\text{S}\%]_{\text{cél}} = [\text{S}\%]_{\text{egy}}$ behelyettesítésével:

$$W_s \cong \left(\frac{W_m}{L_S} \right) \left(\frac{[\text{S}\%]_0 - [\text{S}\%]_{\text{cél}}}{[\text{S}\%]_{\text{cél}}} \right) \quad (5.17)$$

Példa

Feltételezve egy 0,008 súly%-os kén koncentrációt és egy $L_S=500$ kénmegoszlási arányt, mi az a lehető legkisebb kéntelenítő salakmennyiség, amit egy 250 tonnás acéladaghoz kell beadagolni 0,002 súly% S-szint eléréséhez?

Az (5.17) egyenlet alkalmazásával:

$$W_s = \left(\frac{250}{500} \right) \left(\frac{0.008\% - 0.002\%}{0.002\%} \right) = 1.5 \text{ tonna} \quad (5.18)$$

N.B. A kéntelenítés kinetikája olyan, hogy a 0,002 súly% kén-szintet a gyakorlatban csak végtelen agitálással lehet elérni.

5.8.7. A foszfor eltávolítása

Az acéltermékekben levő foszforhoz gyenge mechanikai tulajdonságok, szemcseközi repedés és a megmerevedés során mikroszegregáció kötődnek. Általában 0,015 súly%-nál kisebb koncentráció kívánatos a legtöbb acélfajtára, bár néhány speciális acélfajtára 0,001 súly%-nál kisebb koncentráció lehet a kívánalom.

A foszfor visszatartása a salakban a folyékony acél hőmérsékletől, a salak bázicitásától és a salak kalciumoxid, magnéziumoxid és vasoxid tartalmától függ. Kicsi FeO tartalom vagy nagy hőmérsékletek a foszfor acélba visszajutását okozzák. Másrészt nagy salakbázicitás előnyös a foszfor eltávolítására, de figyelemmel kell lenni arra, hogy ne telítsük a salakot kalciumoxiddal. A salak kalciumoxid-tartalmának növekedésével nő a viszkozitása és esetleg drámaian nő a likvidusz hőmérséklete, ami salak megmerevedéshez vezet. Folypátot lehet beadagolni a salak folyosítására, azaz az olvadáspont csökkentésére.

A foszformegoszlási hányadost az alábbi képlet írja le:

$$L_P = \frac{(\%P)_{\text{egyens}}}{[\%P]_{\text{ee egyens}}} \quad (5.20)$$

Általában akkor, amikor igen kis foszforszint a kívánalom, szelektálni kell a felhasználandó hulladék anyagot a beolvadás utáni kis szint érdekében, mivel az elektrokemencében csak korlátozottak a lehetőségek a foszfor eltávolítására. Az elektrokemence-salaknak rendszerint 5 és 15 közötti a foszformegoszlási hányadosa, ami azt jelenti, hogy az acélban levő foszfortartalomnak 20 – 50%-ánál többet nem lehet eltávolítani.

6. AZ ÜSTMETALLURGIA

(a Secondary Steelmaking szimulációja [7])

A www.steeluniversity.org honlapon az üstmetallurgia tananyaga az alábbi fejezeteket öleli fel (dőlt betűkkel az eredeti angol szöveg, alatta magyarul a fordítás):

1.	<i>Secondary Steelmaking: Overview</i>	Üstmetallurgia : áttekintés
2.	<i>Secondary Steelmaking Operations</i>	Üstmetallurgiai műveletek
3.	<i>Stirring & Homogenization</i>	Keverés és homogenizáció
4.	<i>Top Lance Injection of Argon</i>	Felsőlándzsás argonbefűvés
5.	<i>Basal Injection of Argon</i>	Fenékbecsűvés argonnal
6.	<i>Electromagnetic Stirring (EMS)</i>	Elektromágneses keverés
7.	<i>Stirring Power and Mixing Times</i>	Keverő teljesítmény és keverési idő
8.	<i>Recirculating Degasser</i>	Keringtető gáztalanító
9.	<i>CAS-OB</i>	CAS-OB
10.	<i>Ladle Arc Furnace</i>	Üstkemence
11.	<i>Tank Degasser</i>	Üstgáztalanító
12.	<i>Wire Feeding</i>	Porbeles kezelés
13.	<i>Powder Injection</i>	Porbecsűvéses kezelés
14.	<i>Steel Grades used in Simulation</i>	A szimulációhoz használt acélfajták

E fejezetek áttekintő jelleggel elemzik a vonatkozó tananyagrészeket azért, hogy a virtuális acélgyártás (szimuláció) előtt elméleti-gyakorlati szempontból a szimulációt végző személy képből legyen. Ennél sokkal részletesebb elemzés szerepel a Károly Gyula – Kiss László-Károly Zoltán: Acélok üstmetallurgiai kezelése c. jegyzetben [12]. Ezért javasolandó szimulációt megelőzően ennek a tananyagnak az elsajátítása, s azon videórészletek megtekintése, mely e jegyzet számára készültek az acélok üstmetallurgiai kezelése megértése céljából. (A [12] jegyzet forrásként a steeluniversity itt felsorolt 14 pontjában foglaltakat is figyelembevette, felhasználta, ettől függetlenül a steeluniversity ezen 14 pontja is elemezhető, animációi-videói segédeszközként hasznosíthatóak). Ezek előrebocsátása után szerepeltetjük az acélok üstmetallurgiai kezelése szimulációjára vonatkozó anyag rész lényegi részeit magyarra fordítva.

Az acélok üstmetallurgia kezelésének **szimulációja** egy dokumentum felhasználó-útmutatónak készült dokumentum, ami a [http://www.steeluniversity.org/Steel Processing/Secondary Steelmaking-on](http://www.steeluniversity.org/SteelProcessing/Secondary%20Steelmaking-on) található. Ezt az interaktív szimulációt a tananyag szerzői [7] **oktatási és gyakorlási eszköznek** készítették mind az acélmetallurgia hallgatói, mind az acélipar alkalmazottai számára.

6.1. A korábbi szimulációkhoz képest ebben a szimulációkban milyen változtatások vannak?

Ezt a szimulációt állandóan javították a 2002 augusztusában való első kiadásától kezdve. A jelenlegi változatban az előzőekhez képest az alábbiak vannak:

6.1.1. Változások az alkalmazói interface-ben és kialakításban

- A szimuláció sebességét most a szimuláció bármely időpontjában változtatni lehet azzal szemben, hogy az indítás előtt egy rögzített érték került kiválasztásra. Ez lehetővé teszi számodra, hogy lelassítsd a szimulációt a kritikus döntéshozó pontokon és hogy felgyorsítsd máskor. Azonban a szimuláció sebessége automatikusan nyolcadára lassul le akkor, amikor a berendezések mozgásban vannak (például a konverter buktatásakor, üstkocsi és daru mozgásakor, stb.). Azután a befejezéskor ismét visszaáll az eredetileg az alkalmazó által meghatározott értékre. A sebességet egy legördülő menü segítségével lehet megválasztani a képernyő felső bal oldalán.
- Az acélipari művezető szintet eltávolítottuk.
- Ötvöző adagolás: lehetővé teszi a billentyűzet betáplálását szövegmező segítségével.
- A „szimuláció újraindítása” lehetőség most megbízhatóbban működik.
- Az Ar keverés, O₂ befúvatás, elektrokemence teljesítményszabályozás, stb.változtatásait most az esemény napló foglalja magába. Ez megkönnyíti a szimuláció lefuttatásának elemzését, diagnosztizálását és megismétlését.
- A szimuláció végén most láthatod az Összetétel és Hőmérséklet „út -lefutását”- azaz azt, hogyan változtak ezek a szimuláció lefutásának idején.
- Válaszd ki saját acél fajtádat. Az adat-files adatait komputeredbe vagy web-szerveredbe másolásával és kinyomtatásával beadagolhatod saját értékeidet a szimulációba. Minden esetre mi nem garantálhatjuk egy nem használatos acél-összetétel eredményeit, stb.
- A legújabb kémiai elemzéshez juthatsz egyetlen billentyű lenyomásával. Egy újabb kulcs-nyomásra új kémiai elemzést kezdeményez.
- Az Alert dialógus és az Ellenőrző Panel összeütköztetése ki van küszöbölve.
- A daru és üstkocsi konstrukciókat megváltoztatták.
- A vonatkozó feltételezések és egyszerűsítések bemutatására vonatkozó képernyő rendelkezésre áll.
- Berendezés-zajok csatolva.

6.1.2. Műszaki változtatások

- A szerszámacél fajtát AISI 4140-ra változtatták
- Az igen kis karbontartalmú TiNb acél összetételét megváltoztatták
- Az ötvöző adalékok számát csökkentették azzal, hogy a Cu és Sn alkotókat eltávolították
- 100 tonnás üst van előírva a blokkbuga és buga öntőművekre szánt fajtákra. A laposbuga öntőművekre menő fajtákra továbbra is 250 tonnás üstöt használnak
- Az acélipari üzemi technikai szintre végbemehet egy változtatás a megkívánt szállítási időt illetően
- A termokémiai modelt kissé megjavították
- A Ca-ra vonatkozó kihozatali arányt 15%-ra csökkentették.

6.2. Bevezetés az acélgyártó üstmetallurgiába

Nagyobb változtatások következtek be az acélgyártás gyakorlatában az utolsó néhány évtized alatt.

A hagyományos acélgyártásban a bázikus oxigénes acélgyártó konvertertől (BOK) vagy a villamos ivkemencéből (VIK) származó folyékony acélt üstben szállítják az öntő hajóba,

ahol az acélt tuskóalakra öntik. Csak durva összetétel és hőmérséklet ellenőrzés lehetséges ezen az úton.

Az 1950-es években tettek először kísérletet a hidrogén eltávolítására a **vákuumos gáztalanítással**. Újabban vákuumos gáztalanítót használtak igen kis karbon tartalmú (ULC) acélok 30 ppm-nél (0,003 súly%) kisebb karbon szintjének elérésére. A gáztalanítóknak két fő típusa van: keringtető és nemkeringtető. Keringtető rendszerű az **RH (Ruhrstahl-Heraeus)** gáztalanító, amelyben a folyékony acélt argon emelő gáz segítségével – az acél látszólagos sűrűségének csökkentése révén – keringtetik. A nemkeringtető rendszerekben, mint amilyen az **üstgáztalanító**, argont használnak keverő gázként.

Azok a módszerek, amelyekben ötvöző és folyósító adalékokat használnak az acél összetételének finom beállítására és/vagy a zárványok módosítására szintén elterjedtek és magukba foglalják a beles huzalok bevitelét, poralakú adalékok használatát stb. A **CAS-OB** eljárás (Összetétel beállítás lezárt argonos buborékoltatással, oxigén befúvatással) előnyös módszert jelent semleges körülmények közti ötvöző bevitelre, ezzel javítva az acél tisztaságát és a beadott komponens „kihozatali arányát”. A kihozatali arány a bedagolt elem azon mennyisége, amely ténylegesen növeli az elem mennyiségét az acélban, szemben a salakban, atmoszférában stb. elveszett hányaddal.

Mivel igen sok üstmetallurgiai acélgyártó eljárás eredménye jelentős hőmérséklet csökkenés, igen gyakran szükséges az üstben levő acél újra hevítése a folyamatok között és/vagy a leöntés előtt. Két módszert használnak általánosan: villamos újrahevítést **üstkemence** segítségével és kémiai újrahevítést oxigén és alumínium (vagy szilícium) együttes befúvatásával, amikor exotermikus reakció megy végbe hő termelésével.

6.1. táblázat Különböző acélgyártó üstmetallurgiai eljárások összegezése

Eljárás	Gáztalanítás	Újrahevítés	Kikészítés
RH-gáztalanító	C,O,H,eltávolítás (plus N, ha kicsi az O és S szint)	Al+O ₂ befúvás	
Üstgáztalanító	C,O,H eltávolítás (plus N, ha kicsi az O és S szint)		
CAS-OB		Al+O ₂ befúvás	Ötvöző adagolás semleges argon atmoszférában
Üstkemence		villamosan	
Keverő állomás			Dezoxidált acél kén-telenítése szintetikus salakkal plusz erőteljes keverés

Manapság egy sor **acélgyártó üstmetallurgiai** berendezés van három fő céllal:

- Széles acélválaszték számára teszi lehetővé a szorosabb és igényesebb előírásokat;
- A folyamatos öntőmű szigorúbb ütemezést igényel – az acélgyártó üstmetallurgia ütköző a BOK és a CC (Folyamatos öntőmű) között,

- Az acélgyártó üstmetallurgia finanszírozási előnyöket biztosíthat.

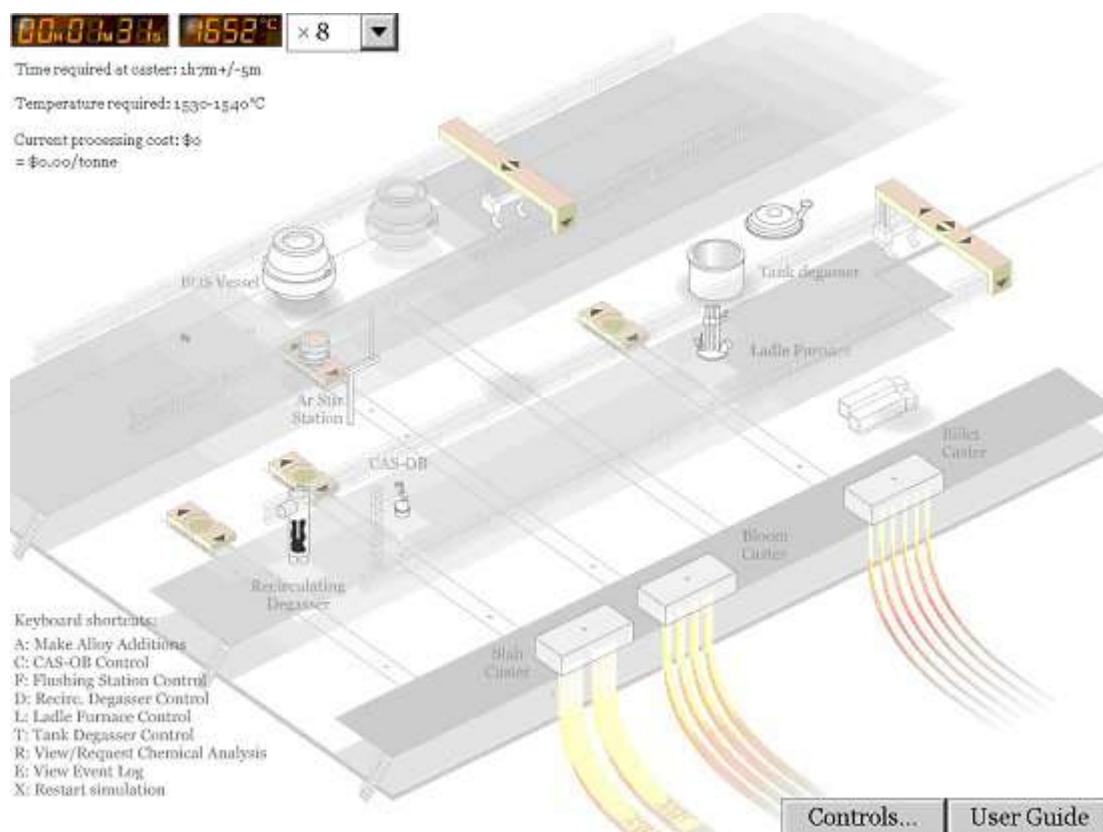
Ez az interaktív szimuláció célja néhány kulcsfontosságú folyamat ellenőrzés bemutatása az acélgyártó üstmetallurgiában.

6.3. A szimuláció feladata

A szimuláció célja, hogy gondoskodjon a bázikus oxigén konverterből származó folyékony acéllal telt üst elszállításáról a **megfelelő öntőműhöz** az **előírt időben, összetétellel, hőmérséklettel és zárvány tartalommal**.

Törekedned kell a **minimális költségre** az egész műveletre vonatkozóan.

6.4. Üzem elrendezés és leírás



6.1. ábra A szimuláció során használt üzemi eszközök. Az üstöket párhuzamos síneken szállítják a bázikus oxigén konvertertől az öntőgépig. Két sín között daruval szállítják az üstöt.

A szimulációban szereplő üzem kivitelezése látszik a 6.1. ábrán. A szimuláció indulásakor az acélt üstbe csapolják a működő **bázikus oxigén konverterből**. (A másik árnyékolt konverter üzemen kívül).

Az üstöt **szállító kocsin** viszik el az oxigénes konvertertől. Az első megálló a **keverő állomás**, ahol Ar-t lehet befúvatni az üstbe a hőmérséklet és az összetétel homogenizálása céljából.

A **keringtető gáztalanító**, a **CAS-OB** és az **üstkemence** mind saját vágányán áll úgy, hogy az üstöt ezek alá lehet elhelyezni a szállító kocsiival. Egy darura van szükség az üst emelésére a kocsik között.

Az **üstgáztalanítót** az 1 darúval lehet közvetlenül ellátni az üst leeresztésével. A három öntőgép az üzem elején van és a 2 darú segítségével szállítják az üstöt ezekhez. Bizonyosodj meg afelől, hogy az üstöt a kijelölt öntő egységhez továbbítottad.

6.5. Szimulációs célok

6.5.1. Alkalmazószint

A szimulációt két különböző alkalmazói csoport használatára fejlesztették ki:

- A metallurgiai, anyagtudományi és más mérnöki diszciplinák egyetemi hallgatói.
- Acélipari üzemi technikusok.

Egyetemi hallgatói szint

Ezen a szinten az alkalmazótól azt várják el, hogy tudományosan közelítse meg a problémát, felhasználva a releváns termodinamikai és kinetikai elméleteket a különböző eljárás-lehetőségekkel kapcsolatos döntések hozatala érdekében.

Például az alkalmazónak ki kell számíttania a beadagolandó ötvöző mennyiségét, a gáztalanítás idejét, a hőmérséklet ingadozásokat, stb.

Ezen a szinten nem kell üzemeltetési problémákat megoldani, és az ütemezés viszonylag egyszerű.

Acélipari üzemi technikai szint

Ezen a szinten az a kíváncsi, hogy tudományosan közelítsd meg a problémát. De gyakorlatra tehetsz szert egy sor üzemi problémával kapcsolatban, ami azt igényli, hogy tegyél kiigazításokat terveiden és tapasztalatodat felhasználva gyors döntés meghozatalához.

Tipikus, üzemeltetési problémákra vonatkozó példák, amelyekkel találkozhatasz: az öntőműre előírt idő megváltozása, bizonyos acélgyártó egységek helytelen működése vagy rendelkezésre nem állása, az üst szállító kocsijának rossz működése vagy rendelkezésre nem állása, késések a kémiai elemzés eredményeiben, stb.

6.5.2. Szimuláció sebesség

A szimuláció különböző sebességtartományban futtatható le x1 és x64 között. A sebességet bármikor meg lehet változtatni a szimuláció során. Azonban amikor mozgás van az üzemben (konverterbuktatás, daruk, üstkocsik, stb) a szimuláció automatikusan csökken x8-ra. A befejezés után a sebesség visszaáll az előzetesen beállított értékre.

6.5.3. Kiválasztott acélfajta

A szimuláció számos acélfajttát foglal magába a különböző műveleti lehetőségek bemutatására.

Az általános rendeltetésű **szerkezeti acélfajta** viszonylag igénytelen fajta, amely minimális kezelést igényel és ezért **kezdő alkalmazók** számára ajánlott. Fő feladatod, hogy megbizonyosodj az ötvöző adagolások helyes szintjéről.

A **kis karbontartalmú TiNb acél** a gépkocsi karosszéria részei számára maximálisan 0,0035% C-előírású az optimális alakíthatóság biztosítására. Ez körülbelül tizede a primér acélgyártás végén tipikusan meglevő karbon-szintnek. Fő prioritásod ezért a fölös karbon hatékony eltávolítására megfelelő acélgyártó üstmetallurgiai egység kiválasztása és ellenőrzése.

A **csőacél** gáz szállítására igen igényes fajta, mivel a nagy szilárdság és nagy törési szívósság kombinációja extrém kis szennyező (S,P,H,O és N) és zárvány szinteket igényel. Csak a nagyobb gyakorlatú alkalmazónak ajánlott megkísérelni ezt a fajtát.

A **járműipari acél** egy hőkezelhető acél fajta. Jelentős Cr-t és Mo-t tartalmaz és kis hidrogén szintet is igényel.

6.1. táblázat A szimulációban szereplő négy kiválasztott acélfajta összetétele %-ban

	Szerkezeti acél	TiNb ULC acél	Cső-acél	Járműipari acél
C	0,1450	0,0030	0,0700	0,4150
Si	0,2000	0,2100	0,1800	0,4000
Mn	1,4000	0,7500	1,0500	0,7500
P	<0,0250	0,0650	<0,0120	0,0350
Cr	<0,1000	<0,0500	<0,0030	1,0500
Al	0,0350	0,0450	0, 0300	0,0225
B	<0,0005	0,0030	<0,0050	0,0050
Ni	<0,1500	<0,0800	<0,0500	0,3000
Nb	0,0500	0,0200	0,0150	
Ti	<0,0100	0,0300	<0,0100	
V	<0,0100		<0,0100	0,0100
Mo	<0,0400	<0,0100	<0,0100	0,2250
As		<0,0100		
Ca			<0,0050	
N	<0,0050	<0,0040	<0,0045	0,0050
H	<0,0005	<0,0005	<0,0002	0,0002
O	<0,0010	<0,0005	<0,0007	0,0005

6.6. Program tervezése

Mielőtt megkezdenéd a szimulációt, fontos, hogy előre tervezz. Az első teendő az, hogy hasonlítsd össze az acél hőmérsékletét és összetételét a csapoláskor az öntőműnél előírt értékekkel. Aztán arról kell gondolkodnod, hogyan éred el az előírt értékeket a megkívánt időben.

6.2. táblázat Példa a csapolási és előírt összetételekre. A karbon, szilícium és az alumínium összetételeket mind növelned kell, míg az oxigént el kell távolítani.

	<i>súly% csapoláskor</i>	<i>előírt súly%</i>	<i>különbség súly%</i>
C	0,05	0,145	+0,095
Mn	0,12	1,4	+1,28
Si	0	0,2	+0,2
Al	0	0,035	+0,035
O	0,04	0,001	-0,039
Hőmérséklet	1650°C	1535°C	-115°C

6.6.1. Összetétel

Bizonyos elemeket be kell adagolni az előírt összetétel beállítása céljából. Itt állnak a kulcskérdések, amelyekre választ kell adnod:

- Milyen adaléko(ka)t kell felhasználnod ennek elérésére?
- Mennyi adalékra van szükséged (kg-ban)?
- Ezek az adalékok nagyon nagy hatással vannak a többi elemre, és mennyire?
- Hol és mikor kell végrehajtani az adagolást?
- Mennyire befolyásolják az adalékok az acél költségét, hőmérsékletét és tisztaságát?

További segítség az ötvöző kiszámításához lásd a 6.8.1. „Ötvöző beadagolásának kiszámítása” fejezetet.

6.3. táblázat A rendelkezésre álló adalékok összetételei és költségei.

Adalék	Összetétel	Költség \$/t
Karbonizáló	98%C+Fe a többi	280
Nagy C-ferromangán	76,5%Mn,6,7%C,1%Si,0,03/S,0,3%P, + Fe a többi	490
Kis C-ferromangán	81,5%Mn,0,85%C,0,5%Si,0,1%S, 0,25%P+ Fe a többi	840
Nagy tisztaságú ferromangán	49%Mn,+ Fe a többi	1820
SiMn	60%Mn,30%Si,0,5%C,0,08%P, 0,08%S+Fe a többi	560
75-ös FeSi	75%Si,1,5%Al,0,15%C,0,5%Mn, 0,2%Ca+Fe a többi	770
Nagy tisztaságú 75-ös FeSi	75%Si,0,06%Al,0,2%Mn,0,02%C +Fe a többi	840
45-ös FeSi	45%Si,2%Al,0,2%C,1%Mn,0,5%Cr +Fe a többi	630

Aluminium huzal	98%Al + Fe a többi	2100
Aluminium kavics	98%Al + Fe a többi	1400
Ferrobór	20%B,3%Si,0,2%P + Fe a többi	3780
Ferrokróm	66,5%Cr,6,4%C + Fe a többi	1260
Ferromolibdén	70%Mo + Fe a többi	16800
Ferroniobium	63%Nb,2%Al,2%Si,2%Ti,0,2%C, 0,2%S,0,2%P + Fe a többi	9800
Ferrovánádium	50%V + Fe a többi	8400
Ferrofoszfor	26%P,1,5%Si + Fe a többi	630
Ferroszulfid	28%S + Fe a többi	700
Nikkel	99%Ni + Fe a többi	7000
Titán	99%Ti + Fe a többi	2800
CaSi por	50%Ca, 50%Si	1218
CaSi huzal	50%Ca,50%Si	1540

6.4. táblázat A levegőben beadott elemek jellemző kihozatali százalékai (pl.a konverternél vagy keverő állomáson) és részben vákuumban vagy argonban /azaz a gáztalanítóban, üstkemencében vagy CAS-OB-nél).

Elem	Átlagos kihozatali % gáztalanítóban, üstkemen- cében, vagy CAS-OB-nél*	Átlagos kihozatali % konverternél vagy keverő állomáson*
C	95	66
Mn	95	66
Si	98	69
S	80	56
P	98	69
Cr	99	69
Al	90	69
B	100	70
Ni	100	70
Nb	100	70
Ti	90	63
V	100	70
Mo	100	70
As	100	70
Ca	15	10
O	100	70
N	40	28
H	100	70
Fe	100	70

- Fontos megjegyezni, hogy ezek csak átlagos értékek és váltakoznak adagról adagra.

TANÁCS:A kihozatali arány nagyobb, ha a beadagolás vákuumban történik (mint a gáztalanítóban) vagy egy védő Ar környezetben (üstkemence, CAS-OB), ily módon csökkentve az adalék mennyiségét (és költségét). Azonban költség merül fel az ilyen berendezés használatakor, amelyet ellensúlyoznia kell a nagyobb kihozatali arány révén. Általános szabályként a drágább adalékokat, mint amilyen a FeNb, FeMo, stb. védő környezetben kell beadagolni.

A többi elemet, mint a korbont, oxigént, kenet, hidrogént, foszfort és nitrogént szükséges lehet eltávolítani a cél-összetétel elérése érdekében. A különböző elemek eltávolítása

- Melyik eljárás vagy eljárás-sorozat a leghatékonyabb a kérdéses elem eltávolítására?
- Melyek a fő folyamat-paraméterek (pl. keverő teljesítmény, salak összetétel és súly, oxigén befúvatás, stb.) és hogy hatnak ezek az eltávolításra?
- A szóbanforgó acél összetétel és/vagy hőmérséklet hatással van a kinetikára és hogyan?

6.6.2. *Hőmérséklet*

Annak érdekében, hogy az üst korrekt hőmérséklettel érkezzon az öntőgéphez, fontos, hogy ki tudd számítani a különböző folyamatok hatását az üst hőmérsékletére.

1. Csapolás: az acél hőmérséklete körülbelül 60 °C-kal fog csökkenni a csapoló művelet során. Jegyezd meg, hogy ezt gyorsítja a szimuláció az időmegtakarítás érdekében.
2. Normális körülmények között, mint az üst felvételi és szállítási ideje, az acél körülbelül 0,5 °C /perc -el hűl.
3. A legtöbb ötvöző adagolásakor minden egyes tonna hozzáadása további, körülbelül 6 °C hőmérsékletesést eredményez.
4. Az alumíniumos dezoxidálás erőteljesen exoterm. Az alumínium minden 100 kg-jára, amely reagál az oxigénnel, 12 °C hőmérsékletemelkedés várható. Az alumíniumot injektált oxigénnel együtt is be lehet adagolni a keringtető gáztalanítóba vagy CAS-OB-be **kémiai újrahevítést** eredményezve. Ismét 12 °C hőmérsékletnövekedés várható minden oxigénnel reakcióba lépő 100 kg alumíniumra.
5. Az üstben levő acélt **villamosan** is lehet **újrahevíteni** az üstkemencében. Teljes teljesítménynél az újrahevítés körülbelül 3 °C/ perc.
6. Az üstben végzett keverés Ar buborékoltatással körülbelül 1,5 °C/perc értékkel növeli a hűlés sebességét.

Gondosan számításba véve az összes eltelt időt a konvertertől az öntőműig, az ötvöző adagolásból keletkező hőmérséklet veszteség, plusz bizonyos újrahevítés (villamos vagy kémiai) alapján lehetséges az acél hőmérsékletének kiszámítása az öntőműnél.

6.6.2.1. *A likvidusz hőmérséklet kiszámítása*

Kényszerűség az acélfürdő-hőmérséklet likvidusz hőmérséklet alá süllyedésének megelőzése. (azaz azon hőmérséklet alá, amelyen az acél kezd megdermedni). A likvidusz hőmérséklet (T_{likv}) nagyon függ az összetételtől és az alábbi egyenletekkel lehet kiszámítani:

$C < 0,5\%$ -ra:

$$T_{\text{likv}} = 1537 - 73,1 \%C - 4 \%Mn - 14 \%Si - 45 \%S - 30 \%P - 1,5 \%Cr - 2,5 \%Al - 3,5 \%Ni - 4 \%V - 5 \%Mo \quad (6.1)$$

$C > 0,5\%$ - ra:

$$T_{\text{likv}} = 1531 - 61,5 \%C - 4 \%Mn - 14 \%Si - 45 \%S - 30 \%P - 1,5 \%Cr - 2,5 \%Cr - 2,5 \%Al - 3,5 \%Ni - 4 \%V - 5 \%Mo \quad (6.2)$$

6.7. Alkalmazó kezelőfelülete

Ez a fejezet a szimuláció futtatásának alap „mechanikáját” írja le, azaz hogy kell mozgatni az üstöt, hogy kell az ötvözőt adagolni, hogyan szabályozzuk a berendezés különböző részeit, stb.

Az alapul szolgáló tudományos összefüggéseket (kémia, termodinamika, reakciókinetika, stb.), amelyek alkalmazására szükség lesz az ötvöző mennyiség, a folyamat paraméterek kiszámítására, a 6.8 fejezet adja meg.

6.7.1. Az üst szállítása

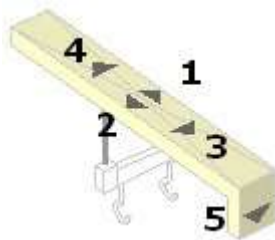
Az üstöt az üzemen keresztül olyan **szállító kocsi** rendszer mozgatja, amely a konverter és az öntő „csarnokrész” között párhuzamos vágányokon fut és egy pár **daru** mindegyik csarnokrészben. Nincs pénzbüntetés egyik üstszállítóval kapcsolatban sem.

6.7.1.1. Üstkocsi

Mindegyik üstkocsi saját vágányán mozog a kocsi elejének vagy hátuljának árnyékára kattintva. A kocsik automatikusan állnak le a kijelölt pontokon – nincs szükség alkalmazó részéről beavatkozásra.

6.7.1.2. Daruk

Eredményes daruművelet kissé több gyakorlatot igényel, amint a daru horga a 3-D térben mozog. Navigálásod megsegítésére mindegyik daru árnyékot vet az alatta levő talajra – ez jelöli meg számodra az X-Y pozíciót.



6.2. ábra A daruk mozgása

A darukon levő nyilakat használják mozgításukra.

- Az 1 és 2 nyilat használja a daru mozgatására a csarnokban. A daru automatikusan leáll a beállított ponton a daruvágányon.
- A 3 és a 4 nyilak mozgatják a darut saját pályáján. Erre csak az öntő csarnok darujának van szüksége. A nyilakat a másik eltünteti.
- Az 5 nyíl kezdetben a felső végpontjáról süllyeszti a darut egészen a közbenső magasságig. Egy második kattintás süllyeszti le a horgot az alaphelyzetbe (azaz az üst

felvételére vagy buktatására), aztán automatikusan visszatérve a közbülső helyzetbe.

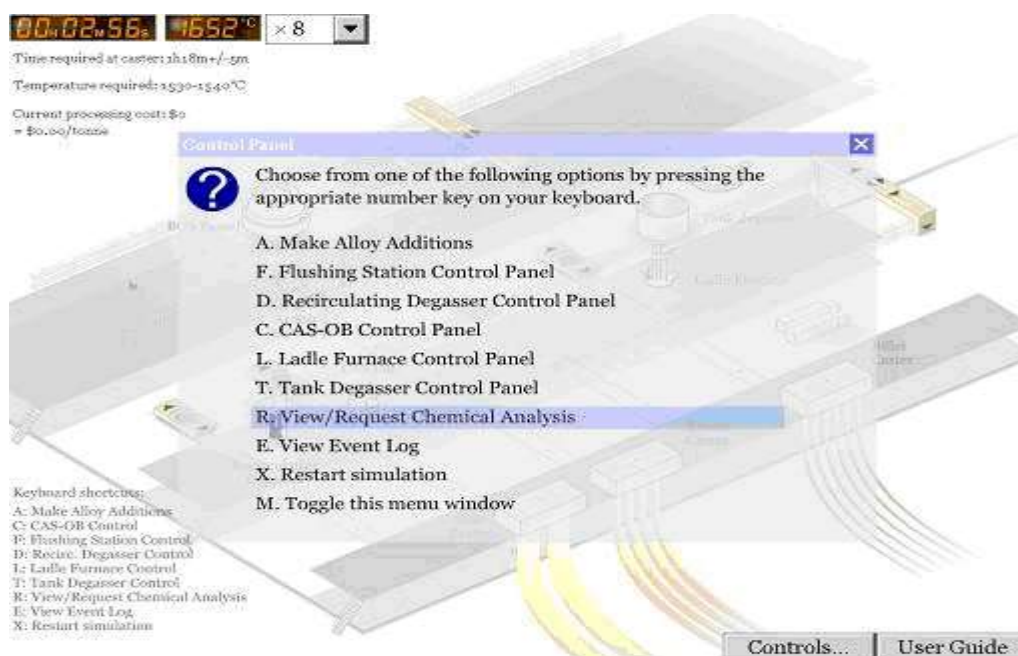
Jegyezd meg, hogy csak akkor tudod süllyeszteni a darut az üst mozgatására, amikor az a megfelelő pozícióban van.

A 2 darut használd az üst megfelelő öntőműhöz való szállítására. Az üstszállítókocsiról való leemeléséhez a daru horgainak az egység legvégén kell lennie (használd a 4 billentyűt a fenti ábrán). Aztán kattints a 3 billentyűre az üst továbbmozgatására egészen az öntő egységekig.

Tanács: Nagyon ajánlott, hogy gyakorold az üstkocsi és daru szabályozást mielőtt megkísérelöd a helyes szimulációt. Egy kis gyakorlatra tehetsz szert, de hamar profivá válsz a daru acélműben való mozgatásában..

6.7.2. A vezérlőpult

Mihelyt megindul a szimuláció, az ellenőrző panel alkalmazásával szabályozhatod az acélgyártás egyes mozzanatait.



6.3. ábra Vezérlőpult kezelőfelülete

Kattints az **Ellenőrzések** gombra a menü megnyitására és kattints rá a kívánt célra. Vagylagosan, nyomd meg a releváns kulcsot a menüben az alsó bal sarokban

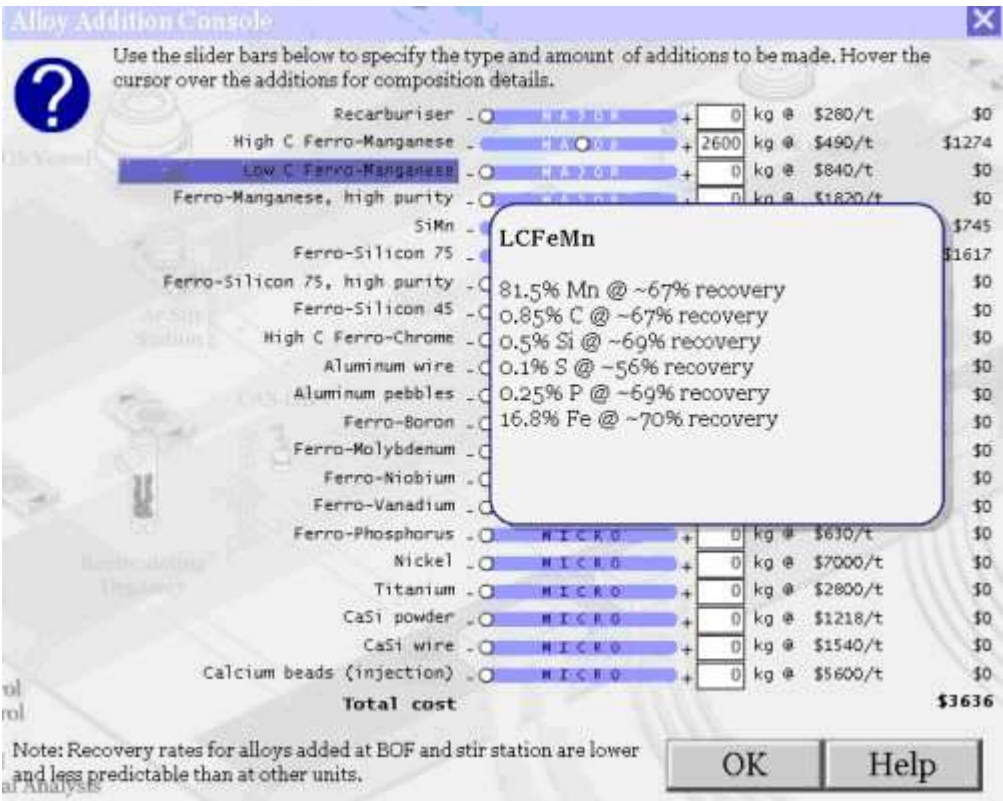
6.7.2.1. Ötvöző adagolás elvégzése (A billentyű)

Egy sor különböző adalékot lehet az üstbe juttatni az „Ötvöző adagolás vezérlőpult” szabályozó panel használatával. Minden egyes adaléknak saját csúszkája van az adagolandó mennyiség szabályozására. Hiba esetében minden csúszka újra zéróra van állítva. Minden egyes adalék költsége kivetítésre kerül, a megválasztott mennyiség kiszámított költségével együtt.

Az adalékok a „nagyobb” és a „mikro” kategóriákba vannak besorolva. Nagyobb adalék a ferromangán és a ferroszilícium és 5 000 kg mennyiségig lehet beadagolni.

Mikro adalék az alumínium, króm, nikkel ferroniobium, stb. és 500 kg mennyiségig adagolható.

Tanács: Szállj rá a kurzorral az adagoló címkére a baloldalon az összetételeikre és kihozatali arányaikra vonatkozó információért..



6.4. ábra Az Ötvöző adagoló felület

Ha készen vagy, kattints a **Következő** gombra. A javasolt adalék összegezését kapod meg. Kattints a **Befejezés** gombra az adagolás megerősítése céljából.

Fontos megjegyezni, hogy az üstbe adagolt ötvöző anyagok nem eredményeznek azonnali változást az acél összetételében, mert egy véges időbe telik a feloldódásuk. A szimulációban bizonyosodj meg afelől, hogy elegendő időt adtál az ötvöző adalékok oldódására megfigyelve a következő trendeket:.

- A poralakú, huzal vagy finomszemcsés adalékok gyorsabban oldódnak, mint a durva kavicsok vagy rudak;
- Az üst keverése (pl. argonos buborékoltatás) gyorsítja az oldódási folyamatot és fontos a folyékony acél összetételének homogenizálása szempontjából is,
- A keverési idők növekednek a hőmérséklet csökkenésével.

Várhatod, hogy a nagyobb hőmérsékleteken végzett, erőteljes keveréssel párosuló por adagolások fognak feloldódni a leggyorsabban. A kisebb hőmérsékleteken adagolt kavicsok keverés nélkül sok percet igényelnek a feloldódásra és az üstben levő acél nem homogenizálódhat addig az ideig, míg eléri az öntő egységet.

6.7.2.2 Buborékoltató állomást szabályzó panel (F kulcs)

Mihelyt pozícióba jut az üst, kattints a lándzsára az üstbe süllyesztés céljából. Egy dialógus doboz bukkan fel automatikusan, lehetővé téve az Ar beáramlási sebességének szabályozását. A buborékoltató állomással kapcsolatos költségek a következők:

- 0,60 \$ / Nm³ Ar.(azaz 1 perc 1,0 N m³/perc- nél 0,60\$-ba kerül);
- 5,70 \$-ba kerül a lándzsa-kopáspercenként;

Várhatóan egészen ~1,5 °C/perc-ig nő a hűlés sebessége. Kattints ismét a lándzsára a folyamat befejezésére.

6.7.2.3. Keringtető gáztalanító szabályzó panel (D billentyű)

Mihelyt pozícióban van az üst, kattints a gáztalanító egységre az üstbe süllyesztés céljából.

A gáztalanítás automatikusan megindul. Egy dialógus doboz tűnik fel automatikusan, lehetővé téve számodra az oxigén fúvatás be- és kikapcsolását (hiba esetében). A gáztalanító működési költsége ~7,75 \$ / perc, az acél hűlési sebessége ~1,0 °C/perc. A folyamat lezárására ismét kattints a gáztalanítóra.

6.7.2.4. CAS-OB szabályzó panel (C billentyű)

Mihelyt pozícióban van az üst, kattints a CAS-OB egységre az üstbe süllyesztés céljából. Egy dialógus doboz tűnik fel automatikusan, lehetővé téve az Ar áramlási sebességének szabályozását egy csúsztató kontrollal. A CAS-OB-vel kapcsolatos költségek a következők:

- 30 \$ / perc a kopás és egyéb fogyások miatt,
- 0,60 \$ / Nm³ az Ar-ra. (azaz 1 perc 1,0 N m³ /perc-nél 0,60 \$-ba kerül).

A hűlés sebessége várhatóan egészen ~1,5°C /perc-ig nő. Kattints ismét az egységre a folyamat lezárására.

6.7.2.5. Üstkemence szabályzó panel (L billentyű)

Mihelyt pozícióban van az üst, kattints az üstkemence tetőre az üstre süllyesztés céljából. Egy dialógus doboz tűnik fel automatikusan, lehetővé téve számodra a villamos teljesítmény és az Ar áramlási sebesség beállítását két csúszka szabályozó segítségével. Az üstkemencével kapcsolatos költségek a következők:

- 16,60 \$ / perc a villamosságra 20 MW maximális teljesítménynél (arányosan kisebb költség alacsonyabb teljesítmény-beállításnál);
- 5,90 \$/perc az elektróda-kopásra (ismét arányosan kisebb költség alacsonyabb teljesítmény-beállításnál);
- 0,60 \$ / N m³ Ar-ra. (azaz 1 perc 1,0 N m³/perc-nél 0,60 \$-ba kerül).

Kattints ismét a kemence tetőre a folyamat lezárására

6.7.2.6. Üstgáztalanító szabályzó panel (T billentyű)

Minden egyéb üstmetallurgiai acélgyártó egységtől eltérően, amelyek az üst kocsihoz kötődnek, az üstöt az 1 darú segítségével közvetlenül az üstgáztalanító tartályba kell lesüllyeszteni. Mielőtt ezt tennéd, az arra kattintással távolítsd el a fedelet. Mi-

helyst az üst a gáztalanítóban van, zárd le a gáztalanító tartályt ismét a fedélre kattintva. Egy dialógus doboz tűnik fel automatikusan, lehetővé téve számodra a megkívánt vákuum szint és Ar áramlási sebesség beállítását egy csúszó szabályozó segítségével. Az üstgáztalanítóval kapcsolatos költségek a következők:

- 10 \$ / perc a vákuumozásra, kopásra és egyéb fogadásokra;
- 0,60 \$ / Nm³ az Ar-ra. (azaz 1 perc 1,0 Nm³/perc-nél 0,60 \$-ba kerül).

Az acél hűlési sebessége várhatóan egészen ~1,0 °C/perc-ig nő. Kattints ismét a fedélre a folyamat lezárására.

6.7.2.7. Kémiai elemzés lekérés (R billentyű)

Megláthatod a legújabb kémiai elemzést bármely pillanatban az R billentyűlenyomásával (vagy a **kép/elemzés lekérés** választásával a szabályzó panelen). Ezt nem terheli költség.

Természetesen változhat az acél összetétele az utolsó elemzés elkészülte óta. Új elemzés elindítására nyomd meg a **Indíts most** billentyűt. Az elemzés 40 \$-ba kerül és az eredmények érkezése megközelítően 3 szimulációs percet igényel (azaz körülbelül 22 valóvilági másodpercet, ha a szimuláció sebességét x8-ra állítottad be).

A próbavételi időpont ki van jelezve a dialógus doboz felső részén. Mindig emlékezned kell arra, hogy az összetétel változhat azóta, ami óta a próbát kivették.

6.7.2.8. Esemény napló áttekintés (E billentyű)

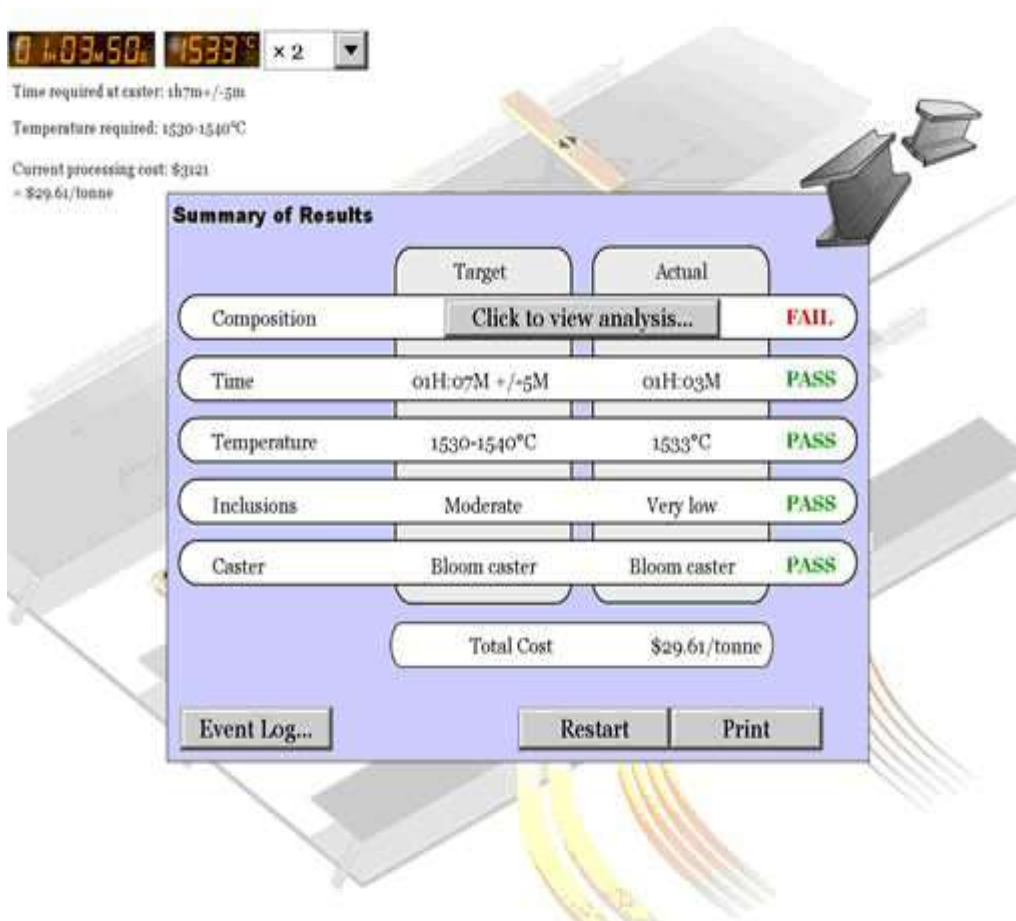
Az eseménynapló minden fontosabb folyamat-lépést kronológiai sorrendbe állít, az ötvöző adagolást is beleértve. Ez hasznos annak nyomon követésére, mit végeztél el eddig a szimuláció alatt. Ez nagyon hasznos eredményeid elemzésekor a szimuláció végén, mivel az áttekintés gyakran tartalmaz nyomokat arra vonatkozóan, hogy miért hanyagoltad vagy használtad hibásan a kritériumokat.

6.7.2.9. Szimuláció újraindítása (X kulcs)

Válaszd ezt a lehetőséget a szimuláció újra indításához. Meg leszel kérve arra, hogy döntésedet megerősítsd

6.7.3. Szimuláció eredményei

Mihelyt letetted az üstöt az öntőművek egyikében, a szimuláció befejeződik és a futtatás eredményei kijelzésre kerülnek az egy tonnára vonatkozó, \$-ban kifejezett összes üzemköltséggel együtt.



6.5. ábra A szimuláció eredménye az öt fő kritérium eredményével. Kiklikeljen a Event-log-ra az eredmények megtekintéséért.

6.8. Alapokul szolgáló tudományos összefüggések

Ez a fejezet azokat a fontos alapokat adó tudományos elméleteket és összefüggéseket mutatja be, amelyek a szimuláció eredményes befejezéséhez szükségesek. Semmi esetre sem célozza meg azt, hogy összehasonlítsa az acélgyártó elméleteket és gyakorlatot – erre az alkalmazót további kiváló publikációkhoz [9-10] irányítjuk.

6.8.1. Ötvöző beadagolásának kiszámítása

Ötvözőket különböző okokból adagolunk az üstbe

- Hogy beállítsd a végső összetételt;
- Hogy dezoxidáld az acélt oxigénnel való reagáltatással és olyan oxidok képződésével, amelyeket a salak abszorbeál;
- Hogy módosítsd az acélban jelenlevő zárványokat.

Adalékok kiszámítása a kitűzött összetétel elérésére

Ötvöző adagolások

A legegyszerűbb esetben, amikor egyetlen elemet adagolnak az üstbe, a szükséges adalék mennyiségét, m_{adagolt} -at egyszerűen a következő összefüggés adja:

$$m_{\text{additive}} = \frac{\Delta\%X \times \text{ladle mass}}{100\%} \quad (6.3)$$

ahol

ladle mass az üstben lévő acél tömege, kg

$\Delta\% X$ a megkívánt növelés súly%-ban (azaz $\% X_{\text{acél}} - \% X_{\text{tényleges}}$)

Példa

Tételezz fel egy üstben levő 250 000 kg súlyú acélt, ami ténylegesen 0,01%Ni-t tartalmaz.

Mennyi elemi Ni-t kell beadagolni ahhoz, hogy elérjük a célul kitűzött 1,0% Ni-tartalmat?

$$m_{\text{adagolt}} = \frac{(1,0 - 0,01) \% \times 250\,000 \text{ kg}}{100\%} = 2\,475 \text{ kg}$$

Főbb ötvözők adagolása

Sok esetben gyakorlatiasabb/gazdaságosabb „**mester ötvözőket**” adagolni, mint szintiszta elemeket. (A mester ötvöző 2 vagy több komponens keveréke).

Ilyen esetekben a mester ötvözetben jelenlevő kérdéses elem mennyiségét kell figyelembe venni.

A „kihozatali arány” - azaz az elem azon mennyisége, amely ténylegesen növeli az elem mennyiségét a folyékony acélban, szemben a salakba jutó hányaddal, stb – szintén figyelembe veendő a számításnál.

$$m_{\text{additive}} = \frac{100 \times \Delta\% X \times \text{ladle mass}}{\% X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X} \quad (6.4)$$

ahol :

$$m_{\text{adagolt}} = \frac{100 \times \Delta\% X \times \text{üst tömeg}}{\% X \text{ a mester ötvőben} \times X \text{ kinyerési aránya}}$$

Példa

A 250 tonna üstben levő acél jelenleg 0,12% Mn-t tartalmaz a csapoláskor. Számítsd ki, hogy mennyi nagy karbontartalmú ferromangánt (FeMn) kell beadni 1,4%Mn tartalom elérésére?

A 6.3. táblázatból azt látjuk, hogy a HC FeMn 76,5% Mn-t tartalmaz. A Mn-ra tipikus kihozatali arány 95% (a 6.4 táblázatból). Behelyettesítve az adott értékeket adódik:

$$M_{\text{HCFeMn}} = \frac{100\% \times (1,4 - 0,12)\% \times 250\,000 \text{ kg}}{76,5\% \times 95\%} = 4\,403 \text{ kg}$$

Egyéb elemek felvétele

Mester ötvözetek adagolásakor az is fontos, hogy biztosak legyünk abban, és ha kell, ki is számítsuk, hogy hogyan hat a többi komponens az acél teljes összetételére. A **felvétel** mennyisége (azaz a növekedés) egy adott elemre a (5.4) egyenlet átrendezésével az alábbi

$$\Delta\%X = \frac{m_{\text{additive}} \times \%X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X}{100 \times \text{ladle mass}} \quad (6.5)$$

Azaz:

$$\Delta\%X = \frac{m_{\text{adagolt}} \times \%X \text{ a mester ötvözőben} \times X \text{ kinyerési aránya}}{100 \times \text{acéltömeg}}$$

Példa

Az előző példából számítsd ki a karbonfelvétel mennyiségét, a nagy C-tartalmú FeMn 6,7% Mn-t tartalmaz és 95% a kihozatali arány:

$$\Delta\%C = \frac{4,403 \text{ kg} \times 6.7\% \times 95\%}{100\% \times 250,000 \text{ kg}} = 0.112\%C$$

Világos, hogy ilyen karbon-növekedés kritikus lehet bizonyos kis karbontartalmú és ultrakis karbontartalmú acélfajták esetében. Ilyen esetekben szükségessé válhat a sokkal drágább kis karbont tartalmazó vagy nagy tisztaságú ferromangán felhasználása.

Keverési idő

Fontos tudni, hogy az üstbe adagolt ötvözők **nem** eredményezik azonnal az acél összetételének megváltozását, mert bizonyos időt vesz igénybe a feloldódásuk. A szimulációban légy megbizonyosodva arról, hogy elégséges időt engedél a beadott ötvözők feloldódására a következő trendek megfigyelésével:

- A por és finom részecske-adalékok gyorsabban oldódnak fel, mint a durva részecskék és kavicsok;
- Az üst keverése/azaz argonos buborékoltatása) gyorsítja a feloldódás folyamatát és ez is fontos a folyékony acél összetételének homogenizálása szempontjából;
- A keveredési idők nőnek a hőmérséklet csökkenésével ,

Várható, hogy az erősen kevert por adalékolások nagyobb hőmérsékleteken oldódnak fel gyorsabban.

Kisebb hőmérsékleteken beadott rudak oldódása keverés nélkül sok percet vesz igénybe és az üstben levő acél nem homogenizálódhat arra az időpontra, amikor eléri az öntőgépet.

Mikor végezz adagolásokat?

Üstbe adagolást csapoláskor és az egyes üstmetallurgiai acélgyártás során lehet elvégezni (keverő állomás, gázalanítók, CAS.-OB és üstkemence).

Tömeges adagolásokat normálisan a csapoláskor hajtanak végre, míg a „**kiigazító**” **adagolásokat** a következő szakaszokban végzik.

Nagyfontosságú, hogy a beadagolásokat az acél dezoxidálása előtt vagy után hajtod-e végre.

Az adalékok hűtő hatása

Legtöbb üstadagolás acélhőmérséklet csökkenést okoz. Ennek szimulálására tételezd fel, hogy minden egyes 1000 kg 6 °C fürdő-hőmérséklet csökkenést okoz. (A valóságban a pontos mérték a különböző oldódó anyag hőkapacitásától és oldódási hőjétől függ.)

Egy fontos kivétel az aluminium, amely exotermikusan reagál a jelenlevő oxigénnel (vagy az acélban oldódva, vagy lándzsán át befúvatva) az acél hevítésére. Lásd a 6.6.2 „hőmérséklet” bekezdést.

6.8.2. Dezoxidáció

Ez a fejezet megegyezik a 4.8.4. fejezetben szerepeltetett anyaggal.

6.8.3. A C-oxidációja

6.8.3.1. A C-oxidáció termodinamikája

Az acélban oldott karbon eltávolítása a vákuumos gáztalanítás során a következő reakciók eredménye:



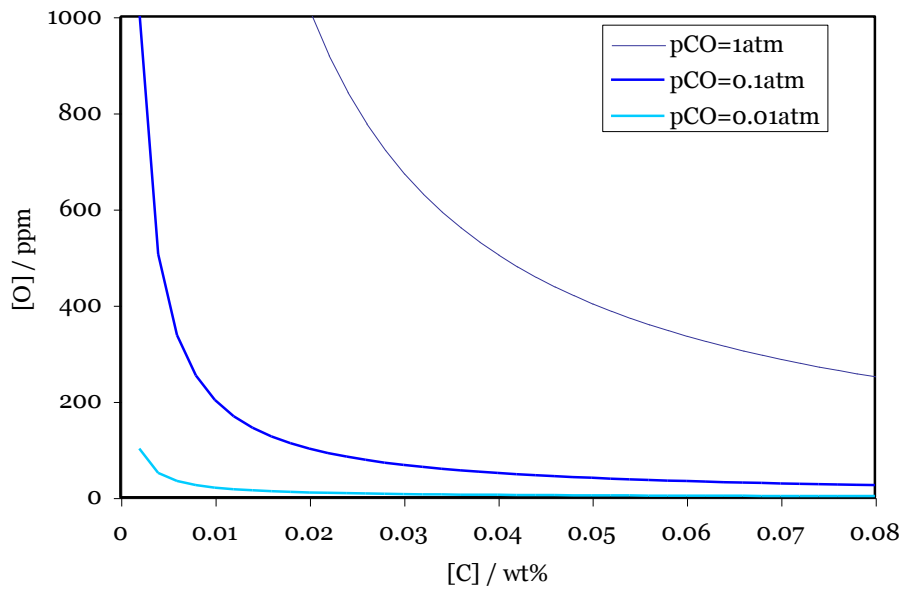
amelyre vonatkozóan az egyensúlyi állandót az alábbi összefüggés adja:

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C a_O} \quad (6.7)$$

Kis koncentrációknál a C és O aktivitásai egyenlőek koncentrációikkal és így:

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{[\%C] \cdot [\%O]} \quad (6.8)$$

$$\log K_{C-O} = \frac{1,168}{T[K]} + 2.07 \quad (6.9)$$



6.6. ábra [C] - [O] koncentrációk különböző nyomásokon

6.8.3.2. A C-oxidáció kinetikája

A dekarbonizáció sebességét a következő egyenlet adja:

$$\ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{\text{equ}}}{[\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}} \right\} = -k_C t \quad (6.10)$$

ahol

- $[\%C]_f$ = a karbon koncentráció t idő után
- $[\%C]_i$ = induló karbon koncentráció
- $[\%C]_{\text{equ}}$ = egyensúlyi karbon koncentráció
- k_C = a C-oxidáció sebesség-állandója, perc^{-1} -ben

Átrendezve a (6.10) egyenletet a végső karbon koncentrációra adódik:

$$[\%C]_f = [\%C]_{\text{equ}} + ([\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}) \exp(-k_C t) \quad (6.11)$$

ahol $[\%C]_i$ és $[\%C]_f$ a karbontartalmak a dekarbonizálás előtt és után, $[\%C]_{\text{equ}}$ az egyensúlyi karbon tartalom és k_C a C-oxidáció sebesség-állandója. Az RH- gáztalanítóra a következő összefüggés adja meg a sebesség-állandót:

$$k_C = \frac{Q}{V_b \rho} \frac{q}{\frac{Q}{\rho} + q} \quad (6.12)$$

ahol

- Q = a folyékony acél keringési sebessége, kg /perc -ben
- V_b = az üstben levő acélfürdő térfogata, m^3 -ben
- ρ = a folyékony acél sűrűsége, $\sim 7200 \text{ kg/m}^3$ -ben

q = a dekarbonizáció térfogati tömegátadási együtthatója, m^3/perc -ben

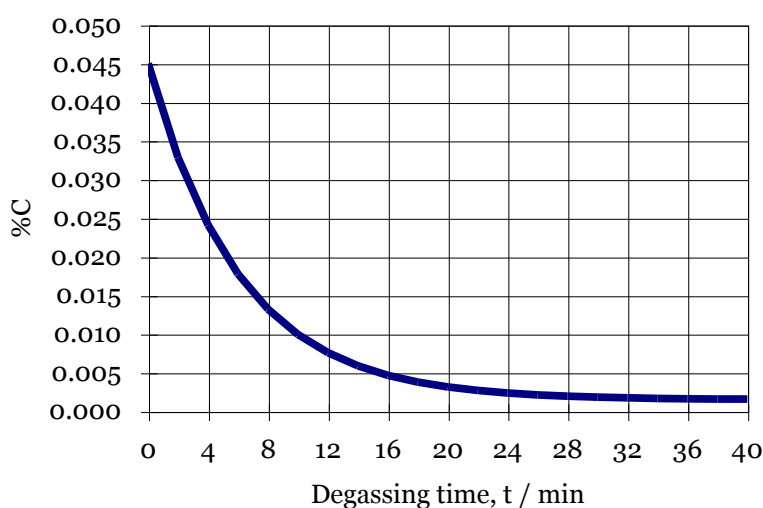
Erre a szimulációra jellemző értékeként vehetjük fel a következőket: $Q = 80\,000 \text{ kg/perc}$, $V_b = \text{acéltömeg} / \text{sűrűség} = 250\,000 / 7\,200 = 34,7 \text{ m}^3$ és $q = 18 \text{ m}^3/\text{perc}$. Ezeket az előző egyenletbe helyettesítve nyerjük:

$$k_c = \frac{80,000}{34,7 \times 7,200} \frac{18}{\frac{80,000}{7,200} + 18} = 0.164 \text{ min}^{-1}$$

Példa

Mennyi időt vesz igénybe egy 0,045% C-tartalmú acél dekarbonizálása 0,0002%C-ig, feltételezve, hogy a $[\%C]_f$ egyensúlyi karbontartalma 0,0015?

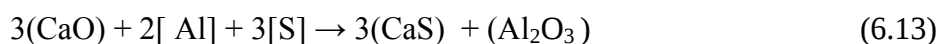
$$t = -\frac{1}{k_c} \ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{\text{equ}}}{[\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}} \right\} = -\frac{1}{0.164} \ln \left\{ \frac{0.002 - 0.0015}{0.045 - 0.0015} \right\} \approx 27 \text{ min}$$



6.7. ábra Öntési időtartam, t/perc

6.7.4. Kéntelenítés

Bizonyos acélfajták, mint például a gáz és olaj szállítására szolgálók igen alacsony kénszintet igényelnek. Az üstben végbemenő kéntelenítést az alábbi kémiai reakció vezérli:



A gyakorlatban ezt az alábbiakkal érik el:

- Szintetikus CaO-alapú kéntelenítő salak üstbe adagolásával csapoláskor;

- Az acél **aluminiumos dezoxidálásával** igen kis oxigénaktivitásig (különben az Al elsősorban az oxigénnel reagál);
- Az acél **erőteljes keverésével** az üstgáztalanítóban a acél és fém alapos elegyítésével.

Ezeknek a lépéseknek mindegyikének folyamat szabályozás következik az alábbiakban.

6.8.4.1. Kéntelenítő salak adagolása

Lehetőség van szintetikus Cao-alapú salak bedagolására a szimuláció elején, a csapolás előtt. Alalmazd a beállítást az alábbiakhoz:

- Írd elő a beadagolandó **salak tömegét**. Minél több salakot adagolsz be, annál több kén tudsz eltávolítani, azonban szembe kell ezt állítani a salak költségével.
- Írd elő a **salak összetételét** a CaO és az Al₂O₃ arányának figyelembe vételével. A nagyobb CaO-koncentrációjú salakok hajlamosak nagyobb L_S kénmegoszlási hányadosra és ez hatékonyabb a kén eltávolítására. Azonban a salak megmerevedésének kockázata van ezen nagyobb CaO-szinteken, hacsak nem tartasz fenn elég nagy hőmérsékletet.

Az elméletben a [%S]_{equ} = [%S]_{egyens} „egyensúlyi” kén koncentráció adott salakra az alábbi:

$$[\%S]_{\text{equ}} = [\%S]_0 \frac{\left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_s} \right)}{1 + \left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_s} \right)} \quad (6.14)$$

ahol

[S%]₀ = a kezdeti kén koncentráció súly%-ban

W_S = a salak súlya kg-ban

W_m = a fém súlya kg-ban

L_S = a salak és az acél közti kénmegoszlási arány

A (6.14) egyenletet át lehet rendezni a szükséges salak mennyiségére annak érdekében, hogy megkapjuk az előírt ([%S]_{aim}) kén koncentrációt, azaz [%S]_{aim} = [%S]_{cél} = [%S]_{egyens} behelyettesítéssel:

$$W_s = \left(\frac{W_m}{L_S} \right) \left(\frac{[\%S]_0 - [\%S]_{\text{aim}}}{[\%S]_{\text{aim}}} \right) \quad (6.15)$$

Az L_S értéke a salak összetétele, az acél oldott aluminium tartalma, az cél hőmérséklete, stb. komplex függvénye. Világos, hogy az alkalmazandó kéntelenítő salak mennyiségének és költségének minimalizálása érdekében nagy L_S érték kívánatos. 1,2 körüli CaO:Al₂O₃ arány megválasztásával, az acél Al-mal való teljes dezoxidálásával és jóval 1600°C feletti hőmérsékleten L_S = 500 és efeletti értéket érhetsz el.

Példa

Feltételezve egy 0,008 súly%-os kén koncentrációt és egy L_S = 500 kénmegoszlási arányt, mi az a lehető legkisebb kéntelenítő salak mennyisége, amit egy 250 tonnás acéladaghoz kell beadagolni 0,002 súly% S-szint eléréséhez?

A (66) egyenletet alkalmazva:

$$W_s = \left(\frac{250}{500} \right) \left(\frac{0.008\% - 0.002\%}{0.002\%} \right) = 1.5 \text{ tonnes}$$

N.B. A kéntelenítés kinetikája olyan, hogy az „egyensúlyi” 0,002% kén szintjét a gyakorlatban csak végtelen hosszú keverési idővel lehet elérni.

6.8.4.2. Dezoxidálás

Mielőtt keverünk az üstgáztalanítóban, az acélt teljesen dezoxidálni kell alumíniummal. Lásd a 4.8.4. fejezetet(Dezoxidáció).

6.8.4.3. Keverés az üstgáztalanítóban

A kéntelenítést folyékony fázisú tömeg átadás szabályozza. Gyors kéntelenítés elérése érdekében fontos a fém és a salak közti jó keveredés. Ezt erőteljes Ar gáz keveréssel érik el az **üstgáztalanítóban**, nagy vákuum-szinten.

- Az ε **keverési teljesítmény sűrűség** az Ar gáz áramlási sebessége és a tartály nyomás függvénye a (6.23) egyenlet szerint.
- k_s **kéntelenítési sebesség-állandó** úgy tűnik, hogy elég lassan nő az ε -nal kis értékeinél, de ε gyorsan nő $\varepsilon \sim 70 \text{ W /tonna}$ felett. Ez azzal a ténnyel indokolható, hogy egy kritikus keverési teljesítmény sűrűség szükséges a salak acélban emulgeálódásához. Ebben a szimulációban feltételezhető:

$$k_s = 0.031\varepsilon^{0.25} \text{ for } \varepsilon < \sim 70 \text{ W tonne}^{-1} \quad (6.16)$$

és

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \varepsilon^{2.1} \text{ for } \varepsilon > \sim 70 \text{ W tonne}^{-1} \quad (6.17)$$

$$t = \frac{\ln \left[\frac{[\%S]_t}{[\%S]_0} \left\{ 1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right\} - \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right]}{-k_s \left[1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right]} \quad (6.18)$$

Példa

Egy 250 tonnás üstben levő, 0,01%S-tartalmú acélt 2 tonna, $L_s = 500$ értékű kéntelenítő salakkal fedték le. A dezoxidálás után Ar-t fúvattak be $\varepsilon = 100 \text{ W tonna}^{-1}$ keverési teljesítmény sűrűséggel. Számítsd ki a 0,003% S-tartalom eléréséhez szükséges időt.

Először számítsd ki k_s -t $\varepsilon = 100 \text{ W /tonna}$ -ra az (5.17) egyenlet segítségével.

$$K_s = 8 \times 10^{-6} \times 100^{2.1} = 0,127 \text{ min}^{-1}$$

Most helyettesítsd be ezt az értéket a (6.18) egyenletbe:

$$t = \frac{\ln \left[\frac{0.003\%}{0.010\%} \left\{ 1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right\} - \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right]}{-0.127 \left[1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right]} \sim 13 \text{ mins}$$

N.B. Erőteljes Ar-buborékoltatás és igen kis nyomás kombinációja az üstgáztalanítóban túlzott salakfelhabzáshoz vezet és a salak üstből „túlfolyásának” kockázatát. A gyakorlatban a vákuumozó tartályban uralkodó vákuum szintet és Ar áramlási sebességet finoman kell beszabályozni a keverő folyamat alatt, megelőzendő ezt az eseményt. Ez azt is jelenti, hogy az ε keverő teljesítmény sűrűség és így a k_s sebesség állandó fluktuál a kéntelenítő kezelés során és azt, hogy az (5.18) egyenlet nem állandósult állapotú.

6.8.5. Hidrogén eltávolítás

6.8.5.1. Termodinamika

A hidrogén eltávolítása az acélból kétatomos gázalakú hidrogén képződésével történik:



ahol
$$\log \frac{[ppmH]}{(p_{H_2})^{\frac{1}{2}}} = -\frac{1,900}{T} + 2.423 \quad (6.21)$$

6.5. táblázat Összefüggés az egyensúlyi oldott hidrogén koncentráció és a nyomás között 1600°C

pH_2	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.10
0.01	2.56
0.001	0.81

A gyakorlatban A korszerű gáztalanítók egészen 0,0001 atm nyomást is elérhetnek, így optimális üzemi körülmények között 1 ppm –nél kisebb hidrogén-szintű acélokat lehet gyártani.

6.8.5.2. A hidrogén eltávolításának kinetikája

Világos, hogy a fent tárgyalt igen kis nyomásokat csak az acél felső felületén lehet elérni, ha azt vákuumnak tesszük ki. Az üst fenekén a ferrosztatikus nyomás ~5 atmoszféra, ami a (6.21) egyenletből 57 ppm egyensúlyi hidrogén koncentrációnak felel meg 1600 °C-on. Ezért nagy, erőteljes keverésből adódó fém cirkuláció szükséges a fém teljes gáztalanításához.

A hidrogén eltávolítás kinetikáját ezért az anyagátadás uralja a folyékony acélban, amelyre a sebesség-egyenlet a következő:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f - [H]_{\text{equ}}}{[H]_i - [H]_{\text{equ}}} \right\} = -k_H t \quad (6.22)$$

ahol

- $[H]_f$ = a hidrogén koncentráció t idő után tömeg- ppm-ben
 $[H]_i$ = a kezdeti hidrogén koncentráció tömeg ppm-ben
 $[H]_{\text{equ}}$ = az egyensúlyi hidrogén koncentráció tömeg-ppm-ben
 K_H = a hidrogén eltávolításának sebesség-állandója, min^{-1}

Átrendezve a (6.22) egyenletet a végső hidrogén koncentrációra adódik

$$[H]_f = [H]_{\text{equ}} + ([H]_i - [H]_{\text{equ}}) \exp(-k_H t) \quad (6.23)$$

Az **üstgáztalanítóban** a k_H sebességi állandót túlnyomóan az argon keverő gáz áramlási sebessége határozza meg. A folyó szimulációra feltételezheted a következő összefüggést:

Vákuumozó berendezés	k_H , perc^{-1}
Üstgáztalanító	$0,0576 V + 0,02$ ahol V az argon áramlási sebessége Nm^3/perc -ben
Keringtető gáztalanító	0,13

6.8.6 Üstkeverés

Az acélfürdő hőmérsékletének és összetételének homogenizálását argon buborékoltatással elsősorban a befúvatott gáz felhajtó energiájának szétszóródása okozza. A következő egyenlet szolgál a keverő teljesítmény kiszámítására:

$$\varepsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1+H}{1.48P_0} \right) \quad (6.24)$$

ahol

- ε = keverő teljesítmény, W /tonna
 V = gázáramlási sebesség, Nm^3/perc
 T = fürdő hőmérséklet, K
 M = fürdő tömege, tonna
 H = a gázbefúvatás mélysége, m
 P_0 = gáznyomás a fürdő felszínén, atm (azaz $= 1 \text{ atm}$, amikor az acél légnyomásnak van kitéve)

6.8.7 Villamos újrahevítés

A fürdő hőmérsékletének ΔT - vel emelésére szükséges E energia, 100% hatásfokot feltételezve az alábbi:

$$E = mC_p \Delta T \quad (6.25)$$

ahol m a fürdő tömege és C_p a fajlagos hőkapacitás állandó nyomáson. Átalakítva az összefüggést, az elméleti hőmérséklet-növekedés:

$$\Delta T_{\text{th}} = \frac{E}{mC_p} \quad (6.26)$$

Ezért az elméleti hevítési sebesség $(dT/dt)_{th}$ így írható fel:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{th} = \frac{dE}{dT} \cdot \frac{1}{mC_p} = \frac{P}{mC_p} \quad (6.27)$$

ahol P a hevítési teljesítmény. Így a Δt időben a hőmérséklet emelkedése az alábbi:

$$\Delta T_{th} = \frac{P\Delta t}{mC_p} \quad (6.28)$$

Persze a hevítés nem 100%-os hatékonyságú, mivel hőveszteség van az elektródáknál, az atmoszférán, az üst tűzálló falazatán, stb. Az η elektróda hatékonyságot a tényleges hevítésnek (T_{act}) az elméleti hevítéshez (T_{th}) való aránya határozza meg:

$$\eta = \frac{\Delta T_{act}}{\Delta T_{th}} \quad (6.29)$$

$$\Delta T_{act} = \frac{\eta P \Delta t}{mC_p} \quad (6.30)$$

vagy egy igényelt hőmérséklet növekedéshez (ΔT_{req}) szükséges hevítési időre kifejezve:

$$\Delta t = \frac{mC_p \Delta T_{req}}{\eta P} \quad (6.31)$$

6.8.8 Acéltisztaság

A 4.8.2 fejezet azt mutatta be, hogy az alumíniumos dezoxidáció Al_2O_3 részecskék képződését eredményezi a folyékony acélban. Mivel ezek nem képesek felúszni a salakba az öntés előtt, ezek a részecskék zárványokként kerülnek be a végtermékbe. Sok vevőnél egy bizonyos mennyiségű Al_2O_3 zárvány nem befolyásolja szignifikánsan a felhasználói tulajdonságokat. Azonban bizonyos alkalmazások során, mint például az olaj és gáz szétosztására szolgáló vezetékcsövek igen „tisztá” acélt igényelnek – azaz igen kis oxid és szulfid zárvány-szinteket, mivel ezek repedések kiinduló helyei lehetnek.

Az oxidok és szulfidok képződésének kémiája és az azt követő eltávolításuk az üstmetallurgia során rendkívül összetett és folyó kutatás tárgya. A zárványok átfogó kezelése ennek a szimulációnak működési területén kívül esik. Azonban megkívánják tőled, hogy figyelembe vedd az Al_2O_3 képződésével kapcsolatos széles dezoxidációs hatást és hogy biztos legyél abban, hogy elégséges időt engedtel az Al_2O_3 részecskék felúszásához. Ezt a folyamatot az üst enyhe keverésével meggyorsíthatod.

Az alumíniumos dezoxidáció során Al_2O_3 részecskék képződnek. Úgy találták, hogy a közepek részecske-átmérő (és ezzel a flotáció sebessége) a kezdetben oldott oxigén tartalomtól függ.

- A nagyobb kezdeti oldott oxigén tartalmak esetében (körülbelül 200 ppm felett) nagyobb Al_2O_3 részecskék képződnek, amelyek a Stokes-törvény szerint (lásd alább) viszonylag gyorsan úsznak fel a salakba.
- Kisebb kezdeti oldott oxigén tartalmak kisebb Al_2O_3 részecskéket eredményeznek, amelyek több időt igényelnek a felszálláshoz.

A Stokes törvény azt állítja, hogy az u végső flotációs sebesség gömbalakú részecskékre (vagy buborékokra) arányos a d átmérő négyzetével az alábbi szerint

$$u = \frac{gd^2\Delta\rho}{18\eta} \quad (6.32)$$

ahol

$$g = 9,81 \text{ m/sec}$$

$$\Delta\rho = \text{a részecskék és a folyékony acél sűrűsége közti különbség}$$

$$\eta = \text{a folyékony acél viszkozitása } (\sim 6,1 \times 10^3 \text{ Ns/m}^2 \text{ 1600}^\circ\text{C-on})$$

A szimulációban „megjutalmaztak” az egy végtében kivitelezett dezoxidáláshoz szükséges alumínium mennyiségének pontos kiszámításáért. Ha további „kiigazító” Al adagolásra van szükség, a kisebb oldott oxigén tartalom olyan, igen kicsi Al_2O_3 részecskék képződését eredményezi, amelyeket nehéz lesz az acélból eltávolítani.

Célod „mérsékelt”, „kicsi” vagy „igen kicsi” zárványszint elérése a kiválasztott acélfajtától függően.

6.5 táblázat A kiinduló oldott oxigén és keverés hatása az „igenkis” zárványszint eléréséhez szükséges időre. Kis szintekre 20%-kal lehet csökkenteni az időket; „mérsékelt” szintekhez körülbelül 40%-kal.

Kezdeti oldott oxigén, ppm	Nincs keverés	keveréssel
600	14 perc	5 perc
100	47 perc	15 perc
30	108 perc	36 perc

7. A FOLYAMATOSÖNTÉS

(a Continuous Casting szimulációja [7])

A szekundér acélgyártás után a folyékony acélt rendszerint folyamatosan öntik a közbenső üstön keresztül a vízzel hűtött réz kokillába, amelyben vékony megszilárdult kérget képez. Ezt a „szálat” húzzák tovább vezető görgők során keresztül és hűtik tovább finom vízpermetet szórva rá. A megszilárdult kéreg tovább vastagodik a szál teljes szelvényében végbemenő megszilárdulásáig. Ezután a megkívánt hosszra vágják a szálat és vagy a tároló térségbe vagy a meleghengerműbe szállítják. A végső felhasználástól függően a száldimenzió széles skáláját lehet leönteni: „brammát (laposbugát)” a lemez vagy szalag alakú lapostermékekre, „blokkbugát” a gerendára és „bugákat” a hossztermékekre, például huzalra. Vékony, (<3 mm vastagság) szalag közvetlen öntésére is kifejlesztettek technológiát és az öntött szalag már rendelkezésre áll a kereskedelemben

A www.steeluniversity.org honlapon a folyamatosöntés tananyaga az alábbi fejezeteket öleli fel (dőlt betűkkel az eredeti angol szöveg, alatta magyarul a fordítás):

- | | |
|--|-----------|
| 1. Continuous Casting: Introduction | |
| Folyamatosöntés:bevezetés | |
| 2. Temperature Control | Hőmérsék- |
| letmérés | |
| 3. Mold Oscillation Settings | Kris- |
| tályosító osszcillálásának szabályozása | |
| 4. Heat Flux in the Mold | Hő- |
| áramlás a kristályosítóban | |
| 5. Heat Flux in the Secondary Cooling Zone | Hő- |
| áramlás a szekundér hűtőzónában | |
| 6. Critical Strain During Continuous Casting | |
| Kritikus alakváltozás a folyamatos öntés alatt | |
| 7. Bulging Strain | Kiha- |
| sasodási alakváltozás | |
| 8. Bending and Straightening Strain | |
| Hajlító és egyengető alakváltozás | |
| 9. Misalignment Strain | |
| Helytelen beállítás okozta alakváltozás | |
| 10. Combined Strain in the Strand | |
| Kombinált alakváltozás a szálaban | |
| 11. Internal Crack Formation Through Hot Tearing | |
| Melegrepedésből származó belső repedés-képződés | |
| 12. Transverse Cracking | Ke- |
| resztirányú repedésképződés | |
| 13. Microsegregation | |
| Mikrodúsulás | |
| 14. Continuous Casting Simulation | |
| A folyamatosöntés szimulációja | |

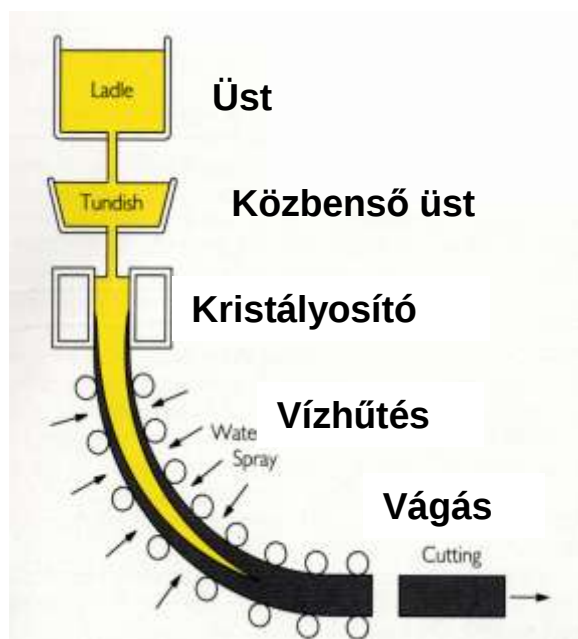
E fejezetek áttekintő jelleggel elemzik a vonatkozó tananyagrészeket azért, hogy a virtuális acélgyártás (szimuláció) előtt elméleti-gyakorlati szempontból a szimulációt végző személy képbén legyen. Ennél sokkal részletesebb elemzés szerepel a Károly Gyula – Réger Mihály-Harcsik Béla : Acélöntés, speciális acélgyártás c. jegyzetben [13], ezért javasolandó szimulációt megelőzően ennek a tananyagnak az elsajátítása, s azon videórészletek megtekintése, mely e jegyzet számára készültek az acélok üstmetallur-

giai kezelése megértése céljából (a [13] jegyzet forrásként a folyamatosöntés itt felsorolt 13 pontjában foglaltakat is figyelembevette, felhasználta, ettől függetlenül a steeluniversity ezen 13 pontja is elemezhető, animációi-videói segédeszközként használhatóak). Ezek előrebocsajtása után szerepeltetjük az acélok üstmetallurgiai kezelése szimulációjára vonatkozó anyagrészt lényegi részeit magyarra fordítva.

A folyamatosöntés **szimulációja** egy dokumentum felhasználó-útmutatónak készült dokumentum, ami a [http://www.steeluniversity.org/Steel Processing/Continuous Casting-on](http://www.steeluniversity.org/Steel_Processing/Continuous_Casting-on) található. Ezt az interaktív szimulációt a tananyag szerzői [7] **oktatási és gyakorlási eszköznek** készítették mind az acélmetsallurgia hallgatói, mind az acélipar alkalmazottai számára.

7.1 Bevezetés a folyamatos öntésbe

Az acél folyamatos öntése olyan eljárás, amelyben a folyékony acél folyamatosan fémzárlá merevedik.



7.1 ábra Acélok folyamatos öntése

A szál méreteitől függően ezeket a féltermékeket brammának, blokkbugának vagy bugának hívják. Az eljárást az 1950-es években találták fel, megkísérelve az acéltermelés termelékenységének javítását. Azelőtt csak tuskóöntés volt, amelynek ugyan megvannak az hasznai és előnyei, de nem mindig felel meg a termelékenységi igényeknek. Ettől fogva a folyamatos öntést a kihozatal, a minőség és a költség-hatékonyság javítására fejlesztették tovább

A folyékony acélt a folyamatos öntőgéphez a szekundér – üstmetallurgiai - acélgyártó üzemből szállítják. Az üstöt általában daru segítségével mozgatják és helyezik el az üstforgató berendezésbe, amely aztán az öntő pozícióba forgatja az üstöt. Az üst fenekén levő tolózárat nyitják ki, hogy lehetővé tegyék a folyékony acél áramlását a védő burokból a közbenső üstbe, amely olyan tartály, ami kiegyenlítőként működik az üst és a kristályosító között. Amint megtelt a közbenső üst, felemelik a dugózárt rudakat abból a célból, hogy

lehetővé tegyék az acél öntését a vízzel hűtött rézkristályosítókba a közbenső üst alatt. A megmerevedés a kristályosító falainál indul meg és az acélt a kristályosítóból a kristályosító rúddal húzzák ki. Amint az elhagyja a kristályosítót, az acél-szál kérgének megfelelő vastagságúnak kell lennie, hogy megtarthassa a benne levő folyékony acélt, azaz ellenálljon a ferrosztatikus nyomásnak.

A teljes öntési folyamat alatt függőlegesen oszcillál a kristályosító annak érdekében, hogy elváljon a megszilárdult acél a kristályosítótól. Ezt a különválást később megkönnyítették öntőpornak a kristályosítóba bevitelével.

A szálát a kristályosítóból egy görgősor ívben húzza ki, ameddig a szál vízszintesbe fordul. A görgőket elég közel kell elhelyezni egymáshoz a vékony kéreg kihasasodásának vagy a kitörésnek megelőzésére.

Amint a szál elhagyja a kristályosítót, csak egy vékony megmerevedett kérge van, amely további hűtést igényel a kristályosító folyamat befejezéséhez. Ezt az úgynevezett szekundér hűtő zónában érjük el, amelyben a görgők között elhelyezett vízpermetező rendszert alkalmaznak oly módon, hogy finom vízködöt bocsátanak az acél felületére. Ezen a ponton az acél, a megmerevedett kéreg és a folyékony mag képezi magát a szált.

Miután a szálát kiegyenesítették és teljesen megmerevedett, lángvágóval előre meghatározott hosszakra vágják fel. Ezeket vagy a tároló térre vagy a meleghengerműbe irányítják.

7.1 táblázat. A folyamatos öntő eljárásban alkalmazott szerkezetek feladatainak összesítése.

Szerkezet	Elsőrendű feladat	Másodrendű feladat
Üst	A folyékony acél szállítása és tárolása	Zárvány eltávolítás
Üstfordító	A teli üst pozícióba helyezése a közbensőüst fölé és az üres üst eltávolítása	Szabaddá teszi a darukat a termelési lékenység érdekében
Közbensőüst	Kiegyenlítőként működik az üst és a kristályosító között	Megkönnyíti a zárványok eltávolítását
Kristályosító	Lehűti a folyékony acélt a megmerevedett kéreg kialakítására	
Szálrendszer	Tovább hűti a szálát a teljes kristályosodásig és a szál kiegyengetéséig	

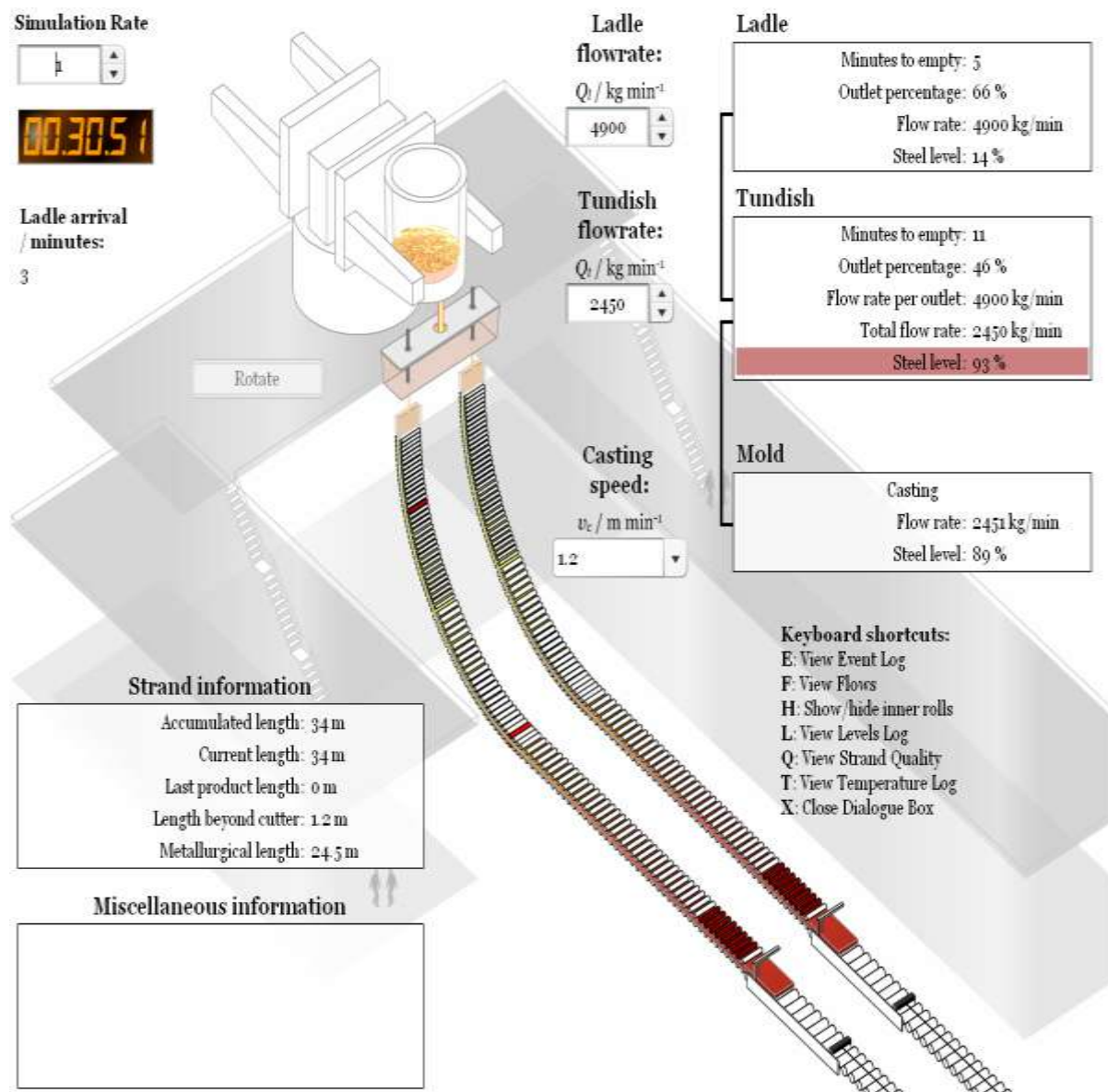
7.2. Szimulációs tárgyak

A szimuláció célja a **felületi minőségre**, a **belső minőségre** és a **zárványtartalomra** vonatkozó specifikált kritériumoknak megfelelő eredményes háromüstös szekvens öntés.

Célok lehet az egész művelet **költség-minimalizálása** is.

7.3. Üzemelrendezés és leírás

A szimulációban szereplő üzem a 7.2 ábra szerinti kialakítású. A szimuláció indulásakor teli üst van elhelyezve a közbenső üst fölé.



7.2 **ábra** Screenshot showing the plant layout used in the simulation. Two ladles are positioned in the ladle turret which turns to position the ladle over the tundis

7.3.1 Az öntőgép méretei

A szimuláció három különböző öntőgépet foglal magába, amelyeket négy különböző acél fajta leöntéséhez használnak Ezek bramma (lapos buga), blokkbuga és buga öntőgépek.A különböző öntőgépek tulajdonságait az alábbi táblázat sorolja fel.

7.2 táblázat. Az öntőgép-tulajdonságok táblázata

Tipus	Bramma	Blokkbuga	Buga
Acél fajta	Vezetékcsőacél ULC(IKC) acél	Szerkezeti acél	Járműipari acél
Üstnagyság/tonna	250	100	100

Sugár/m	9	12	8
Szálak száma	2	5	6
Öntési sebesség/m min ⁻¹	1,0-2,0	1,2-1,8	3-5
Keresztszelvény méret/mm	1200x230	250x250	130x130
Tipikus alkalmazás	Lapos termékek, durvalemez, lemez, tekercsek	Hossztermékek, rudak, tartók, cölöpök	Hossztermékek, rudak, csövek, huzalok
Görgőtáv, I szekció/mm	202 (35 görgő 45°-ban)		
Görgőtáv, II szekció/mm	283 (25 görgő 45°-ban)		
Hajlítás/egyengetés	R ₅₆ =9, R ₅₇ =11,3	R ₅₈ =15, R ₅₉ =22,6,	R ₆₀ = 45,2

7.4. Szimulációs célok

Mielőtt megkezdted a szimulációt, fontos, hogy előre tervezz. Az első tennivaló egy olyan megcélzott öntési sebesség megválasztása, amely lehetővé teszi az acél minden minőségi kritériumot kiálló leöntését. Másodszor: a kristályosító oszcillálásának beállítása fontos azért, hogy biztosítsa az elég jó felületi minőséget. Végezetül a folyékony acél hőmérsékletét, valamint a második és a harmadik üst megérkezését megfelelően kell betervezni

Ez a fejezet olyan alapvető tudományos elméleteket és összefüggéseket mutat be, amelyek szükségesek a szimuláció sikeres befejezése érdekében. Semmi esetre sem terveztük azt a folyamatos öntés elmélete és gyakorlata széleskörű kezelésére – erre az alkalmazót egyéb kiváló publikációkhoz irányítjuk.

7.4.1 Szimulációs mód

A szimuláció két mód egyike szerint futtat le:

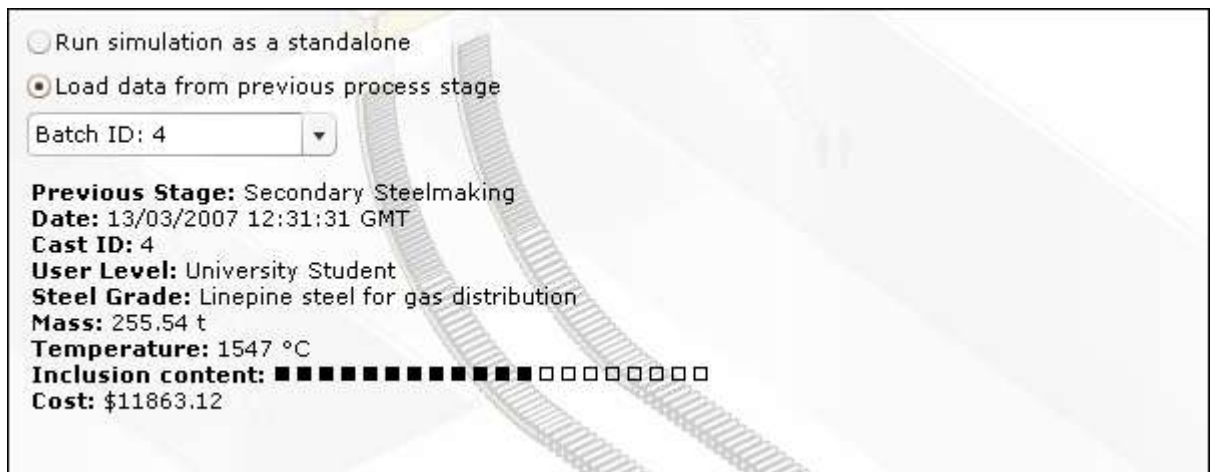
- Standalone mód
- Irányított mód

7.4.1.1 Standalone mód

Ezen mód szerint képes lesz alkalmazó szinted, az acél fajtája és minden öntési paraméter,- beleértve az üstrendelést és a hőmérsékletet - megválasztására. A kezdeti szimulációs paraméterek, mint amilyen az összetétel, üsttömeg, zárványtartalom, alapértelmezés szerint vannak beállítva

7.4.1.2 Irányított mód

Ezen mód szerint az olyan paraméterek, mint az alkalmazó szintje, az acél fajtája, az üstben levő acél összetétele, hőmérséklete, tömege és zárványtartalma mind letölthetők az egyik üstmetallurgiai adagodból. Használd a lecsepegtető (?) menüt a rendelkezésre álló (ID adag) bemutatására és kiválasztására: a részletek alább láthatók (lásd a 6-1 ábrát). Jegyezd meg, hogy a zárványtartalmat egy skála alapján mutatja be. Hogy hozzáférhetővé tedd ezt a tulajdonságot, regisztrálnod és jegyzőkönyvezned kell a megfelelő helyen.



7.3 ábra Screenshot showing data loaded from previous process stage

7.4.2 Alkalmazó szintek

A szimulációt két különböző alkalmazói csoportra fejlesztették ki:

- A metallurgia, anyagtudomány és más mérnöki diszciplina egyetemi hallgatói.
- Acélipari üzemi technikusok.

7.4.2.1 Egyetemi hallgató szint

Ezen a szinten elvárják a hallgatótól, hogy a problémát tudományosan, a releváns termodinamikai és kinetikai elméletek alkalmazásával közelítse meg annak érdekében, hogy a különböző eljárás lehetőségek közül válasszon.

Például az alkalmazónak el kell határoznia, hogy melyik öntési sebesség és szekundér hűtési sebesség-kombináció eredményez jó minőségű szálát.

Ezen a szinten nem kell megoldani műveleti problémákat és az öntés viszonylag zavartalan.

7.4.2.2 Acélipari üzemi technikus szint

Ezen a szinten elvárják tőled, hogy tudományosan közelítsd meg a problémát. Azonban tapasztalatot szerezhetsz egy sor olyan műveleti problémával kapcsolatban, amelyek kiigazítást igényelnek tervezésedhez és szükségessé teszi gyakorlatod felhasználását gyors elhárítások megtételére.

Üzemviteli problémákra vonatkozó tipikus példák, amelyekkel találkozhatasz, az üst megérkezésének csúszása, a kagylószűkülés, és a használatban levő üstök különböző javítási állapota.

Annak érdekében, hogy szimuláljuk a használt üstöket, három javítási állapotot különböztetünk meg: jó, elfogadható és silány. Az üstben levő folyékony acél hűlési sebességét a javítás állapota befolyásolja és a megfelelő értékek: 0,50, 0,75 és 1,00 °C min-1.

Az üstök maximálisan 10 percig késhetnek. Gondod legyen arra, hogy összehasonlítsad a rendelt szállítási időt a becsült megérkezési idővel, ami a szövegben az üstforgató berendezés fölött látható a szimuláció indulása után.

Monitoroznod kell a bemerülő belépő kagylók (SEN) állapotát abból a célból, hogy meghatározd, mikor kell ezeket cserélni a „kagylószűkülés” miatt. A kagylószűkülés a zárványok folyamatos rátapadása a kagylóban az öntés alatt. Ez csökkenti az áramlási sebességet a közbenső üstből a kristályosítóba az áramlási szelvény csökkenése következtében és esetleg a SEN-t cserélni kell. A kagylószűkülés számának minimalizálása céljából állandóan magas folyékony acél-szintet kell fenntartanod a közbenső üstben (ez időt hagy a zárványok felszínre úszásához). Egyetlen út a kagylóbeszűkülés észleléséhez a közbenső üstből való kifolyás sebességének monitorozása. Amikor tovább már nem lehetséges a megkívánt folyási sebesség fenntartása a kitűzött öntési sebesség figyelembe vételével, cserélned kell a kagylókat. Ezt az alábbiakkal éred el:

- Csökkentsd az öntési sebességet
- Állítsd le a kifolyást a közbenső üstből
- Nyomd meg a „SEN” gombot. Szálanként 200\$-ba kerül ez és 15 másodpercig kell tartania a cserének
- Indítsd el a kifolyást a közbenső üstből és töltsd fel újra a kristályosítót.
- Mihelyt újra van töltve a kristályosító, térj vissza a kitűzött öntési sebességre.

JEGYEZD MEG: A kagylócseré alatt fontos a kristályosító kiürülésének elkerülése. Szükségessé válhat az öntési sebesség további csökkentése, ha a kristályosító-szint alacsony marad.

7.4.3 Acélfajták

A szimuláció egy sor különböző acél fajtát foglal magába a különböző eljárási lehetőségek illusztrálására. Az általános célú **szerkezeti acél fajta** repedésre hajlamos, viszonylag igénytelen acél fajta, amelyet **kezdő alkalmazónak** ajánljuk. A szerkezeti acélt blokkbugaöntőgép alkalmazásával öntik 250 x 250 mm szelvényt méretben. A zárványszint mérsékelt lehet más minőségi probléma nélkül.

A **TiNb igenkis karbon acél** tapadásra hajlamos acélfajta, gépkocsi karosszéria részeihez használják maximálisan 0,0035%C –előírással az alakíthatóság optimalizálása érdekében. Ezt az acélt bramma (lapos buga) öntőgépen öntik 1200 x 230 mm keresztzelvény mérettel. Ezen acélfajta tisztasági követelményeinek teljesítésére rendkívül fontos, hogy a zárványszint igen alacsony.

A **cső-acél** a gáz szállítására igen igényes acélfajta, mivel a nagy szilárdság és a magas törési szívósság kombinációja rendkívül kis szennyező-(S,P,H,O és N) és zárvány-szintet igényel. Az igenkis karbon acélfajtaival együtt ezzel az acéllal szemben vannak a legnagyobb igények az igen kis zárványszintekre és mind a két acél fajtát 1200 x 230 mm keresztzelvényt eredményező brammaöntőgéppel öntik. Az összetételtől függően ez az acél akár repedésérzékeny (peritektikus), akár tapadásérzékeny (hipoperitektikus) lehet.

A **járműipari acél** gyengén ötvözött hőkezelhető acél fajta, amelyet 130 x 130 mm keresztzelvénnel bugaöntőgépen öntenek nagy sebességekkel.

7.4.3.1 Repedésre hajlamos fajták

A folyamatos öntés tekintetében az acélfajtákat két alcsoportra osztjuk: repedésre és tapadásra érzékeny fajták.

A repedés (hosszrepedések) komoly probléma a közepes karbontartalmú (0,06 – 0,18%C) acélok esetében. 4% -os különbség van a δ -ferrit és az ausztenit hőszugorodási együtthatója között. Ez feszültséget ébreszt a kéregben és a feszültség hosszirányú repedésben oldódik az acél kéregben. Az általánosan alkalmazott stratégia a feszültségek csökkentése a kéreg minimális vastagságban tartásával. Ezt a vízszintes hőátvitel csökkentésével érik el a szilárd salakréteg vastagságának és a szilárd salakréteg kristályosságának növelése révén.

7.4.3.2 Beragadásra hajlamos fajták

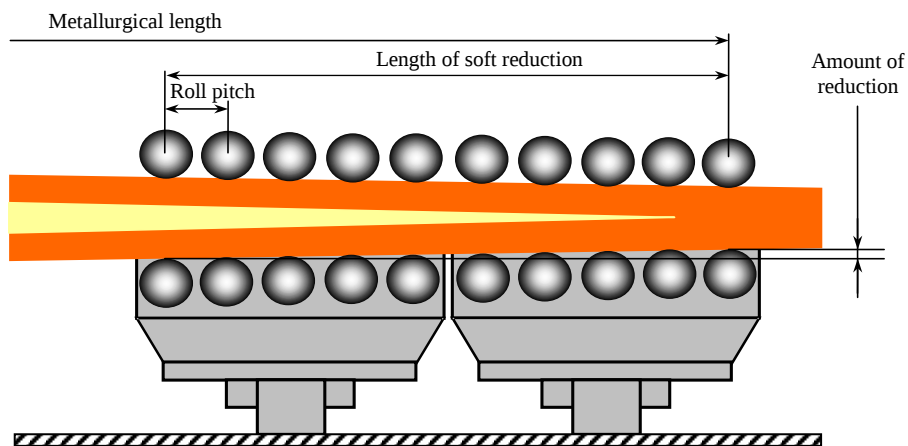
Ezzel ellentétesen tapadási kitörés jön létre akkor, amikor a kéreg nem elég erős ahhoz, hogy ellenálljon a ferrosztatikus nyomásnak és a folyékony acél kiömlik a kéregből. Az itt alkalmazott stratégia célja vastagabb kéreg kialakítása és ezt a vízszintes hőáram növelésével érik el a szilárd salak réteg vastagságának csökkentése és a salakréteg üveges hányadának növelése révén

7.3 táblázat A szimulációban szereplő acélfajták összetétele , %

	Szerkezeti acél	TiNb ULC acél	Cső-acél	Járműipari acél
C	0.1450	0.0030	0.0700	0.4150
Si	0.2000	0.2100	0.1800	0.4000
Mn	1.4000	0.7500	1.0500	0.7500
P	<0.0250	0.0650	<0.0120	0.0350
S	<0.0200	<0.0120	<0.0030	0.0350
Cr	<0.1000	<0.0500	<0.0600	1.0500
Al	0.0350	0.0450	0.0300	0.0225
B	<0.0005	0.0030	<0.0050	0.0050
Ni	<0.1500	<0.0800	<0.0500	0.3000
Nb	0.0500	0.0200	0.0150	0.0000
Ti	<0.0100	0.0300	<0.0100	0.0000
V	<0.0100	-	<0.0100	0.0100
Mo	<0.0400	<0.0100	<0.0100	0.2250
As	-	<0.0010	-	0.0000
Ca	-	-	<0.0050	0.0000
N	<0.0050	<0.0040	<0.0045	0.0050
H	<0.0005	<0.0005	<0.0002	0.0002
O	<0.0010	<0.0005	<0.0007	0.0005

7.4.4 Enyhe redukciós szint

Az enyhe redukció csak a bramma (laposbuga) öntéskor létezik és a magszegregáció erősségének csökkentésére használják. Az enyhe redukciónál némi hatás elérésére az öntési sebességet és a szekundér hűtés sebességét úgy kell megválasztani, hogy a metallurgiai hossz, azaz azon hossz, amelyen az acél mékony a magban, az enyhe redukció zónájában legyen.



7.4 ábra Graphical representation of the soft reduction zone

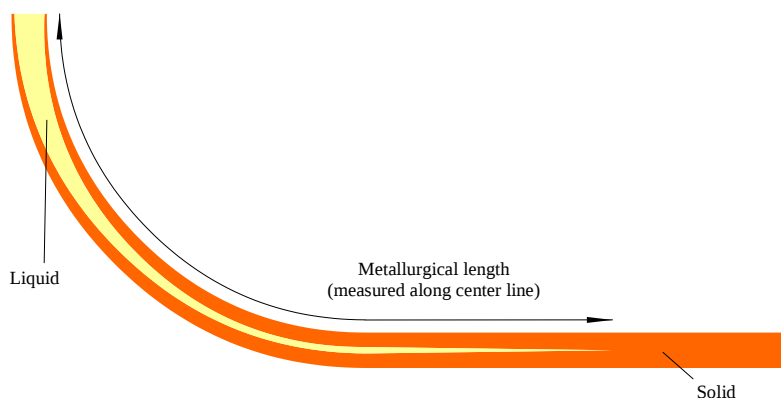
A 7.4 ábrán az enyhe redukció zónája látható. Az enyhe redukció két szegmensen keresztül jön létre, mindegyik 2 méter hosszú. Mindegyik szegmensben 5 görgő van és a görgők között mintegy 400 mm. A redukciós zóna helye a 27 és 31 méter szálhossz között van a vezetékes acél öntésekor és 21 és 24 méter között igenkis karbon acél öntésekor.

A szimulációban három különböző mértékű redukció közül lehet választani. Ez enyhe, közepes és erős, a megfelelő szálrdukció rendre 2,4 mm, 6,00 mm és 10,8 mm. Hasonló feltételeket alkalmaz mind az igenkis karbon (ULC) acélra, mind a cső (LPS) acélra. Mivel az enyhe redukció pozícióját nem lehet megváltoztatni, csak kevés olyan öntési sebesség és szekundér hűtési sebesség kombináció lehetséges, amely az enyhe redukció optimális feltételéhez vezet.

Ez a lehetőség csak akkor áll rendelkezésre, ha az acélfajtát brammaöntő gépen öntik.

7.4.5 Öntési sebesség és szekundér hűtési sebesség

Az öntési sebesség és a szekundér hűtési sebesség kombinációjának helyes megválasztása a legfontosabb. Ez a választás sok különböző paramétert fog befolyásolni az öntés során és egyike a kulcsfontosságú választásoknak a jó minőségű öntés elérésére. Egyik olyan paraméter, amelyet közvetlenül befolyásol ez a döntés, a **metallurgiai hossz**, az a távolság a kristályosítótól számítva, amelynél a szál teljesen szilárd.



7.5 ábra **Diagram illustrating metallurgical length**

A metallurgiai hossz az acél összetételének, az öntési sebességnek, a hűtés sebességének és a szál méreteinek komplex függvénye, melynek kiszámítása kívül esik ennek a szimulációnak területén. Annak érdekében, hogy segítsünk informálódni öntési paramétereiddel kapcsolatos döntésekről, az alábbi táblázatot készítettük.

A különböző típusú öntőgépeknek különböző lehetséges öntési sebességei és hűtési sebességei vannak, lásd alant az ezen paramétereiktől függő metallurgiai hosszak táblázatát.

7.4 táblázat. Metallurgiai hosszak 250x250 mm méretű szerkezeti acél blokkbuga öntőgépen való öntésére.

Hűtési sebesség/kg víz/kg acél	Öntési sebesség , m/perc			
	1.2	1.4	1.6	1.8
0.3	22.48	26.55	30.43	34.65
0.4	21.78	25.57	29.10	33.12
0.5	20.96	24.43	27.55	31.26
0.6	20.04	23.17	25.57	29.22

7.5 táblázat Metallurgiai hosszak 1200x230 mm méretű igenkis karbonacél brammaöntőgépen való öntésére

Hűtési sebes- ség/kg víz/kg acél	Öntési sebesség , m/perc					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0.4	19.03	23.06	27.23	31.55	36.06	40.73
0.5	18.30	22.16	26.16	30.30	34.62	39.10
0.6	17.67	21.38	25.23	29.22	33.36	37.70
0.7	17.11	20.70	24.43	28.30	32.28	36.47
0.8	16.63	20.10	23.70	27.46	31.35	35.40

7.6 táblázat. Metallurgiai hosszak 1200x230 mm méretű vezetékcső acél brammaöntőgépen való öntésére

Hűtési sebesség/kg víz/kg acél	Öntési sebesség , m/perc					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0.4	20.17	24.50	28.98	33.65	38.55	43.56
0.5	19.40	23.56	27.86	32.35	37.02	41.87
0.6	18.75	22.74	26.88	31.20	35.70	40.37
0.7	18.17	22.02	26.04	30.21	34.56	39.10
0.8	17.65	21.40	25.30	29.33	33.57	37.97

7.7 táblázat. Metallurgiai hosszak 130x130 mm méretű gépészeti acél bugaöntőgépen való öntésére

Hűtési sebesség/kg víz/kg acél	Öntési sebesség , m/perc			
	1.2	1.4	1.6	1.8
0.3	22.48	26.55	30.43	34.65
0.4	21.78	25.57	29.10	33.12
0.5	20.96	24.43	27.55	31.26
0.6	20.04	23.17	25.57	29.22

7.4.6 Kristályosító oszcillálásának beállítása

Oszcilláló kristályosítót használnak a kristályosító fala és a szál kérge közti súrlódás csökkentésére. Ezt a kristályosító öntőporának a meniszkusztól a szál kérge és a kristályosító falai közti részbe folytatása révén könnyítik meg.

7.4.6.1 Beállítások

S löket [mm]: Általában 3 és 10 mm között van a löket. A löket növelésével arányosan nő a negatív húzási idő (lásd alant). Ezért az oszcillációs jel és a kristályosító öntőporának fogyasztása is nő.

f frekvencia [min⁻¹]: A kereskedelmi hidraulikus kristályosító oszcillátorok 100 és 250 percenkénti ciklusú frekvenciát valósítanak meg. A frekvencia növelésével csökken a negatív húzási idő, ezzel az oszcillációs jelek mélysége és a kristályosító öntőpor fogyasztása is csökken.

t_N [s] negatív húzási idő: A negatív húzási idő az a periódus, amelyben a lefelé haladó kristályosító sebessége nagyobb, mint az öntés sebessége, ami az alábbiak szerint számítható:

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \arccos \frac{1000 v_{\text{cast}}}{\pi f S} \quad (7.1)$$

ahol:

f = frekvencia, min⁻¹:

S = löket, mm

v_{cast} = öntési sebesség, m/perc

d [mm] oszcillációs jelmélység: Bár a kristályosító oszcillálása szükségszerű a folyamatos öntésben, rontja is a felület minőségét az úgynevezett oszcillációs jelek miatt. A folyamatosan öntött szál felületére jellemző az oszcillációs jelek jelenléte, melyek periodikusan képződnek a meniszkusznál a kristályosító fel-le mozgatása miatt. Fontos befolyásuk van a felület minőségére, mivel gyakran forrásai a keresztirányú repedéseknek.

Az oszcillációs jel mélysége a kiválasztott kristályosító öntőportól, az oszcilláció löketétől, az oszcilláció frekvenciájától és az öntés sebességétől függ. A [14] irodalomból vett értékek regressziója alapján:

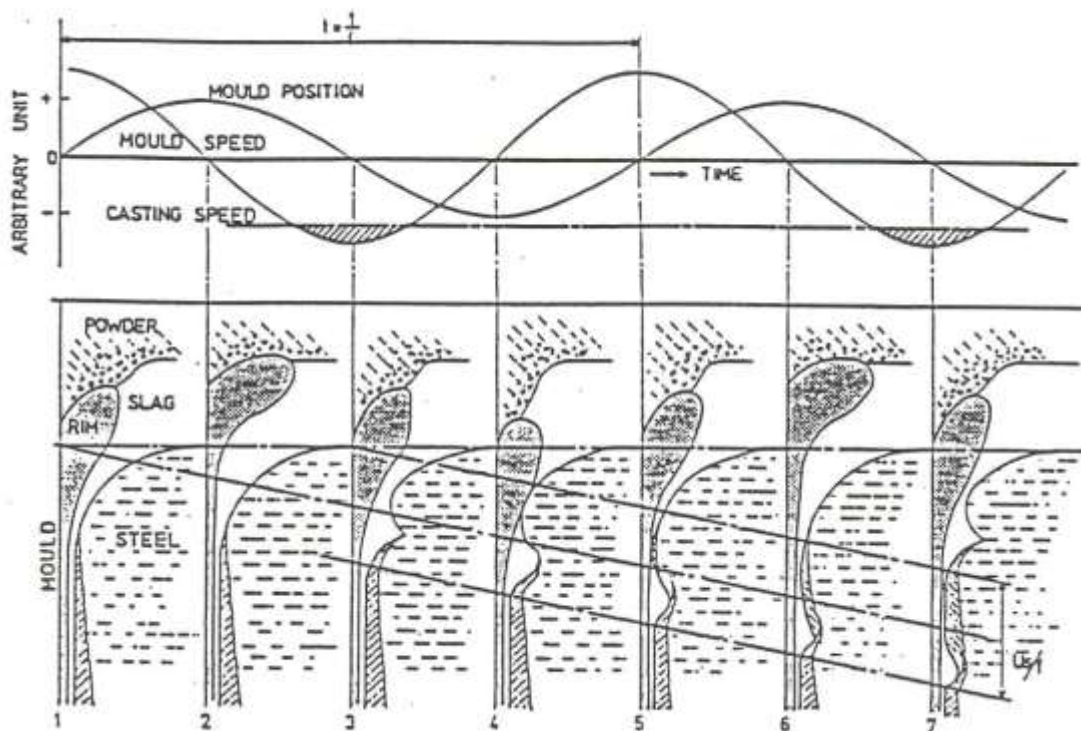
$$d = 0.065 \cdot 1.145^S \cdot (200 \cdot 0.9^S)^{t_N} \text{ , mm} \quad (7.2)$$

ahol:

t_N = negatív húzási idő, s

7.4.6.2 Oszcillációs jelek

A 7.6 ábra mutatja be az oszcillációs jelek képződési mechanizmusát. Az ábra felső része mutatja a kristályosító pozíció-változását az időben. Az oszcillációs jelek képződési mechanizmusát az ábra alsó része érzékelteti. A negatív húzási idő (sraffozott terület) a fő befolyásoló tényező az oszcillációs jelek kialakulására. Növekedő negatív húzási idő az oszcillációs jelek mélységének növekedését vonja maga után.



7.6 ábra Formation of oscillation marks [15]

Annak érdekében, hogy minimalizáljuk az oszcillációs jelek mélységét, lényeges az oszcilláció helyes beállítása. A negatív húzási idő 0,11 s –hoz annyira közel legyen, amennyire csak lehetséges, olyan lökettel, amely lehető legkisebb oszcillációs jelmélységet eredményez.

Jegyezd meg, hogy az elfogadható maximális oszcillációs jelmélység 0,25 mm az igen kis karbon-acélra, míg egy 0,60 mm mélység elfogadható a többi acélfajtákra.

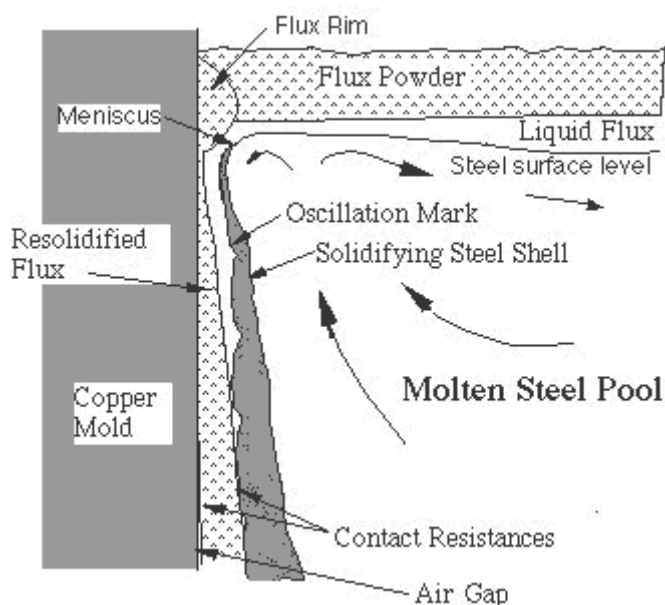
7.4.7 Öntőpor

Az öntőpor egy szintetikus salak, amelyet folyamatosan adagolnak a folyékony tócsa felszínére az öntés alatt. Az öntőpor megolvad és lefolyik a kristályosító fala és a szál kérge között. A megfelelő öntőpor megválasztása kritikus választás az öntött anyag elég jó felületi minősége tekintetében. A megválasztott öntőpor elsődlegesen folyásolja be az oszcillációs jel mélységét és az öntőpor fogyasztást.

Az öntőporok funkciója:

- A szál és a kristályosító között kenőanyagként hat
- Javítja a hőátadást a szál és a kristályosító között
- Hőszigetelést ad a folyékony tócsa legfelső felületén
- Megvédi a folyékony acélt a reoxidációtól
- Abszorbeálja a fém felszínére felszálló zárványokat

A 7.7 ábra az öntőpor általános elhelyezkedését mutatja a folyamatos öntőgép kristályosítójában. Az öntőport a kristályosítóban levő folyékony acél felületére adagolják. Az öntőpor megolvad és a kristályosító/szál hézagba infiltrál a meniszkusznál. Ez az infiltrálás a kulcsfolyamat a folyamatos öntéskor, mivel az mind a jó kenés, mind a szál és a kristályosító közti egyenletes hőátvitel biztosítására szükséges.



7.7 ábra Function of mold powder [16]

7.4.7.1 Fontos paraméterek

Az **öntőpor fogyasztás** nemcsak az öntőpor megválasztott típusától, hanem az oszcillálás beállításától és a szál felületétől – azaz a kg m^{-2} -től is függ. Mivel a megolvadt öntőport a kristályosító oszcilláló mozgása pumpálja a kristályosító/szál- hézag közé, az oszcillálás beállításának lényeges hatása van a kristályosító öntőpor-fogyasztásra.

A kristályosító öntőpor fogyasztására az irodalomban a vonatkozó összefüggéseknek széles variációit találjuk..

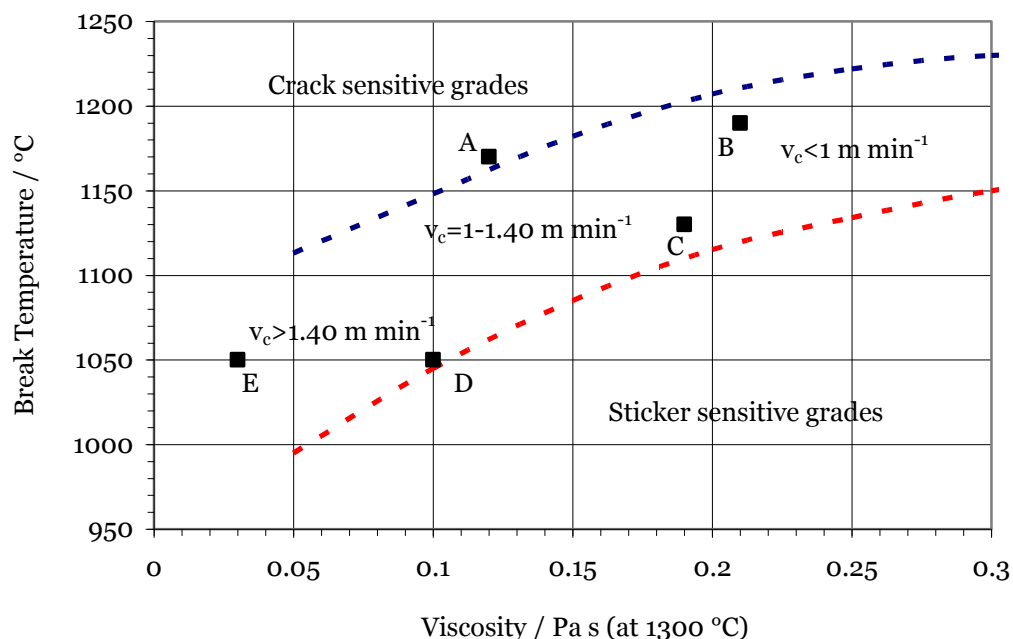
$$Q = \frac{1.7 \times t_N}{\sqrt{\eta \times v_c}} \quad \text{kg/m}^2 \quad (7.3)$$

ahol:

- Q = a felületegységre jutó kristályosító öntőpor felhasználás, kg/m^2
- t_N = negatív húzási idő, s
- η = kristályosító öntőpor- viszkozitás, Pa.s
- v_c = öntési sebesség, m/perc

Túl kicsi kristályosító öntőpor-fogyasztás a szál és a kristályosító között tapadást okoz, ami esetleg kitöréssel jár. Ennek megelőzésére a fajlagos öntőpor fogyasztásnak $0,30 \text{ kg/m}^2$ fölött kell lennie, kivéve a gépészeti acélt, amelyre $0,15 \text{ kg/m}^2$ elégséges.

A kristályosító öntőporának egyik legfontosabb tulajdonsága a **megszakadási hőmérséklet**. Ez azon küszöbhőmérséklettel definiálható, amelyen az öntőpor viszkozitása drámaian nő, azaz ezen a ponton megkezdődik a folyékony kenés összeomlása.



7.8 ábra Break temperature and viscosity of the mold powder in relation to casting speed [17]

A 7.8 ábra azt mutatja, hogy hogyan változik a megszakadási hőmérséklet a különböző öntési sebességekkel. Egy repedésre érzékeny fajtát A vagy B öntőpor felhasználásával kell leönteni annak érdekében, hogy a lehető legjobb feltételeket biztosítsa, míg a tapadásra érzékeny fajtákat C vagy D öntőpor-típussal kell leönteni.

A 7.8 táblázat öt különböző felhasználható öntőpor-típusra tartalmazza a tulajdonság-adatokat és költségeket.

7.8 táblázat. A rendelkezésre álló kristályosító öntőporok anyagtulajdonságai.

Öntőpor	Viszkozitás	Megszakadási hőmérséklet	Költség	Cél
	Pa.s	°C	\$/kg	
A	0,12	1170	0,40	Repedésre érzékeny fajtákra használják
B	0,21	1190	0,35	
C	0,19	1130	0,45	Tapadásra érzékeny fajtákra használják
D	0,10	1050	0,50	
E	0,03	1050	0,55	Gyors öntéshez használják

7.4.8 Üstrendelés

A szimuláció célja a három üstös szekvens öntés. Az első üst a helyén van a közbenső üst felett, amikor a szimuláció megkezdődik, de a másik kettő későbbi időpontban érkezik. Mind a három üst érkezési hőmérsékletét és a további kettő üst becsült érkezési idejét is megválaszthatod. Jegyezd meg, hogy az irányított szimulációs módban (lásd a 7.1.2 szakasz) a tényleges üst-szállítási időket befolyásolja szereplésed a szekunder (üstmetallurgiai) acélgyártás szimulációjában. Minél közelebb vagy a megcélzott szállítási időhöz a szekunder acélgyártásban, annál megbízhatóbb lesz a második és a harmadik üst szállítás-időzítése a folyamatos

öntéshez. Ez táj lehetőséget ad az idő-hőmérséklet optimalizálására abból a célból, hogy a kristályosítóban megfelelő öntési feltételeket biztosítsál.

A becsült érkezési idő bevitel (input), a szimuláció megkezdése óta eltelt percek számaként és a **becsült érkezési hőmérséklet** bevitel °C-ként.

Gondolj arra, hogy az acél hőmérséklete csökken az időben a hőveszteségek miatt. Feltételezés szerint az üst hőmérséklet-vesztesége 0,5°C/perc.

7.4.8.1 Időpont

Az az idő, amit igénybe vesz az üst kiürülése, határozza meg azt, hogy mennyi időt adjál az üstök között, azaz a 2. üst érkezési idejét úgy kell beállítanod, hogy az 1. üst kiürüljön éppen a 2.üst érkezése előtt vagy éppen azután. A kiürülés ideje függ a kristályosító/szál kereszt-szelvényétől, az egy közbenső üstre eső szálak számától és az öntési sebességtől. A szálan-ként és percenként leöntött anyag **térfogatát** (V) az alábbi összefüggés adja:

$$\dot{V} = w \cdot t \cdot v_c \quad , \text{ m}^3/\text{perc} \quad (7.4)$$

ahol:

w = a szál szélessége, m

t = a szál vastagsága, m

v_c = az öntési sebesség, m/perc

Ezért az adott közbenső üstre az egy percre eső anyag **tömege** (M_T) az alábbi:

$$M_T = n \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot w \cdot t \cdot v_c \quad , \text{ kg/perc} \quad (7.5)$$

ahol:

n = a szálak száma

$\rho_{\text{foly,liq}}$ = a folyékony acél sűrűsége, 7400 kg/m³

Egyenletes állapotú öntési körülmények között (azaz v_c állandó) az üst egy bizonyos szintre ürítésének ideje az alábbi:

$$\tau = \frac{m_{\text{ladle}}}{\dot{M}_T} = \frac{m_{\text{ladle}}}{n \cdot \rho_{\text{liq}} \cdot w \cdot t \cdot v_c} \quad , \text{ perc} \quad (7.6)$$

ahol:

$m_{\text{üst}}$ = az üstből leöntendő folyékony acél tömege, kg.

Jegyezd meg, hogy az öntés automatikusan leáll, amikor salakot detektálnak a tolózárnál, tipikusan akkor, amikor az acélszint eléri az 5%-ot.

Példa

Vezetékcső acélt öntesz 1,5 m x 0,2 m keresztmetszvényű iker brammaöntő gépen. Az öntés sebessége 1,8 m/perc és az öntőművet 200 tonnás üstök látják el. Számítsd ki az üst kiöntéséhez szükséges időt állandó körülmények között, feltételezve azt, hogy az öntés 5%-nál leáll.

$$\tau = \frac{200\,000 \times 0.95}{2 \times 7400 \times 1.5 \times 0.2 \times 1.8} = 23.8 \quad \text{perc}$$

7.4.8.2 Hőmérséklet

Annak érdekében, hogy az acélnak optimális legyen a hőmérséklete a kristályosítóban, fontos a korrekt hőmérsékletű üst rendelése. Egyetemi hallgatói szint számára az üstben levő acél 0,5 °C/perc sebességgel hűl, míg az üzemi technikus szint számára 0,5 és 1,0 °C/perc között változik.

Gondosan számítva ki az összes időt a szimuláció kezdetétől addig az időpontig, amíg az üst kiürül, ki lehet számítani a hőmérséklet csökkenést. Következésképpen ki lehet számítani a szükséges acél hőmérsékletet a megérkezéskor

7.4.8.3 A likvidusz hőmérséklet kiszámítása

Parancs a folyékony acél hőmérsékletének likvidusz hőmérséklet alá csökkenésének megelőzése (azaz azon hőmérséklet alá, amelyen az acél kezd megmerevedni) A T_{likv} likvidusz hőmérséklet az összetételtől függ és a következő egyenlettel lehet kiszámítani [18]:

$$T_{\text{likv}} = 1537 - 78\%C - 7,6\% Si - 4,9\% Mn - 34,4\% P - 38\% S$$

A gyakorlatban szükséges az acél hőmérsékletét valamivel a likvidusz hőmérséklet felett tartani az acélon belüli hőmérséklet-különbségek miatt (az élek és a sarkok hőmérséklete alacsonyabb). A likvidusz hőmérséklet és a tényleges hőmérséklet közti különbséget túlhevítésnek hívjuk. Bizonyosodj meg arról, hogy a túlhevítés mindig 10°C fölött maradjon a dermedés megelőzésére.

Növekvő túlhevítés csökkenti a szál kéregvastagságát a fölös hőenergia miatt, amit el kell vonni a kristályosítóval. Amennyiben a kéreg a szál bármelyik részén túl vékony saját súlyának megtartására, kitörés következik be. Brammaöntő gépekre a túlhevítés 50°C, blokkbuga és bugaöntő gépekre pedig 60°C.

7.4.9 A választások áttekintése

A szimuláció indulása előtti utolsó kép lehetővé teszi számodra a megtett választások áttekintését. A „next” lenyomásával indul a szimuláció és nem fordulhatsz vissza és nem változtathatod meg azokat a szimuláció újraindítása nélkül.

7.5 A szimuláció futtatás

A folyamatos öntés-műveletre vonatkozó különböző beállítások megválasztása után itt az idő az indulásra. Cél a folyékony fém folyásának szabályozása az üstből a közbenső üstbe és a kristályosítóba, úgy, hogy a megválasztott öntési sebességet tartani lehessen és jó minőségű öntött termék legyen elérhető. Neked kell üstöket cserélni, görgőket ellenőrizni fölös helytelen beállítás elkerülésére és feldarabolni a szálát féligkész termékekre.

7.5.1 Az öntés indítása

Az első lépés az üst leöntésének indítása. Nyisd ki a tolózarat az acél üstből a közbenső üstbe folyásának indítására. Ezt úgy teheted meg, hogy rákattintasz a fel vagy le nyilakra, avagy közvetlenül belépsz a „ladle flowrate (üst kiáramlási sebesség)” feliratú áramlásszabályozó egyik számára.

Amint egy elégséges acélpuffer-szintet elértél a közbenső üstben, emeld meg a dugórudat a közbenső üstből a kristályosítóba az áramlás sebességének növelésére. Ezt úgy teheted meg, hogy rákattintasz vagy a „tundish flowrate (közbenső üst kiáramlási sebesség)” feliratú áramlásszabályozó egyik számán lépsz be.

Várj addig, amíg a kristályosító szint elég magas (előnyösen 70% feletti), aztán indítsd meg az öntést egy releváns öntési sebesség megválasztásával.

Egyensúlyban kell tartanod az áramlást az üst, a közbenső üst és a kristályosító között úgy, hogy minden időpontban elegendően magasak legyenek a szintek. Tipikusan azt kell céloznod, hogy mind a közbenső üstben (lásd a 6.5.3 fejezetet), mind a kristályosítóban (a kitörés elkerülésére lásd a 6.5.5 fejezetet) 80-90%-os szintet tartsál. Az világos azonban, hogy ne kívánd túltölteni a tartályok egyikét sem

7.5.2 Üstcsere

Az egymást követő üstöket automatikusan süllyeszti le a forgató szerkezetbe. **Az** üzemi technikai szinten maximálisan 10 perces késlekedések is előfordulhatnak a szállításban, így légy felkészülve ennek ellensúlyozására.

Bizonyosodj meg arról, hogy megállítottad a kifolyást az üstből, mielőtt megpróbálnád beforgatni az új üstöt a közbenső üst feletti pozíciójába.

A közbenső üstben levő szint vitathatatlanul csökken, amikor az üstöket cserélik, ezért bizonyosodj meg arról, hogy előzetesen elég magas-e a szint a közbenső üstben. Nagyobb kiáramlási sebességgel kell indulnod az új üsttel annak érdekében, hogy feltöltsd az előírt szintre a közbenső üstöt az üstcsere befejeztével.

7.5.3 Acéltisztaság

Bizonyos felhasználások, például az olaj és gáz szétosztására szolgáló vezetékcsövek, igen „tisztá” acélokat igényelnek, azaz igen kis oxid-és szulfid-zárványszinteket, mivel ezek repe-

désindító helyek lehetnek. Az oxid és szulfid képződés és a szekundér acélgártás során az azt követő eltávolítás kémiai rendkívül összetett és folyó kutatás tárgya. Átfogóbb információra vonatkozóan az ezekkel a témákkal kapcsolatos cikkek és könyvek révén szíveskedjél tájékoztatást nyerni.

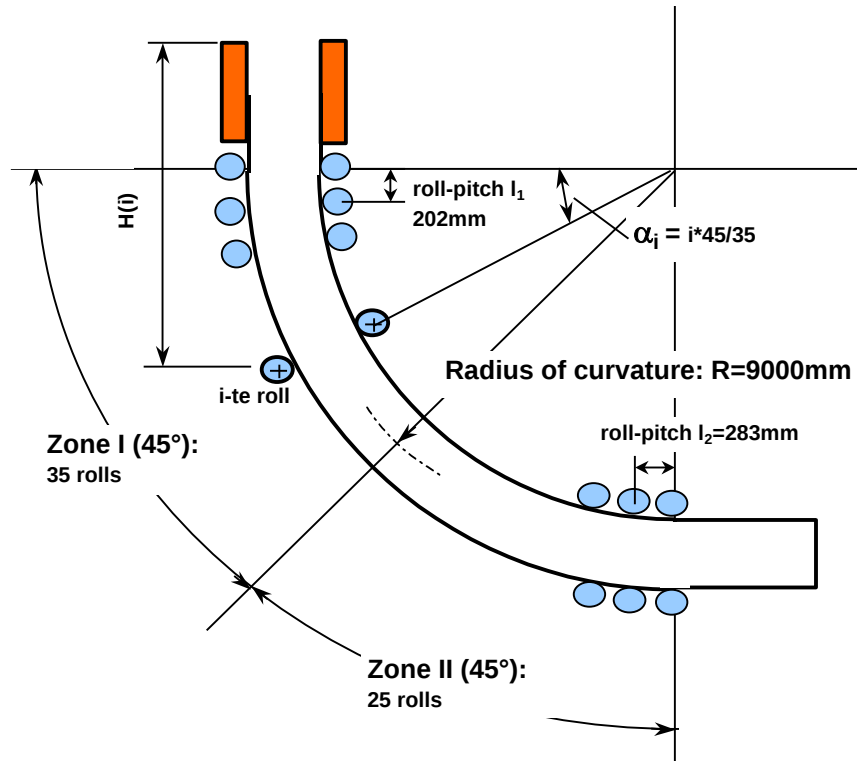
Ebben a szimulációban célod legyen 'mérsékelt', 'kis' és 'igenkis' zárványszint elérése, a megválasztott acélfajtától függően. A zárványok végleges szintjét sok tényező befolyásolja. Feltételezzük, hogy a zárványszint az öntő állomásra érkezéskor megfelelő ahhoz a szinthez viszonyítva, amely szükséges elegendően tiszta acél eléréséhez. Például, ha járműipari acélt öntesz, a zárványszintnek nem kell igen alacsonynak lennie, erre a célra elegendő egy kis zárványszint, így az acél tisztasága a megrendelt üstben kezdettől fogva kicsi. Ez azonban nem jelenti azt, hogy az öntés automatikusan sikerül.

Az acél zárványszintjét a jelen szintjén lehet tartani vagy kevésbé csökkenteni a közbenső üst pufferként való alkalmazásával. Ez lehetővé teszi a zárványok eltávolítását a közbenső üst falaihoz és a folyékony acél felületén levő salakrétegbe. Így a hosszú tartózkodási idő a közbenső üstben igen fontos a lehető legtisztább acél öntéséhez. Az üstben levő acél nagyobb zárványszintje szükségessé teheti a kisebb öntési sebességeket annak érdekében, hogy több időt adjanak a zárványok felszállásához a közbenső üstben. Jegyezd meg, hogy az irányított szimulációs módban (lásd a 6.4.1.2 fejezetet) a zárványszintek a Szekundér – üstmetallurgiai – Acélgártás eredményeiből vannak kiterhelve

7.5.4 Alakváltozás-elemzés modell brammaöntő gépre

Az ULC-acélra és a cső-acélra egyforma öntőgépet feltételeztünk. A 7.9 ábra egy bramma (lapos buga) öntőgép sematikus rajza. A szálvezető a kristályosítótól kiindulva íves egészen az egyengető szakasz végéig. Az ív két zónára oszlik, 35, illetve 25 görgővel.

A következő fejezetben a belső repedés és a felületi repedés elméleti hátterét adjuk azokkal a munka-egyenletekkel, amelyekkel a szimuláció ezeket a jelenségeket számítja ki.



7.9 ábra Schematic drawing of the slab caster

7.5.4.1 Belső repedés becslése

A belső repedésképződés lehetőségének becslésére a megmerevedési fronton kialakuló deformációt hasonlítjuk össze a kritikus alakváltozással. Ezért az egyes görgőn való áthaladás okozta alakváltozás a kristályosodási fronton az alábbiak szerint számítható ki [21]

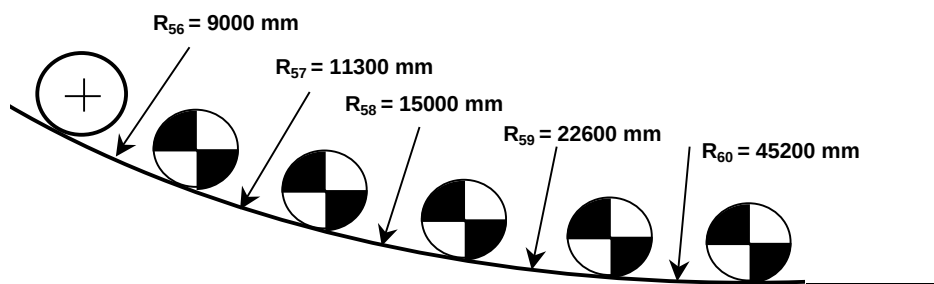
A kihasasodás, hajlítás, egyengetés és a támasztó görgők helytelen beállítása okozta húzó alakváltozásokat a következő tapasztalati képletek segítségével számítjuk ki. A hajlítással és egyengetéssel okozott alakváltozás az alábbiak szerint adódik:

$$\varepsilon_{BS} = 100 \cdot \left(\frac{d}{2} - S \right) \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad (7.7)$$

ahol:

- d = a bramma vastagsága, mm
- S = a kéregvastagság, mm
- R_{n-1} és R_n = az n-1 és n számú görgők sugarai, mm

Mind a hajlítást, mind az egyengetést figyelembe veszi a többpontos (öt pont) módszer. A 7.10 ábra mutatja az ötpontos egyengető módszert a felvett sugarakkal. A hajlító módszer azonos, mint az egyengető azonos sugarakkal.



7.10 ábra Five point straightening method

Az ε_B (%) kihasasodási alakváltozás kiszámítására a tipikus tapasztalati formulát alkalmazhatjuk:

$$\varepsilon_B = \frac{0.101972 \cdot P \cdot l^3}{3800 \cdot S^3} \cdot 100 \quad (7.8)$$

ahol:

- S = a megmerevedett kéreg vastagsága, mm
- P = a folyékony acél statikus nyomása, N/mm²
- l = a görgő-távolság, mm

Az ε_M (%) hibás görgőállítás miatt bekövetkező alakváltozást a következő egyenlettel lehet kiszámítani:

$$\varepsilon_M = 1.15 \cdot \frac{3 \cdot S \cdot \delta_M}{l^2} \cdot 100 \quad (7.9)$$

ahol:

δ_M = a hibás görgőbeállítás mértéke, mm

Végezetül az $\varepsilon_{\text{intern}}$ összes alakváltozás a kristályosodási fronton a bramma folyamatos öntése alatt a hajlítással, egyengetéssel, kihasasodással és helytelen görgőbeállítással okozott alakváltozás összege az alábbiak szerint:

$$\varepsilon_{\text{intern}} = \varepsilon_{BS} + \varepsilon_B + \varepsilon_M$$

Amikor az összes alakváltozás meghaladja a kritikus alakváltozást, belső repedés képződik. A kritikus alakváltozás az acél összetételétől és az alakváltozás sebességétől függ [21]. A szerkezeti és járműipari acélfajták körülbelül 1% kritikus alakváltozásnak állhatnak ellen, míg a cső- acéloknak és az igen kis karbonacéloknak durván 2% a kritikus alakváltozásuk.

Az öntési sebesség növelésekor a belső repedésképződés a behatároló tényező. Az LPS és ULC acélokkal szembeni igények olyanok, hogy hibás belső minőség a bramma kiselejtezését eredményezi.

7.5.4.2 Felületi repedés becslése

Az igenkis karbonacél és cső-acél brammaöntésénél a felületi minőség becslésekor azt feltételezik, hogy csak keresztirányú repedés keletkezhet [22]. A folyamatos öntés során keletkező $\varepsilon_{\text{surf}}$ felületi alakváltozás a megfontolás alapján a hajlítás/egyengetés okozta ε_{BS} , a helytelen görgőbeállításból adódó ε_{M} , a megmerevedő kéreg kihasasodása okozta ε_{B} és a termikus kontrakció okozta ε_{th} alakváltozások összege:

$$\varepsilon_{\text{surf}} = \varepsilon_{\text{BS}} + \varepsilon_{\text{M}} + \varepsilon_{\text{B}} + \varepsilon_{\text{th}} \quad (7.10)$$

A hajlítás/egyengetés okozta felületi alakváltozást az alábbi összefüggéssel lehet megközelíteni:

$$\varepsilon_{\text{BS}} = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad (7.11)$$

ahol:

$$\begin{aligned} d &= \text{a bramma vastagsága, mm} \\ R &= \text{szalagsugár, m} \\ n &= \text{görgőszám} \end{aligned}$$

Amint már leírtuk (7.11 ábra), az ötpontos módszernél hajlítás és egyengetés megy végbe. Helytelen görgőbeállításból származó alakváltozást az alábbiak szerint lehet kiértékelni valamely görgő eredeti helyzetéhez képesti eltérés okozta sugár változásból:

$$\varepsilon_{\text{M}} = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_d} \right| \quad (7.12)$$

ahol:

$$\begin{aligned} R_0 &= \text{az eredeti pozíció sugara, mm} \\ R_d &= \text{a görgő eltérített pozíciója, mm} \end{aligned}$$

Feltételezzük, hogy a kristályosodó kéreg kihasasodásából származó felületi alakváltozása egyenlő a kristályosodás frontján kihasasodásból származó alakváltozással, ezért a (6.8) és a (6.9) egyenletekkel kiszámítható. A termikus alakváltozás (ε_{th}) az α hőtágulási együttható és a ΔT hőmérséklet-különbség szorzatából számítható:

$$\varepsilon_{\text{th}} = \alpha \cdot \Delta T \cdot 100 \quad (6.13)$$

A kihasasodásból keletkező felületi alakváltozás kiszámításánál azt tételezzük fel, hogy ugyanazt az egyenletet (7.8 egyenlet) lehet használni, mint a kristályosodási frontnál fellépő alakváltozás kiszámításához.

Egy térfogatelem vándorol a szál felületén az egész folyamatos öntési művelet során és ezért az $\varepsilon_{\text{surf}}^{\text{tot}}$ összes akkumulált felületi alakváltozást kell kiszámítanunk, ahol n a görgők száma.

$$\varepsilon_{\text{surf}}^{\text{tot}} = \sum_i^n \varepsilon_{\text{surf}}(i) \quad (7.14)$$

Amikor az összes felületi alakváltozás meghaladja a kritikus alakváltozást, felületi repedés alakul ki. A kritikus alakváltozás függ az acél összetételétől, az oszcillációs jel mélységétől és a felület hőmérsékletétől az egyengető zónában [22]. Az Nb-ötvöztetésű acélok (cső- és szerkezeti acél) igen hajlamosak a felületi repedés kialakulására. A felület hőmérsékletének nem

szabad 1050°C alá süllyednie a cső-acélra és 1100°C alá a szerkezeti acélnál. Ezen túlmenően az oszcillációs jel a lehető legsekélyebb legyen. 0,2 mm-nél kisebb mélység nagyobb kritikus alakváltozást eredményez. A felületi repedéses brammákat és blokkbugákat le kell hántolni. A hántolás költsége körülbelül 3%-a a gyártási költségeknek. A felületi repedéses ULC-acélokat le kell hántolni és alacsonyabb minőségi osztályba kell besorolni a nagy felületi követelmények miatt.

7.5.5 A kitörés megelőzése

Kitörés következik be akkor, amikor a szál kérgének szilárdságát meghaladja a ferrosztatikus nyomás. Akkor kerüljük el, ha biztosítjuk azt, hogy a kéreg vastagsága a szál bármelyik pontján elégséges legyen az ezen pont feletti folyékony acél súlyának viselésére.

Mivel a kitörés valószínűsége nő a kéreg vastagságának csökkenésével, igen fontos a kristályosítóban magas acélszint és a lehető legkisebb túlhevítés fenntartása. Ez lehetővé teszi, hogy a kéreg megfelelő vastagságúvá kristályosodjon, mielőtt elhagyja a kristályosítót. Amennyiben az adott vékony kéreg feltörne a folyékony acél súlya alatt, az oszcillációs jeleket olyan sekélynek kell tartani, amennyire csak lehetséges.

Pontos összetételüktől függően a cső-acél lehet peritektikus vagy hipoperitektikus. A peritektikus összetétel igen repedésérzékeny és ezért igen gondos öntést igényel a repedés képződésének és a kérgen keresztül kitörést okozó tovaterjedésének megelőzésére.

A karbon ekvivalens következő összefüggését lehet felhasználni annak meghatározására, hogy az acél peritektikus-e, avagy nem. A peritektikus acélnak 0,1súly%C-nél nagyobb a karbon ekvivalense [23]:

$$C_{eq} = \%C - 0.1\%Si + 0.04\%Mn - 0.04\%Cr + 0.1\%Ni - 0.1\%Mo \quad (7.15)$$

A kiválasztott acél fajtának megfelelő kristályosító öntőpor alkalmazása igen fontos. Más acéltípusra optimalizált öntőpor megválasztása növeli a kitörés valószínűségét. A kristályosító öntőpor szintjét is állandóan elegendően magasan kell tartani annak érdekében, hogy a szál és a kristályosító közti teljes kenést biztosítsuk.

Összegezve: előzd meg a kitörést az alábbiakkal:

- 80-90%-os kristályosító szinttel
- Kismérvű túlhevítéssel
- Sekély oszcillációs jelekkel
- Korrekt kristályosító öntőporral.

7.6 Alkalmazó interface

Ez a fejezet a szimuláció futtatásának alapvető „mechanikáját” írja le, azaz hogyan mozgasd az üstöt, végezz el ötvöző beadagolásokat, hogyan ellenőrizd a berendezés különböző részeit, stb.

7.6.1 Szimuláció szabályozás

7.6.1.1 Szimuláció sebesség

A szimulációt x1 és x32 közti különböző sebességgel lehet futtatni. A sebességet bármikor lehet változtatni a szimuláció alatt. A legnagyobb ajánlott sebesség a x16. Ezt úgy lehet elérni, hogy rákattintasz az úgynevezett numerikus lépegetőn levő nyilakra a szimuláció sebességének 1-gyel való növelésére. Másik út kétszeri rákattintás a pillanatnyi szimuláció sebesség mezején belülré a pillanatnyi sebesség kiválasztására, annak törlése, belépés az új szimuláció sebességbe

7.6.1.2 Üstforgató

Az üstforgatót a „Rotate (forgasd)” feliratú gomb lenyomásával működtetheted. A forgatót nem lehet működtetni akkor, ha az üst hiányzik a berendezésből vagy a forgató éppen működik. Akkor sem lehet forgatni, ha az üst tolózára nyitott. Amennyiben nehézségeid lennének az üst forgatásával kapcsolatban, győződj meg arról, hogy teljesítetted-e ezt a három kritériumot

7.6.1.3 Üst

Az üstből a közbenső üstbe áramlás sebességét a „Ladle flowrate (Üst kifolyási sebesség)” jelzésű numerikus lépegető alkalmazásával szabályozhatod. A lépegető a szimuláció sebesség szabályozóhoz hasonlóan működik. Az üstből való kifolyás sebességét 100 kg min^{-1} pontossággal lehet szabályozni.

7.6.1.4 Közbenső üst

A folyékony acél kifolyása a közbenső üstből a „Tundish flowrate (Közbenső üst kifolyási sebessége),” jelzésű numerikus lépegető alkalmazásával szabályozható. A lépegető a szimuláció sebesség szabályozóhoz hasonlóan működik. A közbenső üstből a kristályosítóba áramlás sebességét 25 kg/perc pontossággal szabályozzák.

7.6.1.5 Szál

Az öntési sebesség a „Casting speed (öntési sebesség)” jelzésű adagoló dobozon felsorolt lehetőségek egyikének megválasztásával szabályozható. A ’*’ –al előrgzített választékokat alkalmazzák az öntés megindításához. Jegyezd meg, kérlek, azt hogy ez csupán egy érvényes öntési sebesség utólagos megválasztása, azaz a ’*’ –al nem jelölt öntési sebességgel öntött szál megfelelhet bármelyik minőségi követelménynek.

A beállításhibás görgők szint változtatnak annak jelzésére, hogy melyik az a görgőpár, amelyik beállítása hibássá vált. Annak megtekintésére, hogy milyen mértékű a beállítási hiba és hogy mibe kerülne ennek kijavítása, egyszerűen kattints az elszíneződött görgőre. A javítás költsége automatikusan hozzáadódik az összes üzemi költséghez.

JEGYEZD MEG: A valóságban a hibás beállítású görgőket az öntések között és nem azok alatt javítják ki.

7.6.1.6 SEN cseréje (Csak üzemi technikusoknak)

A SEN-t a „Cserélj SEN-t” gomb lenyomásával lehet cserélni. A SEN-t csak akkor lehet cserélni, amikor megállt a kifolyás a közbeni üstből. 15 másodpercet igényel a SEN cseréje és szálanként 200\$ is hozzáadódik az összes költséghez.

7.6.1.7 ElektroMágneses Keverés (Csak blokkbuga-és bugaöntő gépekre)

Az elektromágneses keverést (EMS) blokkbuga és buga öntőgéphez lehet alkalmazni. Az EMS felhasználásával csökken a szegregáció a szálaban, így javítva a belső minőséget. Amennyiben nehézségeid vannak a szegregációval kapcsolatos minőségi követelmények betartásával, próbálkozz EMS-el önteni. Az „EMS” gombra kattintva kapcsolod be vagy ki az EMS-t a pillanatnyi állapotnak megfelelően. A gomb szegélye kigyullad, amikor az EMS bekapcsolódik

7.6.1.8 Enyhe redukció (Csak brammaöntő gépekre)

Az öntés alatt alkalmazott enyhe redukció mértékét a sötét pirossal jelölt enyhe redukció zónájához közeli „Enyhe redukció” adagoló doboz felhasználásával lehet megváltoztatni. Választani lehet a kikapcsolás, a kicsi, közepes és erős közül.

7.6.2 Öntés-információ

Részletes információt lehet megtekinteni az öntéssel kapcsolatban a szimuláció alatt és után. A következő képek a releváns kulcs lenyomásával állnak rendelkezésre.

7.6.2.1 Eseménynapló megjelenítése (E kulcs)

Az eseménynapló néhány szimulációs beállítást is magába foglaló kronologikus feljegyzést ad a nagyobb eseményekről. Ez hasznos annak nyomon követésére, hogy mit csináltál és mi történt addig a szimuláció alatt. Ahhoz is hasznos, hogy segít neked eredményeid elemzésében a szimuláció végén, valamint nyomra vezetést is tartalmaz avval kapcsolatban, hogy miért hagytál figyelmen kívül vagy sértettél meg különböző kritériumokat.

7.6.2.2 Öntősugár megjelenítése (F kulcs)

Az „F” kulcs lenyomásával diagramot látsz a folyékony acélnak az üstből a közbenső üstbe és a közbenső üstből a kristályosítóba áramlásáról.

7.6.2.3 Belső görgők bemutatása/takarása (H kulcs)

A „H” lenyomásával tallózhatsz a látható és takart belső szálgörgők között. Ez nagyon hasznos avval kapcsolatban, hogy láthassad az egész szálát ULC és LPS acél bramma öntőgépen öntésekor

7.6.2.4 Acélszint megjelenítése (L kulcs)

„L” lenyomásával azt látod, hogy miképpen változik a folyékony acél szintje az üstben és a közbenső üstben.

7.6.2.5 Minőség megjelenítése (Q kulcs)

„Q” lenyomásával a szál grafikus megjelenítését látod, amint azt leöntötték. Jó és rossz területek vannak megjelölve, valamint a szállal kapcsolatos kulcs számok is megjelennek. Ez a választás csak a szimuláció befejezése után áll rendelkezésre

7.6.2.6 Hőmérséklet megjelenítése (T kulcs)

„T” lenyomásával a hőmérséklet változását látod az idő múlásával az üstben és a közbenső üstben. Ez a választás csak a szimuláció befejezése után áll rendelkezésre

7.6.2.7 Öntésinformáció dialógus doboz zárása (X kulcs)

„X” lenyomásával záródik az öntés információ dialógus doboz

7.6.3 Szimulációs eredmények

Amint elfogyott az acél és a szál öntése befejeződött, a szimuláció véget ér és kivetítésre kerülnek az öntési művelet eredményei. Négy kulcsszám látható azonnal és azután neked is lehetőség van az öntés sikerének vagy hibájának további vizsgálatára öt részletes megjelenítés egyikének mélyebb részletezésével. A kulcsszámok a következők:

Az öntött szál összes hossza, méterben kifejezve.

A minőségi kritériumoknak megfelelő hossz, méterekben és %-ban kifejezve.

Összes üzemi költség, \$-ban kifejezve, amely magába foglalja az óránkénti üzemi költséget és a hibás görgőbeállítás helyreigazítási, a hőmérséklet mérésével kapcsolatos, stb. többlet költségeket.

Egy metrikus tonnára eső költség, ami az összes üzemköltség, osztva a minőségi kritériumoknak megfelelő öntött acél tömegével.

Egy részletes kép foglalja magába a hőmérsékletet, az üstben és a közbenső üstben való áramlási és szint-változásokat, valamint az esemény naplót és a minőség naplót. Ezeknek a képek-

nek az acélja, hogy segítsenek az öntési művelet elemzésében annak érdekében, hogy megtaláld, hol léphetnek fel problémák és elképzeléseket adjanak avval kapcsolatban, hogyan javíthatók az öntés körülményei.

A **minőség napló** a minőségbeli változásokat mutatja az öntött szálban. Az először leöntött anyag ezért az $x = 0$ -nál van a diagramban és az utoljára öntött anyag a jobboldali szélén van. A szál öt hibakategóriája:

- Belső repedés kialakulása
- Felületi repedés kialakulása
- Magszegregáció
- Zárványtartalom
- Oszcillációs jel

Az ábra a szál minőségét mutatja az öt kritérium figyelembe vételével. Az árnyékolt területek azokra utalnak, ahol nem teljesültek a minőségi követelmények. Ezeknek a hibáknak kihatása eltérő a különböző acélok esetében. Bizonyos hibákat el lehet távolítani hántolással, más hibák az acél leminősítését okozzák és a legrosszabb esetben az egész hosszat kiselejtezik. A hibamentes hosszak mindig megfelelnek a kitűzött céloknak. Lásd a 7.9 táblázatot, amelyben azok az ellenintézkedések vannak felsorolva, amelyeket foganatosítani kell attól függően, hogy milyen hibák vannak a leöntött acélban.

7.9 táblázat Minőségi hibák és ellenintézkedéseik

Acéltípus	Hántolás	Leminősítés	Hulladék
Szerkezeti acél	Felületi repedés	Vagy két hiba	Több, mint két hiba
ULC acél	Felületi repedés vagy oszcillációsjelek	Némi hiba	Több, mint két hiba
Cső-acél	Felületi repedés vagy oszcillációsjelek	Belső repedés vagy magszegregáció vagy zárványtartalom	Több, mint két hiba
Járműipari acél	-	Vagy két hiba	Több, mint két hiba

Egy levágott szálhossz leminősítése 20%-kal csökkenti a profitot, míg a leselejtezés 80%-kal kurtítja meg a profitot. Egy teljes szálhossz lehántolási költsége az acélfajta költségének körülbelül 2,5%-a. A költséghatékonyság javítására ezért igen fontos megkísérelni a szál hibamentes leöntését.

A **belső repedést** és **felületi repedést** a szálban az öntés során képződött alakváltozásoknak és feszültségeknek tulajdonítják. A repedésképződés megelőzésének lehetséges intézkedései a kristályosító öntőpornak és a kristályosító oszcillálásának optimalizálása annak érdekében, hogy $<0,2$ mm jelmélységet eredményezzen és annak biztosítása, hogy jó gép-karbantartással kiküszöböljék a hibás görgőbeállítást.

A **magszegregációt** az öntési sebesség és a szekundér hűtési sebesség olyan kombinációjának megválasztásával lehet csökkenteni, hogy a kristályosodás befejeződésének pontja jóval az enyhe redukció zónájába essen. Amennyiben így tettünk, a következő optimalizáló lépés az enyhe redukciós szint további növelése egy nagyobb vastagságcsökkentés elérése érdekében.

A **zárványtartalmat** úgy lehet csökkenteni, ha megbizonyosodunk arról, hogy a közbenső üstben a folyékony acél tartózkodási ideje olyan hosszú, amennyire csak lehetséges. Ezt úgy

érik el, hogy az acél magas szintjét tartják fenn a közbenső üstben és a kristályosítóban/és/vagy kisebb öntési sebességekkel öntenek.

Az **oszcillációs jeleket** azok az oszcilláció beállítások határozzák meg, amelyeket megválasztottak a szimuláció indulása előtt. A hiba itt azt jelzi, hogy ezeket a beállításokat tovább kell optimalizálni, hogy azok kisebb oszcillációs jeleket eredményezzenek.

Irodalomjegyzék

- [1] Vivat Academia. Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület és az Országos Erdészeti Egyesület Emlékkönyve. Budapest, 1985. p.351.
- [2] Molnár László: Georgikus Agricola DE RE METALLICA 1556-ban Bazelben megjelenő művének magyar fordításában (OMBKE, Budapest, 1985) Bevezető a magyar kiadáshoz
- [3] Kerpely Antal. A vaskohászat gyakorlati s elméleti kézikönyve 1873-74. Selmec.
- [4] Simon S- Károly Gy: Acélkohásztan I. Egyetemi jegyzet (J. 14-1454) 1983. p.215.
- [5] Simon S- Károly Gy: Acélkohásztan II. Egyetemi jegyzet (J. 14-1503) 1984. p.164.
- [6] Károly Gy: Bevezetés az acélmétallurgiába. Kézirat. 2000. Miskolci Egyetem. p.109.
- [7] www.steeluniversity.org
- [8] Károly Gy- Józsa R: Konverteres acélgyártás, Digitális jegyzet, 2013. Miskolci Egyetem
- [9] AISE, The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume, AISE, 1998,
- [10] Turkdogan, ET, Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials, 1996,
- [11] Károly Gy- Kiss L-Harcsik B: Elektrocélgyártás, Digitális jegyzet, 2013. Miskolci Egyetem
- [12] Károly Gy-Kiss L-Károly Z: Acélok üstmetallurgiai kezelése, Digitális jegyzet, 2013. Miskolci Egyetem
- [13] Károly Gy-Réger M-Harcsik B: Acélöntés, speciális acélgyártás, Digitális jegyzet, 2013. Miskolci Egyetem
- [14] E.Schürmann et al: Einfluss der Kokillenoszcillation auf die Oberflächenqualität von Stranggussbrammen, Stahl und Eisen, 1986, vol.106, pp. 1196-1201
- [15] H Tomono : Elements of oscillation mark formation and their effect on transverse fine Cracks in continuous casting of steel, Doczor Thesis, EPF Lausanne, 1979
- [16] AISE, The Making, Shaping and Treating of Steel, Casting Volume CD, AISE, 2003
- [17] Normanton et al: VAI's 8th Continuous Casting Conference, 2000, Linz, Austria
- [18] T Kawawa: Report of 6th Meeting on Dolidification of Steel, No. 6-III-9, Japan 1973
- [19] Y Morita et al: Strain analysis on internal cracks in continuously cast steel slab, The Summitomo Search, 1985, vol, 30, pp.19-30
- [20] Z K Han , B Liu : Prediction and Analyzis of Internal Cracks in Continuous Cast Slabs by Mathematical Models, ISIJ International, 2001, vol.41, pp.1473-1480
- [21] Y M Won et al: A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steelsm Met.Mat.Trans B, 31 B (2000), 779-794
- [22] M Suzuki et al: Simulation of transverse crack formation on continuously cast peritectic medium carbon steels slabs, Steel Research, 1999, no.70, pp. 412-419
- [23] M Wolf: Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels in Continuous Casting vol. 9, Iron- and Steel Society, Warrendale, USA, 1997
- [24] G Arth et al: Mould powder consumption in continuous casting of steel, Bachelor Thesis, Department of Metallurgy, University of Leoben, 2004
- [25] H Steinrück et al: Modeling for fluid flow in continuous casting, Berg- und Hüttenmanische Monatshefte, Austria, Leoben, 1996, vol. 141, no.9, pp.399-403