

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
Hutnícka fakulta

Návody na cvičenia z
predmetu
OCELIARSTVO

Laboratórne a výpočtové cvičenia

Branislav Bulko Jozef Kijac Peter Demeter

2014



Katedra metalurgie železa a zlievarenstva

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

Hutnícka fakulta

Ing. Branislav Buľko, PhD., prof. Ing. Jozef Kijac, CSc., Ing. Peter Demeter, PhD.

NÁVODY NA CVIČENIA Z PREDMETU OCELIARSTVO

LABORATÓRNE A VÝPOČTOVÉ CVIČENIA

Obsah

Zoznam obrázkov	6
Zoznam tabuliek	7
Úvod	8
1. Práca s normami	9
Cieľ:.....	9
Teoretická časť	9
Konkrétne príklady	11
Zadanie	15
2. Meranie teploty tavenia trosiek	16
Cieľ:.....	16
Teoretická časť	16
Experimentálna časť	18
3. Odsírenie ocele	20
Teoretická časť	20
Síra v oceli a troske	20
Termodynamika odsírenia ocele troskou	20
Niektoré dôležité parametre pre komplexné a efektívne vyhodnocovanie vlastností trosiek vzhľadom k odsíreniu:	21
Experimentálna časť:	21
4. Modelovanie procesu kryštalizácie	23
Cieľ:.....	23
Teoretická časť	23
Experimentálna časť	24
Zadanie	25
5. Štúdium vplyvu niektorých faktorov na tvorbu sústrednej stiahnutiny	26
Cieľ:.....	26
Teoretická časť:	26
Vznik stiahnutiny v ingote	27
Použitie stearínu na modelovanie vzniku stiahnutiny	27
Experimentálna časť:	27
Úlohy:	28
6. Simulácia plynulého odlievania ocele	29
Použitá metodika	30

Meranie pomocou tzv. C-kriviek	32
Výpočet zátkového objemu a mŕtvych zón	32
Úloha 1:	33
Meranie pomocou F-kriviek	33
Úloha 2:	34
7. Štúdium kinetiky rozpúšťania oceľového šrotu.....	35
Štúdium vplyvu niektorých technologických faktorov na rýchlosť tavenia oceľového šrotu.	35
17. Baumannove skúšky	38
18. Studené modelovanie kyslíkovo-konvertorovej tavby.....	40
Cieľ:.....	40
Teoretická časť:	40
Experimentálna časť.....	41
Úlohy:	44
Výpočtové cvičenia.....	46
8. Sievertsov zákon – rozpustnosť plynov v roztokoch	47
Príklad:.....	47
9. Výpočet aktivity síry vo viacložkovej sústave	48
Príklady:	48
10. Výpočet teplotného intervalu tuhnutia nízkolegovaných a uhlíkových ocelí	49
Príklad:.....	50
11. Výpočet spotreby dezoxidovadiel a legúr pri výrobe ocele	51
Príklady:.....	51
12. Výpočet požadovanej hĺbky dezoxidácie pre potreby legovania ocele.....	52
13. Výpočet rýchlosti vyplavovania nekovových vtrúsenín.....	55
14. Výpočet aktivity kyslíka pri vákuovej dezoxidácii ocele	56
15. Výpočet vsádzky pre kyslíkový konvertor o hmotnosti 100 t.....	57
Teoretická časť:	57
Statický proces riadenia	57
Materiálovo-tepelná bilancia	58
Výpočet materiálovej bilancie na 100 t kovonosnej vsádzky.....	59
Zadanie:	59
Postup výpočtu:.....	60
16. Výpočet tepelnej bilancie pre kyslíkový konvertor o hmotnosti 100 t	67
Teoretická časť:	67

Výpočet tepelnej bilancie na 100 t kovonosnej vsádzky	67
Postup výpočtu:	68
19. Simulácia mimopecného spracovania ocele	75
Teoretická časť	75
Cieľ	76
Experimenálna časť	76
Možnosti simulácie	76
Usporiadanie závodu a jeho popis:	78
Ovládanie simulácie	79
Plánovanie programu	82
Zloženie	82
Teplota	83
Výpočet prísad pre dosiahnutie požadovaného zloženia	84
Výpočet prísad – prvkov	84
Výpočet prísad - zliatin	84
Zachytenie ostatných prvkov	85
Čas miešania	85
Dezoxidácia	85
Výpočet prísady hliníka	86
Oduhličenie	87
Odsírenie	88
Odstránenie vodíka	89
Elektrický ohrev	90
Použitá literatúra	91

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Diagram Fe - C	10
Obr. 2 Zmäčanie dvoch tuhých látok kvapalinou	17
Obr. 3 Rovnovážny diagram sústavy FeO-SiO ₂	17
Obr. 4 Rovnovážny diagram sústavy FeO-CaO	17
Obr. 5 Teploty tavenia v sústave FeO-CaO-SiO ₂	18
Obr. 6 Schematický priebeh teplotného pásma v marshovej peci.....	18
Obr. 7 Príklad vzorky so znázorneným intervalom teploty tavenia trosky	19
Obr. 8 Tavenie pomocou vysokofrekvenčnej indukčnej pece.....	22
Obr. 9 Model kokily	24
Obr. 10 Makroskopické vady ingotu	26
Obr. 11 Príklad možnosti vystrojenia symetrickej medzipanvy	29
Obr. 12 Laboratórium simulácie procesov prúdenia (LSPP).....	30
Obr. 13 Príklad C-krivky pre medzipanvu vystrojenú Turbostopom pre rýchlosť liatia 0,8m.min ⁻¹	32
Obr. 14 Vizualizácia merania C-kriviek pre rôzne vystrojenú medzipanvu	33
Obr. 15 Príklad F-krivky	34
Obr. 16 Zmena polomeru vzorky ocele pri jej tavení v kovovom kúpeli:.....	36
Obr. 17 Schéma hraničných vrstiev pri tavení ocelového odpadu.....	36
Obr. 18 Schéma rozdelenia teplôt a koncentrácií uhlíka v diagrame Fe-C pri tavení ocelového odpadu:	37
Obr. 19 Úbytok hmotnosti na vzorkách	37
Obr. 22 Rozloženie síry v liatine (Baumannova skúška)	39
Obr. 23 Tyčová oceľ s chemickým zložením C = 0,40 %, P = 0,46 %, Mn = 1,03 %, S = 0,022 %, Si = 0,36 % (Baumannova skúška).....	39
Obr. 24 tyčová oceľ s chemickým zložením Cu = 0,15 %, P = 0,28 %, Mn = 0,37 %, S = 0,22 %, (Baumannova skúška).....	39
Obr. 25 Schéma zostavy zapojenia pre studené modelovanie kyslíkového konvertora:.....	41
Obr. 26 Základné rozmery skutočného (a) a skleneného modelu konvertora (b)	42
Obr. 20 Príklad rovnovážnych kriviek pre rôzne produkty.....	52
Obr. 21 Príklad rovnovážnych stechiometrických priamok pre dezoxidovadlo R a legúru L	53
Obr. 27 Usporiadanie závodu MPO	78
Obr. 28 RH Degasser.....	78
Obr. 29 CAS-OB.....	78
Obr. 30 Tank Degasser.....	78
Obr. 31 Ladle Arc Furnace	78
Obr. 32 Ovládací panel	80
Obr. 33 Dostupné prísady s chemickým zložením a cena za tonu prísady.....	80
Obr. 34 Výsledný protokol.....	81
Obr. 35 Al - O rovnovážne krivky pri troch rôznych teplotách	86
Obr. 36 Výpočet prísady Al pri začiatkovej aktivite O	86

Zoznam tabuliek

Tab. 1 Charakteristika ocelí triedy 10 - 19.....	11
Tab. 2 Význam druhého a tretieho dvojčísła pre ocele na odliatky	13
Tab. 3 Namerané výsledky	25
Tab. 4 Niektoré vlastností stearínu a ocele [1].....	27
Tab. 5 Porovnanie fyzikálnych vlastností vody pri 20°C a ocele pri 1600°C.....	29
Tab. 6 Tabuľka pre zápis výsledkov sledovania úbytku hmotnosti	37
Tab. 20 Namerané hodnoty funkcie $p_{\text{rozstrek}} = f(x/d)$	44
Tab. 21 Závislosť prehĺbenia kvapaliny od tlaku	44
Tab. 7 Regresné koeficienty pre výpočet poklesu teplôt likvidu solidu	50
Tab. 8 Prepal legúr.....	51
Tab. 9 Vstupné údaje pre stanovenie teoretickej spotreby dezoxidovadla	54
Tab. 10 Základné údaje – kovonosná vsádzka.....	59
Tab. 11 Zloženie troskotvorných prísad a ostatných materiálov	59
Tab. 12 Množstvo kyslíka a prepal prvkov	61
Tab. 13 Zložky prinesené výmurovkou, vápnom, vápencom	64
Tab. 14 Množstvo a zloženie trosky	64
Tab. 15 Množstvo a zloženie konvertorového plynu	65
Tab. 16 Materiálová bilancia	66
Tab. 17 Základné údaje – kovonosná vsádzka.....	67
Tab. 18 Zloženie troskotvorných prísad a ostatných materiálov	67
Tab. 19 Tepelná bilancia.....	74
Tab. 22 Požadované chemické zloženie ocelí dostupných v simulácii	77
Tab. 23 Súhrn rôznych procesov spracovania mimopecného spracovania ocele.....	79
Tab. 24 Príklad zloženia ocele pri odpichu a požadovaného zloženia ocele (hmot. %).	82
Tab. 25 Zloženie a cena dostupných prísad	83
Tab. 26 Vzťah medzi rovnovážnou koncentráciou rozpusteného H a parciálnym tlakom H pri 1600 °C	89

Úvod

Návody na cvičenia sú určené pre určené pre poslucháčov druhého a tretieho ročníka bakalárskeho štúdia.

Jednotlivé cvičenia využívajú zariadenia v oceliarskom laboratóriu a laboratóriu simulácie procesov prúdenia nachádzajúce sa na Katedre metalurgie železa a zlievarenstva.

1. Práca s normami

Cieľ:

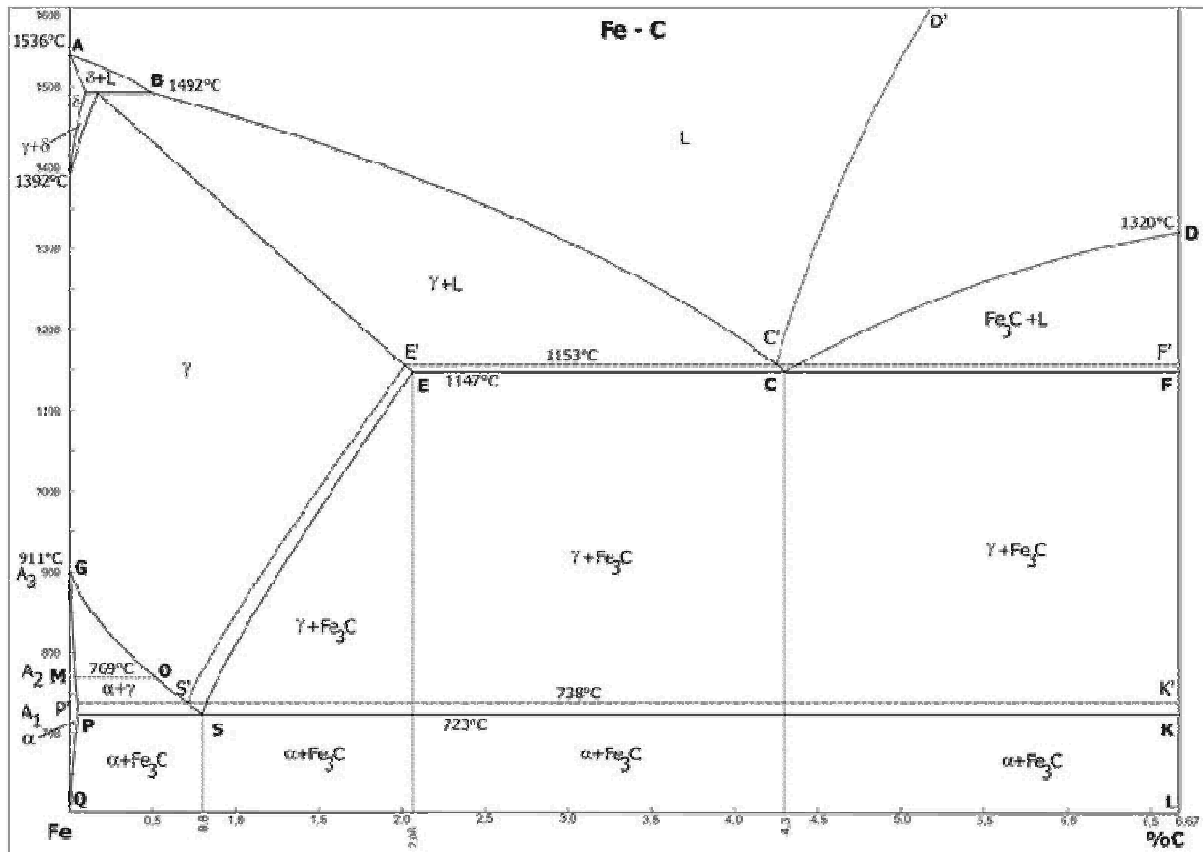
1. Oboznámiť sa s rozdelením ocelí
2. Naučiť sa pracovať s normami a ich použitím v praxi

Teoretická časť

Za ocele považujeme zliatiny železa s uhlíkom a ďalšími prvkami, ktoré sa do ocele dostali buď zo vsádzky, či v dôsledku reakcií prebiehajúcich pri metalurgickej výrobe ocele, alebo sú zámerne pridávané pre zlepšenie určitých vlastností.

Prítomnosťou prísadových prvkov je mimo iného komplikovaná i definícia ocelí z obecného hľadiska. Preto je veľmi často ako východisko zvolený rovnovážny diagram zliatin železa s uhlíkom (Obr. 1), podľa ktorého je hranicou, rozdeľujúcou tieto zliatiny na ocele a liatiny, maximálna rozpustnosť uhlíka v austenite odpovedajúca eutektickej teplote.

Podľa tohto kritéria za ocele možno považovať také zliatiny železa s uhlíkom a niektorými ďalšími prvkami, ktorých štruktúra môže byť aspoň pri jednej teplote tvorená jednou fázou. Pre väčšinu ocelí táto definícia postačuje, i keď sú známe výnimky.



Obr. 1 Diagram Fe - C

Stuhnutím ocele vo formách rôzneho tvaru sa získavajú oceľové odliatky. Z pestrej škály veľkosti a tvarov oceľových odliatkov zaujímajú určitú časť ingoty – oceľ pre tvárnenie. Tvárnenie ocele sa okrem iného odráža i v štruktúre ocele, avšak i tak principiálne možno povedať, že ocele na odliatky ako svojim chemickým zložením, tak i štruktúrou zásadne nelíšia od ocelí tvárnených.

Ocele môžeme rozdeliť podľa rôznych charakteristických znakov, napr. chemického zloženia, spôsobu výroby, množstva legúr, charakteristických vlastností dôležitých pre ich spôsob použitia atď.

Podľa spôsobu výroby rozoznávame ocele vyrábané v kyslíkovom konvertore a ocele vyrábané v elektrických oblúkových peciach.

Podľa spôsobu upokojenia tekutej ocele poznáme: Oceľ neupokojená, upokojená, poloupokojená.

Podľa akosti možno ocele rozdeliť na obvyklé akosti a ušľachtilé.

Podľa chemického zloženia na ocele uhlíkové a zliatinové.

Podľa stupňa legovania ich môžeme rozdeliť na:

- nelegované
- nízko legované
- stredne legované
- vysoko legované

Delenie ocelí do tried, podľa normy STN je v Tab. 1.

Tab. 1 Charakteristika ocelí triedy 10 - 19

Trieda ocelí	Druh ocele podľa chemického zloženia		
10 -	Konštrukčné ocele obvyklých akostí (chemické zloženie sa spravidla neudáva a nezaručuje)		Obsah P a S sa nezaručuje v hotovom výrobku
11-			Obsah P a S sa zaručuje v hotovom výrobku, alebo v tavebnej vzorke
12-	Ušľachtilé konštrukčné (chemické zloženie sa zaručuje v hotovom výrobku)	Uhlíkové Zliatinové na cementovanie, zušľachtovanie, priame kalenie, nitridovanie	Na cementovanie, zušľachtovanie, pružinové ocele
13-			Ocele: Mn, Si, Mn-Si
14-			Ocele: Cr, Mn-Cr, Si-Cr, Cr-Al, Cr-Mn-Si
15-			Ocele: Mo, Cr-Mo, Cr-V, Mn-Cr-Mo, Mn-Cr-V, Cr-Mo-V, Cr-Mo-Al
16-		Pružinové	Ocele: Ni, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, Ni-Cr-W
17-		Zliatinové so stredným a vysokým obsahom prísadových prvkov	Ocele: korozivzdorné, žiaruvzdorné, žiarupevné atď.
18-	Spekané prášky oceľové a liatinové (uhlíkové i zliatinové). Spekané karbidy		
19-	Nástrojové ocele: uhlíkové, zliatinové, zliatinové rýchlorezné a zliatinové na liate nástroje.		

Konkrétne príklady

- označovania jednotlivých druhov ocelí uhlíkových a zliatinových sú v STN 42 0002, STN 42 0074 a STN 42 0075.

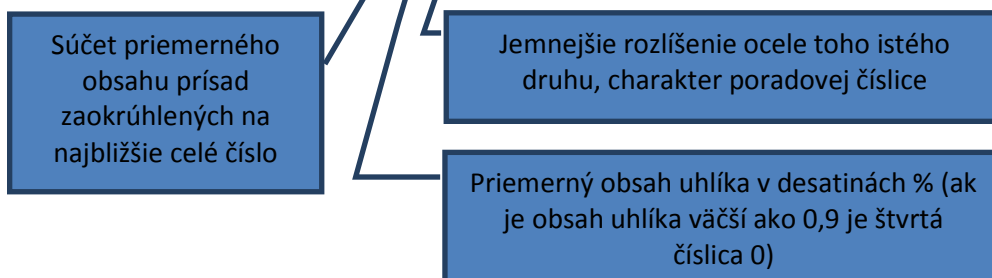
Ocele triedy 10 – 11:

10 až 11 X X X

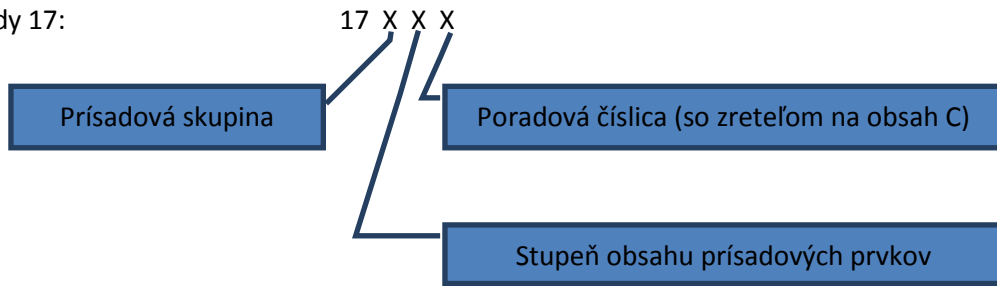


Ocele triedy 12 – 16:

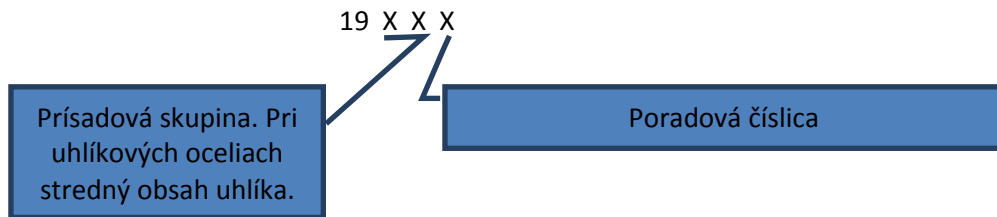
12 až 16 X X X



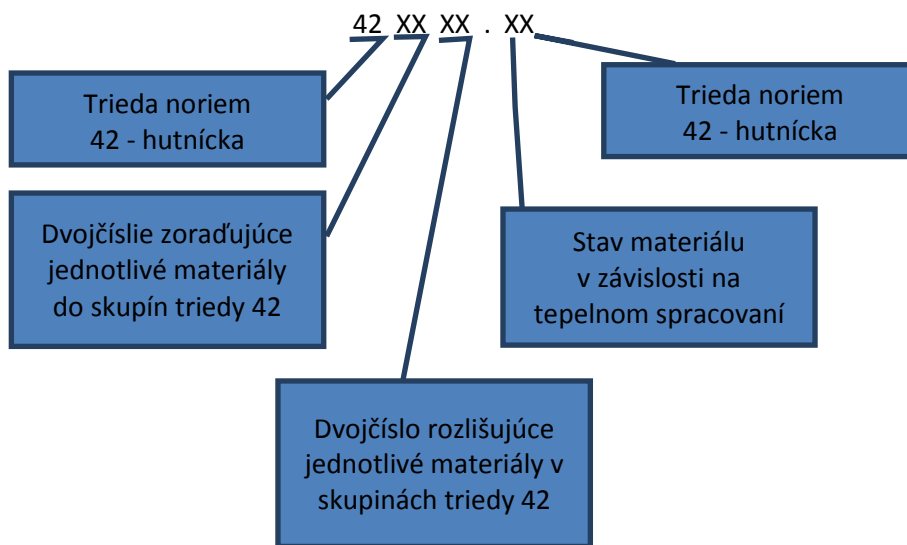
Ocele triedy 17:



Ocele triedy 19:



Číselné označovanie oceli na odliatky sa odvádza zo schémy:



Význam druhého a tretieho dvojčísla pre ocele na odliatky je v Tab. 2.

Tab. 2 Význam druhého a tretieho dvojčísła pre ocele na odliatky

Druhé dvojčíslo 42 XX++	Druh ocele na odliatky podľa druhého dvojčísła	Tretie dvojčíslo 42 ++XX	Význam tretieho dvojčísła
26	Uhlíkové ocele na odliatky	00 - 99	Približná hodnota pevnosti materiálu v ťahu
27	Nízkoalegované a stredne legované ocle na odliatky	00 - 19	Ocele nízkoalegované Mn
		20 - 39	Nízkoalegované ocele Cr, Mn-Cr, Mn-V, Mn- Cr-V
		40 - 49	Nízkoalegované ocele Mo, Cr-Mo, Cr-Mo-V, Cr-Mo-W-V
		50 - 59	Nízkoalegované ocele Ni, Cr-Ni, Ni-V, Cr-Ni- Mo, Cr-Ni-W-V
		60 - 79	Doposiaľ neurčené
		80 - 89	Určujúce číslo stredne legovaných ocelí Cr- Mo, Cr-Mo-W-V-Co
		90 - 99	Doposiaľ neurčené
28	Nízkoalegované a stredne legované ocle na odliatky iným spôsobom než do pieskových foriem	00 - 19	Určujúce číslo nízkoalegovaných ocelí Mn, Mn-Si, Mn-Ti
		20 - 39	Určujúce číslo nízkoalegovaných ocelí legovaných Cr, Mn-Cr, Mn-V, Mn-Cr-V
		40 - 49	Určujúce číslo nízkoalegovaných ocelí Mo, Cr-Mo, Cr-Mo-W- V, Cr-Mo-V
		50 - 59	Určujúce číslo nízkoalegovaných ocelí legovaných Ni, Cr-Ni, Ni-V, Cr-Ni-Mo, Cr-Ni- W-V
		60 - 69	rezerva
		70 - 79	Určujúce číslo strednelegovaných ocelí Cr-Mo, Cr-Mo-W- W-Co
	Zliatiny pre trvalé magnety	80 - 84	Určujúce číslo zliatin pre izotropné trvalé magnety legované Al- Ni
		85 - 89	Určujúce číslo zliatin pre izotropné trvalé

			magnety legované Al-Ni-Co
		90 – 94	Určujúce číslo zliatin pre anizotropné trvalé magnety bez usmernenia kryštalizácie legovaných Al-Ni-Co
		95 - 99	Určujúce číslo zliatin pre anizotropné trvalé magnety s usmernením kryštalizácie, legované Al-Ni-Co
29	Vysokolegované ocele na odliatky	00 – 19	Ocele vysokolegované Cr
		20 – 29	Ocele vysokolegované Mn
		30 – 59	Vysokolegované jednofázové a dvojfázové ocele legované Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, Cr-Mn-Ni
		60 – 84	Doposiaľ neurčené
		90 - 99	Doposiaľ neurčené

Prvá doplnková číslica za bodkou označuje stav zliatiny (tepelné spracovanie)

0 – tepelné nespracovaný (nežíhaný, prírodný)

1 – normalizačne žíhaný normalizačne žíhaný a popustený austenizačne žíhaný

2 – žíhaný

3 – žíhaný na mäkko

4 – kalený, alebo kalený a nízkopopustený

5 – rezerva

6 – zušľachtený na dolnú pevnosť obvyklú u príslušnej zliatiny

7 – zušľachtený na strednú pevnosť obvyklú u príslušnej zliatiny

8 - zušľachtený na hornú pevnosť obvyklú u príslušnej zliatiny

9 – tepelne spracovaný podľa zvláštneho dohovoru

Druhá doplnková číslica určuje spôsob (technológiu) odlievania

0 – do pieskových foriem

1 – staticky do kovových foriem (kokíl)

2 – odstediivo

3 – do škrupín

4 – presným liatim

5 – podľa zvláštneho dohovoru

Zadanie

1. Navrhните technológiu výroby ocele s vlastnosťami podľa zadania s uvažovaním na 100 kg kovovej vsádzky:

- a) vyhľadajte príslušnú normu
- b) navrhните taviaci agregát
- c) navrhните technológiu s presnou špecifikáciou jednotlivých postupov a ich chronologický sled so stručným zdôvodnením
- d) navrhните suroviny a urobte ich približný odhad s výpočtom dezoxidovadiel (za pomoci vzorového príkladu)
- e) navrhните ďalšie spracovanie ocele

- I. Oteruvzdorná oceľ: 280 HB, $R_m=900$ MPa
- II. Pre vyššie teploty /400°C/: 200 HB, $R_m=700$ MPa
- III. Pre vyššie tlaky a namáhania /475°C/: $R_m=550$ MPa, R_{p02} pri 475°C=157 MPa
- IV. Oteruvzdorná oceľ /Mn-Cr-Si/: 250 HB, $R_m=800$ MPa
- V. Pre vyššie tlaky a namáhania /Mn-Cr-V/: 250 HB, $R_m=800$ MPa, $R_{p02}=500$ MPa
- VI. Pre vyššie teploty /do 300°C/: $R_m=650$ MPa, $R_{p02}=240$ MPa
- VII. Pre vyššie tlaky a namáhania /Si/: 253 HB, $R_m=900$ MPa, $R_{p02}=400$ MPa
- VIII. Pre vyššie tlaky a namáhania /Mn-Ti/: 250 HB, $R_m=900$ MPa, $R_{p02}=430$ MPa, KCU 3=34 Jcm⁻²
- IX. Korozivzdorná oceľ /Cr-Ni-Mo-Cu/: 205 HB, $R_m=650$ MPa
- X. Korozivzdorná oceľ /Cr-Ni-Mo-Ti /: 190 HB, $R_m=450$ MPa

2. Navrhните technológiu výroby ocele podľa zadania ad 1/:

- | | | | | | |
|-----------|-----------|----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 1/ 19 418 | 2/ 19 356 | 3/ 19 340 | 4/ 19 313 | 5/ 19 312 | 6/ 19 241 |
| 7/ 19 216 | 8/ 19 420 | 9/ STN 42 2714 | 10/ STN 42 2712 | | |

2. Meranie teploty tavenia trosiek

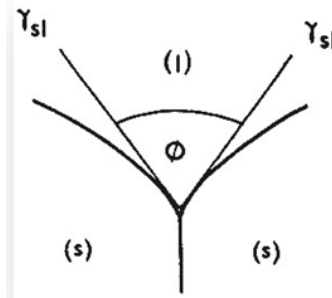
Cieľ:

1. Vyberte si z diagramu na Obr. 5 4 body, odčítajte chemické zloženie a pripravte 4 trosky z troch oxidov s chemickým zložením, ktoré ste odčítali.
2. Určte intervaly teplôt tavenia pripravených trosiek v Marshovej peci.
3. Porovnajme namerané hodnoty s hodnotami na Obr. 5

Teoretická časť

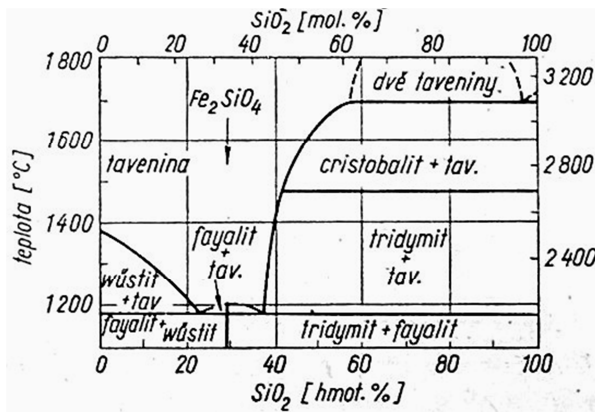
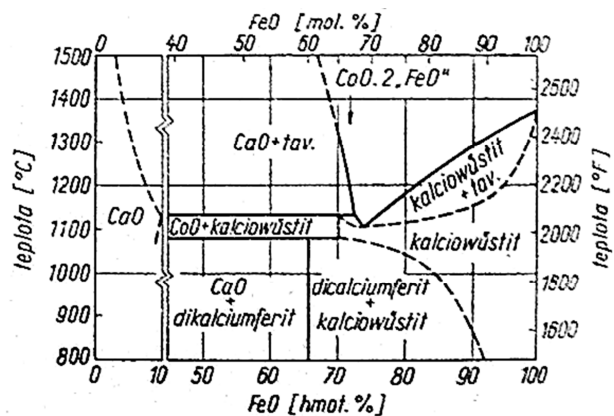
K základným fyzikálnym vlastnostiam trosiek patria:

- Teplota tavenia – charakterizuje teploty, pri ktorých prechádza troska z tuhého stavu, cez cestovitý stav do stavu kvapalného. Zvyšovaním obsahu CaO v troske sa zvyšuje jej bazicita, čo sa prejavuje zvýšením teploty tavenia trosky, naopak zvyšovaním podielu SiO₂ bazicita klesá, čo sa prejavuje znížením teploty tavenia. Hodnoty teplôt tavenia trosky sa pohybujú v rozmedzí 1200°C až 1500°C. Trosku je možné presnejšie definovať pomocou teploty mäknutia, tavenia a tečenia.
- Viskozita trosky – závisí od jej chemického zloženia a teploty. Kyslé trosky sa prejavujú relatívne nízkym poklesom viskozity s teplotou, pričom sa jedná o vyššie hodnoty viskozity. Zásadité trosky majú pri vyššej teplote viskozitu nižšiu, ale pri poklese teploty na hodnotu tzv. teploty zlomu dochádza k prudšiemu nárastu viskozity trosky. Viskozitu je možné regulovať aj prídavkom stekucovadiel na báze fluoridov, silicidov, alebo boridov.
- Merná hmotnosť kvapalnej trosky – je funkciou chemického zloženia. Rastie so zvyšovaním obsahu oxidov mangánu, železa a pod.
- Medzifázové napätie – charakterizuje napríklad podmienky asimilácie nekovovej fázy troskou alebo podmienky zmáčania kovu a výmurovky troskou
- Povrchové napätie - je ďalším významným faktorom vplyvujúcim na koróziu výmurovky. Je možné ho definovať ako silu pôsobiacu na jednotku dĺžky, ktorú treba vynaložiť na zväčšenie povrchu kvapaliny. Je závislé najmä od zloženia a od teploty kvapaliny. Povrchové napätie u kremičitanových tavenín s rastúcou teplotou a zvyšujúcim sa obsahom SiO₂ mierne klesá. Povrchové napätie taveniny ovplyvňuje uhol zmáčania pri styku s tuhú látkou.
- Zmäčavosť - ovplyvňuje koróziu žiaruvzdorného materiálu. V mieste styku kvapaliny (l) s dvomi tuhými povrchmi (s) pôsobia tangenciálne k povrchu sily povrchového napätia γ na medzifázových rozhraniach (Obr. 2). U trosiek sa požaduje zlá zmáčavosť s ocelovou taveninou a výmurovkou, ale dobrá s nekovovými vmestkami v oceli.



Obr. 2 Zmäčanie dvoch tuhých látok kvapalinou

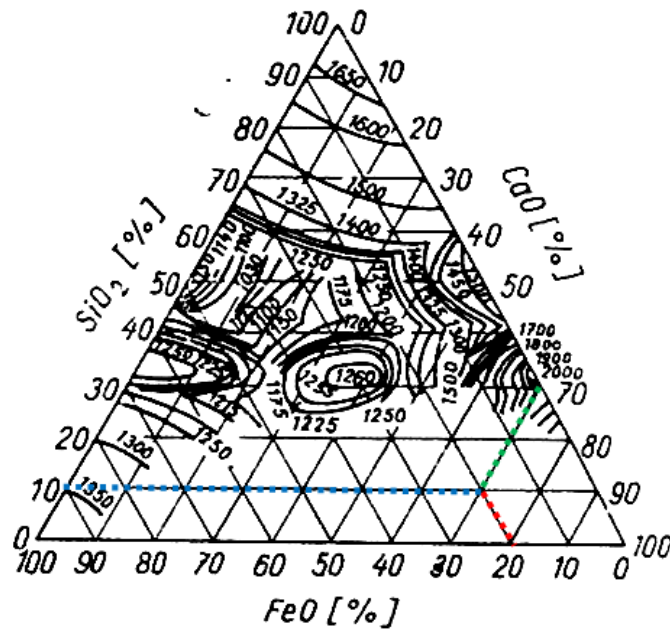
Na Obr. 3 a Obr. 4 sú zobrazené rovnovážne diagramy binárnych sústav. Teploty tavenia a polohy maximálnych teplôt zodpovedajúcich príslušným chemickým zlúčeninám v binárnych kremičitanových taveninách súvisia so silami vzájomného pôsobenia medzi zodpovedajúcimi kremičitanovými aniónmi a kationmi v kryštalickej mriežke príslušnej zlúčeniny. Anióny štvorstenu SiO_4^{4-} majú medzi kremičitanovými aniónmi najmenší rozmer a najväčší náboj čo spôsobuje veľmi pevnú väzbu rady zlúčenín.

Obr. 3 Rovnovážny diagram sústavy FeO-SiO₂

Obr. 4 Rovnovážny diagram sústavy FeO-CaO

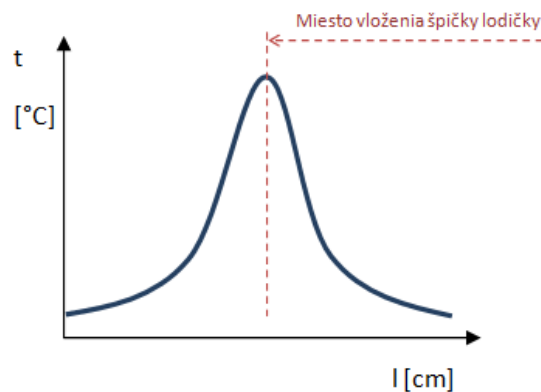
Trojuholníkový diagram (Obr. 5) sa využíva na znázornenie ľubovoľných ternárnych sústav za ľubovoľných podmienok. Pre vyjadrenie týchto sústav sa do diagramu zakresľujú buď izotermny znázorňujúce body tavenia jednotlivých sústav s premenlivým chemickým zložením, alebo sa nad základňu trojuholníkového diagramu nad jednotlivé zloženia zakresľujú zvislé osi pre príslušné teploty tavenia (priestorový diagram).

Efekt pridania CaF_2 do viskóznejskej a kôrovitejšej trosky je dobre známy. Nevýhodou tohto spôsobu znižovania viskozity troskovej taveniny je vplyv na výmurovku zariadenia v oblasti troskovej čiary. Pridanie CaF_2 znižuje aj teplotu tavenia trosiek a tiež oslabuje väzby medzi $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, čo sa prejavuje aj v znížení viskozity. Je to obdobný mechanizmus ako v prípade erózie výmurovky troskou.

Obr. 5 Teploty tavenia v sústave FeO-CaO-SiO₂

Experimentálna časť

V diagrame na Obr. 5 si zvolíte 4 body s rôznymi teplotami. K týmto bodom odčítajte chemické zloženie trosiek. Z čistých oxidov pripravte dané trosky a dôkladne zhomogenizujte. Zmes nasypete do lodičky a pomaly vložte do marshovej pece vyhriatej na teplotu o 50 až 100°C vyššiu než je predpokladaná teplota tavenia vloženej trosky. Schematický priebeh teplotného pásma v Marshovej peci je na Obr. 6.



Obr. 6 Schematický priebeh teplotného pásma v marshovej peci

Lodičku vsunieme do pece tak, aby sa jej špička nachádzala v mieste s maximálnou teplotou. Nad lodičku umiestnime vhodný termočlánok. Po desiatich minútach odmeriame teploty nad lodičkou po 1cm, čím získame presný priebeh teplotného pásma, ktoré potom priradíme ku vybratej lodičke, na ktorej vizuálne vyhodnotíme interval teploty tavenia (Obr. 7).



Obr. 7 Príklad vzorky so znázorneným intervalom teploty tavenia trosky

3. Odsírenie ocele

Teoretická časť

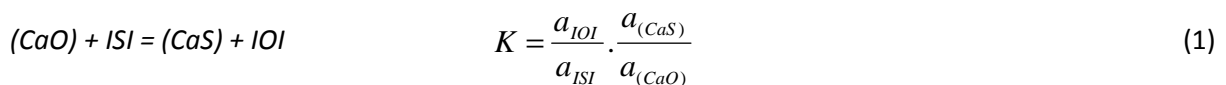
Síra v oceli a troske

Správanie sa síry v tavenine železa je podobné správaniu sa kyslíka. Síra a kyslík, ako prímеси v oceli sú tiež nazývané metaloidy. Sú schopné vytvárať zlúčeniny s Fe už pri relatívne nízkych obsahoch. Interakcie medzi sírou, kyslíkom, a rozpúšťadlom sú veľmi výrazné. V roztavenom železe získavajú atómy síry ľahko dva elektróny, čím prechádzajú do iónového stavu S^{2-} a je možné predpokladať, že existuje silná iónová väzba medzi iónmi Fe^{2+} a S^{2-} .

Aktivita síry je v tavenine do značnej miery ovplyvňovaná prítomnosťou iných prvkov. Kremík a uhlík znižujú rozpustnosť síry v tavenine, ale zvyšujú jej aktivitu, čo potvrdzuje fakt, že odsírenie surového železa je efektívnejšie, než odsírenie ocele .

Termodynamika odsírenia ocele troskou

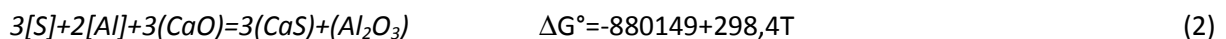
Základnou odsírovacou zložkou panvových trosiek je oxid vápenatý. Na základe toho je možné definovať základný proces odsírenia reakciou (1):



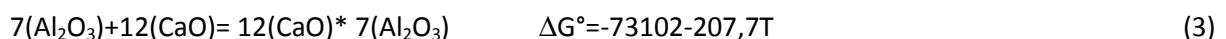
Voľná zlučovacia entalpia CaO je zápornejšia než voľná zlučovacia entalpia CaS, čo znamená, že k odsíreniu podľa rovnice (1) môže dôjsť iba za predpokladu, že uvoľňovaný kyslík bude viazaný na stabilnú zlúčeninu, čím bude z reakčnej sústavy odvádzaný. Rovnovážny obsah síry je funkciou aktivity kyslíka v oceli, teploty a obsahu CaO a CaS v troske.

Efektívne odsírenie je možné iba u ocelí hlboko dezoxidovaných rafinačnou troskou s vysokou aktivitou oxidu vápenatého, prípadne s nízkym pomerom $a_{(CaS)}/a_{(CaO)}$.

Všeobecne sa dá napísať rovnica odsírenia napríklad takto (2):



V danom prípade je jedným z hlavných produktov zlúčenina (Al_2O_3). Dôležitou podmienkou odsírenia je väzba tejto zlúčeniny na stabilný produkt, pretože voľný (Al_2O_3) bráni ďalšiemu odsírovaniu a zahusťuje troskovú fázu. Najvýhodnejšie je v tomto prípade použitie vápna, kde ideálnou väzbou (Al_2O_3) je potom vznik kalciumaluminátu podľa rovnice (3):



Niektoré dôležité parametre pre komplexné a efektívne vyhodnocovanie vlastností trosiek vzhľadom k odsíreniu:

- Súčet ľahko redukovateľných oxidov (ľahko redukovateľné oxidy zvyšujú oxidačný potenciál trosky a tým negatívne vplyvajú na jej desulfuračnú schopnosť):

$$SO = (FeO) + (Fe_2O_3) + (MnO) + (V_2O_5) + (P_2O_5) \quad (4)$$

- Desulfuračný potenciál trosky

$$DP = \frac{\sum(S)}{|S|} * \frac{1}{\sqrt[3]{|Al|^2}} \quad (5)$$

- Kalcium – aluminátový podiel:

$$CA = \frac{(CaO)}{(Al_2O_3)} \quad (6)$$

- Bazicita trosky (7)

$$B_1 = \frac{(CaO)}{(SiO_2)} \quad \text{alebo} \quad B_2 = \frac{(CaO) + (MgO)}{(SiO_2) + (Al_2O_3)} \quad (7)$$

- Sulfidický faktor, označovaný tiež ako Mannesmanov koeficient (8):

$$SF = \frac{(CaO)}{(SiO_2)} : (Al_2O_3) \quad (8)$$

- Stupeň odsírenia (9)

$$R = \frac{|S_{start}| - |S_{end}|}{|S_{start}|} \quad (9)$$

Experimentálna časť:

V indukčnej peci sa roztaví oceľová vsádzka (Obr. 8). Pomocou trubičky z kremičitého skla sa odoberie prvá vzorka. Následne sa pridá odvážené množstvo CaO a po jeho roztavení sa odoberie druhá vzorka. V 5 minútových intervaloch sa odoberú ďalšie tri vzorky. Po úprave povrchu vzoriek brúsny papierom sa urobí ich chemická analýza so zameraním na obsah síry. Namerané hodnoty sa zapisujú do tabuľky a urobí sa grafická závislosť zmeny obsahu síry na čase.

Príklad výpočtu potrebného množstva CaO:

Vsádzka: 250g ocele s obsahom síry napr. 0,069%:

250 g..... 100 %

x g S 0,069 %

x= 0,138 g S v 8 kg surového železa

32g S 56g CaO

0,138 g S..... x g CaO

Teoretické potrebné množstvo CaO je **0,2415g**. Je potrebné uvažovať s tým, že použité vápno neobsahuje 100% CaO a preto budeme pracovať s prebytkom 100%.



Na tavenie sa používajú žiaruvzdorné kelímky s teplotnou odolnosťou minimálne 1600°C napríklad na báze Al_2O_3 , alebo grafové

Obr. 8 Tavenie pomocou vysokofrekvenčnej indukčnej pece

4. Modelovanie procesu kryštalizácie

Cieľ:

1. Štúdium pohybu taveniny v kryštalizujúcom ingote
2. Zmena rýchlosti kryštalizácie v rôznych periódach tuhnutia ingotu
3. Tvorba sústrednej stiahnutiny

Teoretická časť

Proces tuhnutia a tvorby vnútornej štruktúry ocelového ingotu je veľmi zložitý. Počas kryštalizácie ocele dochádza k priebehu chemických, tepelných a hydrodynamických procesov podstatnou mierou ovplyvňujúcich rast a tvar kryštálov, ich rozmery a orientáciu.

Bezprostredné štúdium procesu kryštalizácie v prevádzkových podmienkach je veľmi zložitá a finančne aj technicky veľmi náročná. V tejto súvislosti je vhodné rozdeliť zložitý proces tuhnutia ingotu na jednoduchšie procesy a tieto modelovať.

Ocelové ingoty sú charakterizované tromi kryštalizačnými zónami. Zóna drobných rovnoosých kryštálov sa nachádza v povrchových vrstvách ingotu. V strednej časti ingotu je oblasť hrubých, rôzne orientovaných kryštálov a medzi nimi sa nachádza zóna kryštálov pretiahnutých v smere odvodu tepla. Parametre týchto zón závisia od chemického zloženia ocele, od jej fyzikálnych vlastností, hmotnosti ingotu, teploty kovu a ďalších faktorov.

Rozdielna merná hmotnosť tuhej a tekutej ocele (pri teplote tuhnutia cca 4%) spôsobuje tvorbu sústrednej stiahnutiny. Jej poloha v ingote závisí od tvaru kokily, teploty, rýchlosti a spôsobu odlievania ocele a ďalších faktorov.

Dobu plného stuhnutia ingotu je možné určiť z rovnice (10):

$$D = k\sqrt{\tau} \quad (10)$$

Kde: D – hrúbka stuhnutia vrstvy kovu [cm]

K – rýchlostný koeficient tuhnutia [$\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$]

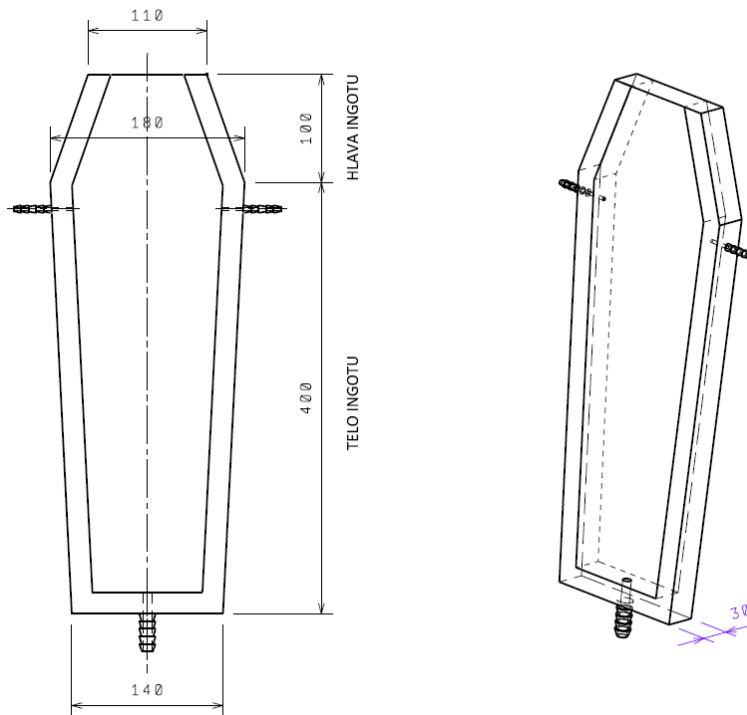
τ – doba kontaktu kovu s kokilou [min]

Hodnota rýchlostného koeficientu tuhnutia ocele sa mení od 2 do 3,5 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$, pričom uhlíkové ocele dosahujú hodnôt vyšších, legované ocele s nižšou teplotnou vodivosťou dosahujú hodnoty 2 – 2,5.

Experimentálna časť

Kryštalický tiosiričitan sodný ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sa roztaví v nádobe a vytemperuje na teplotu 55°C . Potrebné množstvo je približne 4,5kg. Teplota tavenia čistého tiosiričitanu sodného je 56°C vo vlastnej kryštalickej vode. Pri malom znečistení klesá teplota tavenia na $48 - 52^\circ\text{C}$.

Na simuláciu kryštalizácie sa použije model kokily na Obr. 9. Bočné steny a dno modelu sú duté, vodou chladené, zhotovené z medi. Čelná a zadná strana je zhotovená z plexiskla.



Obr. 9 Model kokily

Tavenia tiosiričitanu sodného sa prefiltruje, odmeria sa teplota a naleje sa do pripraveného modelu. Do modelu sa umiestni teplomer. Spustí sa chladiaca voda. V pravidelných intervaloch sa odmeria hrúbka skryštalizovanej fázy na dne, v strede a v prechode. Údaje sa zapíšu do Tab. 3.

Po úplnom stuhnutí sa vyhotoví schematický grafický záznam jednotlivých zón s rozložením sústrednej stiahnutiny v zvolenej mierke.

Zadanie

1. Vyhodnotiť rýchlosť kryštalizácie ingotu zo vzťahu $v = D : \tau$
2. Výsledky výpočtov spracovať graficky ako funkciu $D = f(\tau)$ pre tri úrovne obrázku
3. Určiť hodnotu koeficientu kryštalizácie tiosiričitanu sodného podľa rovnice $k = D/\sqrt{\tau}$ a porovnať ju s koeficientom kryštalizácie ocele.
4. Nakresliť v mierke schému získaného ingotu s vyznačením základných rozmerov podľa Obr. 9
5. Na základe meraní vypočítať hĺbku uloženia sústrednej stiahnutiny k celkovej výške ingotu podľa vzťahu (11)

$$\frac{H_l}{(H_l + H_n)} * 100\% \text{ a } (H_l + H_i) * 100\% \quad (11)$$

kde: H_l je výška stiahnutiny

H_i je výška ingotu

H_n je výška hlavového nástavca

6. Vypočítať objem sústrednej stiahnutiny V_l a nástavca V_n a určiť relatívny objem sústrednej stiahnutiny zo vzťahu (12):

$$\frac{V_l}{(V_l + V_n)} * 100\% \quad (12)$$

Tab. 3 Namerané výsledky

Čas kryštalizácie [min]	Hrúbka skryštalizovanej vrstvy [cm]			Teplota [°C]
	spodok	stred	prechod	
3				
5				
10				
20				
30				

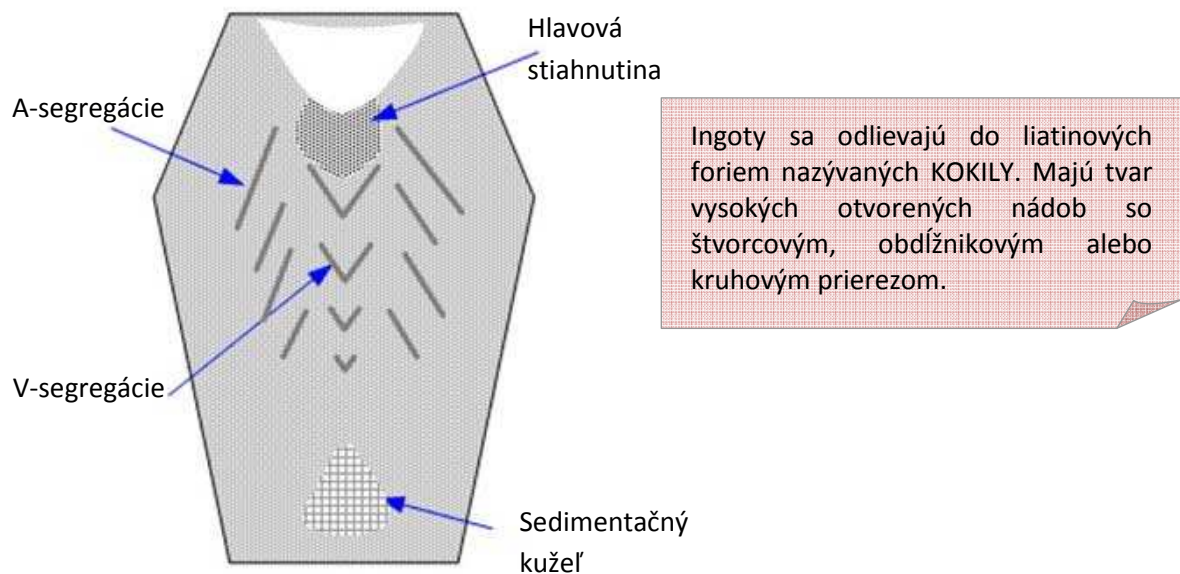
5. Štúdium vplyvu niektorých faktorov na tvorbu sústrednej stiahnutiny

Cieľ:

Štúdium vplyvu rôznych technologických faktorov na veľkosť, tvar a uloženie sústrednej stiahnutiny na modeloch

Teoretická časť:

V hornej časti ingotu z upokojenej ocele sa tvorí sústredná stiahnutina (Obr. 10). Príčinou jej vzniku je zväčšenie mernej hmotnosti ocele pri prechode z tekutého do pevného stavu. Objem sústrednej stiahnutiny predstavuje približne 3% objemu celkového ingotu.



Obr. 10 Makroskopické vady ingotu

Pri tuhnutí kovu pri stenách a dne kokily v dôsledku zmenšenia objemu kovu úroveň hladiny tekutej fázy klesá, čiže ďalšia vrstva kryštalizujúceho kovu bude nižšia a následne i hladina taveniny následne poklesne. Tento jav pretrváva až do stuhnutia celého objemu kovu.

Časť ingotu, ktorá obsahuje stiahnutinu sa potom odreže, čím vzniká vlastný odpad, ktorý je nutné opäť pretaviť v pecnom agregáte. Lokalizácia sústrednej stiahnutiny je funkciou odvodu tepla.

Objem sústrednej stiahnutiny sa nedá zmenšiť, ale dá sa skoncentrovať do vrchnej časti ingotu a zmenšiť hĺbku jej prieniku do vnútornej časti ingotu. Pri premostení tuhúceho kovu na

rôznych úrovniach dochádza k izolácii objemu tekutého kovu a tvorbe riedin. Čím je teplota odlievaného kovu vyššia, tým je stiahnutina väčšia a hlbšie uložená, naopak veľmi nízka teplota spôsobí tvorbu riedin v dôsledku nedostatočného dopĺňovania kovu. V prípade odlievania kovu malou rýchlosťou sa zmenší aj objem stiahnutiny pretože jej časť bude kompenzovaná dopĺňaním tekutého kovu. V závislosti od tvaru kokily sa sústredná stiahnutina a riedina rozkladá v rôznych výškach. V kokilách tvaru V je rozloženie sústrednej stiahnutiny najvhodnejšie. Veľmi dôležitým faktorom je i optimálny pomer výšky a šírky kokily. Pre zabezpečenia tepelného centra vo vrchnej časti ingotu sa používajú rôzne opatrenia, napríklad tepelná izolácia vrchu ingotu pomocou hlavových nástavcov, ohrev a tepelná izolácia vrchnej časti ingotu a pod.

Vznik stiahnutiny v ingote

V ingote vzniká stiahnutina zmršťovaním ocele počas jej ochladzovania a tuhnutia. K tuhnutiu kovu dochádza už počas samotného odlievania. Ztuhnutá kôra sa deformuje vplyvom ferostatického tlaku. Rozdiely v objemoch stiahnutín sa dajú pri rovnakých rozmeroch ingotov vysvetliť práve deformáciou tuhej kôry. Absolútna veľkosť stiahnutiny rastie s výškou ingotu H a s jeho priemerom nepriamo úmerne dobe liatia tela ingotu. Pomerná veľkosť stiahnutiny vyjadrená pomerom objemu stiahnutiny k celkovému ingotu stúpa s priemerom ingotu. Jej hodnota mierne klesá s rastúcou výškou ingotu. V praxi má preto výrazný vplyv na akosť a využitie ocele z ingotu práve hĺbka stiahnutiny.

Použitie stearínu na modelovanie vzniku stiahnutiny

Empiricky bolo zistené, že v prípade odliatkov odlievaných do piesku je možné pri použití stearínu ako modelového média dosiahnuť i kvantitatívne porovnateľné výsledky. Najvhodnejšie je použitie čistého stearínu odlievaného tesne nad teplotou likvidu (do 2°C). V Tab. 4 je porovnanie niektorých vlastností stearínu a ocele.

Tab. 4 Niektoré vlastností stearínu a ocele [1]

Parameter	Oceľ	Stearín
Bod tuhnutia [°C]	1480	53,8
Merná hmotnosť [g.cm ⁻¹]	7,8	0,8 - 0,82
Objemové zmrštenie	5	7
Tepelná vodivosť [J.cm ⁻¹ sec.°C]	4,19 x 0,06	6,7 x 10 ⁻⁴

Pozn.

Veľkou nevýhodou stearínu je jeho veľmi nízka tepelná vodivosť. Konštanta tuhnutia ocele v kokile je $k_0=1,51 \text{ cm.min}^{0,5}$, konštanta tuhnutia stearínu v prípade použitia sklenenej kokily je $k_s=0,1 \text{ cm.min}^{0,5}$

Experimentálna časť:

Ako kokily slúžia na modelovanie sklenené trubice s rôznym pomerom výšky a šírky postavené zvisle na podložku. Odlievaná oceľ je simulovaná stearínom (zmes voľných nasýtených mastných kyselín, najmä kyseliny palmitovej a stearovej, surovina na výrobu mydiel, sviečok a pod.) roztaveným v kadičke. Teplota taveniny sa meria bezprostredne pred odlievaním. Úplné tuhnutie ingotov prebieha 2,5 až 3 hodiny, minimálny čas je približne 1 hodina. Po stuhnutí sa ingoty opatrne vytlačia

z kokíl, označia sa a rozrežú na polovicu v smere zvislej osi. Získané rezy sa v mierke zakreslia a zmerajú. Vyhodnotí sa hmotnosť zdravej časti ingotu.

Vzorka	Teplota [°C]	Pomer výšky k priemeru kokily H/D								
		1			2			3		
		h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]	h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]	h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]
1										
2										
3										
4										
5										

Vzorka	Teplota [°C]	Pomer výšky k priemeru kokily H/D								
		4			5			6		
		h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]	h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]	h ₁ [mm]	h [mm]	m [g]
1										
2										
3										
4										
5										

Úlohy:

- 1) Vyhodnotiť vplyv technologických faktorov na veľkosť, tvar a rozloženie sústrednej stiahnutiny
- 2) Vyhodnotiť vplyv technologických faktorov na výťažok zdravej časti ingotu

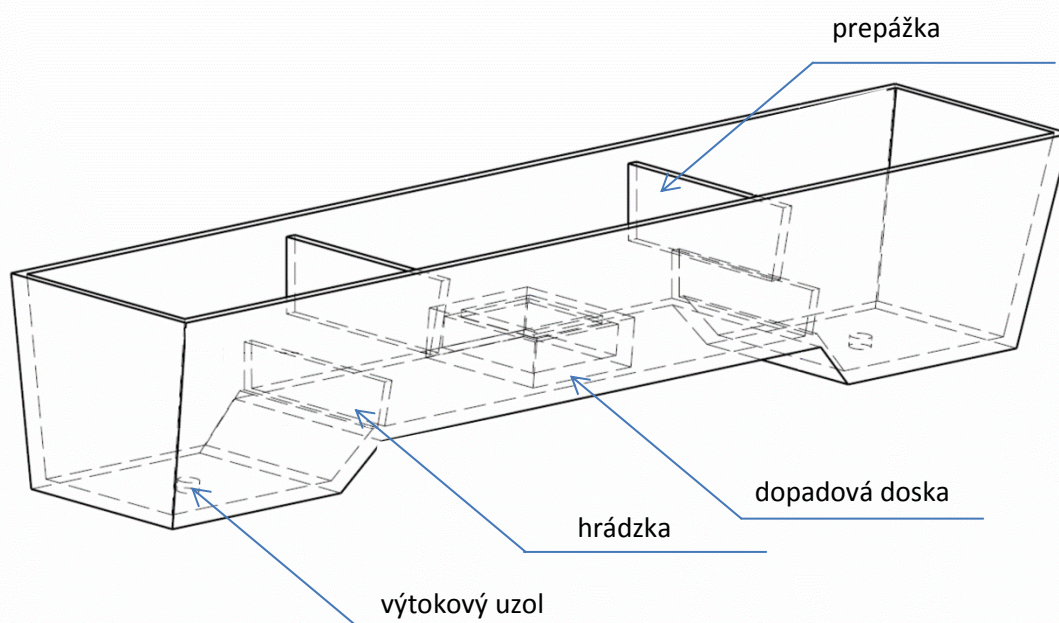
6. Simulácia plynulého odlievania ocele

V dnešnej dobe sa na zariadeniach plynulého odlievania ocele odlieva približne 92,8% celosvetovo vyrábanej ocele. Preto je kladený veľký dôraz na špičkovú efektivitu tohto procesu. Jednou z kľúčových častí ZPO je medzipanva a z toho dôvodu je jej venovaná veľká pozornosť. Okrem rafinačných účinkov troskovej fázy je veľmi dôležitým faktorom prúdenie ocele v medzipanve. Štúdium procesov prúdenia tekutého kovu v medzipanve pri plynulom odlievaní ocele je v praktických podmienkach problematické či už z hľadiska nevyhnutnosti veľkého počtu empirických skúšok alebo technologickej náročnosti prevádzania skúšok, nehovoriac o finančnej náročnosti. Z uvedených dôvodov sa na simuláciu prúdenia využíva fyzikálne modelovanie alebo matematické modelovanie, prípadne kombinácia uvedených metód. Pri fyzikálnom modelovaní je tekutá oceľ nahradená vodou, čo umožňuje aj vizuálne skúmanie prúdenia v medzipanve. Túto náhradu prúdiaceho média umožňuje podobnosť viskozitných parametrov vody a ocele Tab. 5 [2][8].

Tab. 5 Porovnanie fyzikálnych vlastností vody pri 20°C a ocele pri 1600°C

Vlastnosť	Voda pri 20°C	Oceľ pri 1600°C
Dynamická viskozita ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0,001	0,0064
Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1000	7014
Kinematická viskozita ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	$1\cdot 10^{-6}$	$0,913\cdot 10^{-6}$
Povrchové napätie ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	0,073	1,6

Prúdenie ocele v medzipanve je ovplyvnené geometriou medzipanvy, rozmermi, tvarom a usporiadaním prepážok a hrádzok, hladinou ocele v medzipanve, objemovými prietokmi, pozíciou ochrannej trubice, čím je do výraznej miery ovplyvnená kvalita ocele (Obr. 11).



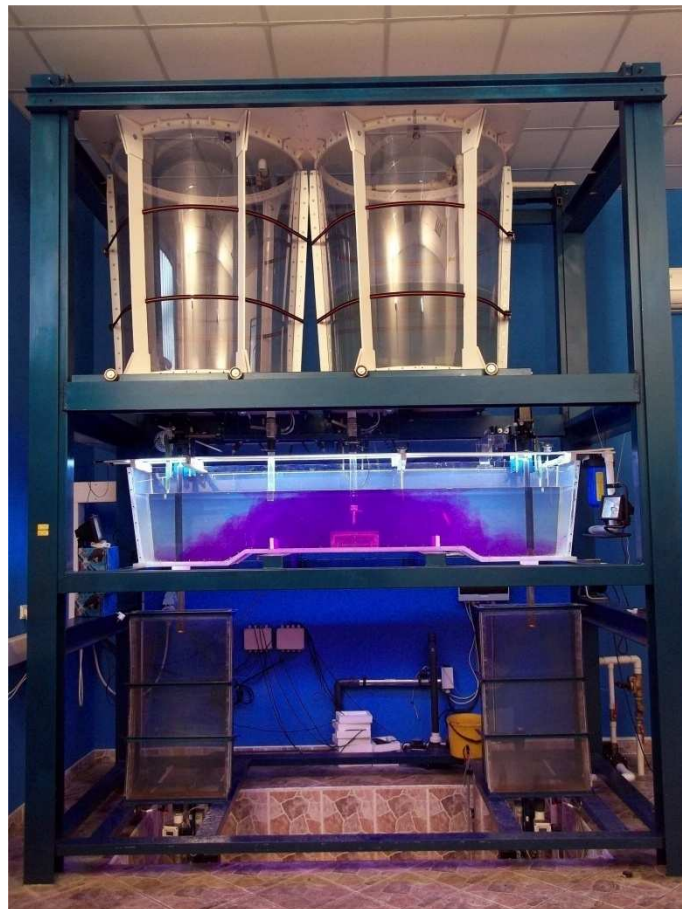
Obr. 11 Príklad možnosti vystrojenia symetrickej medzipanvy

Použitá metodika

Celosvetovým intenzívnym dlhoročným štúdiom možností a spôsobov fyzikálneho modelovania prúdení v medzipanve bolo vyvinutých niekoľko rôznych metód meraní. Medzipanva môže pracovať v dvoch režimoch. V prípade že je hladina ocele v medzipanve konštantná a množstvo ocele pritekajúcej do medzipanvy je rovné množstvu ocele opúšťajúcej medzipanvu výtokovými uzlami, hovoríme o ustálenom stave (Steady State). Ak medzipanva pracuje v neustálenom režime (Transient Casting), znamená to že množstvo ocele pretekajúcej medzipanvou sa mení s časom spolu s hladinou ocele v medzipanve, čo sa deje pri výmene liacich paniev.

Na stanovenie retenčných časov medzipanvy v laboratórnych podmienkach sa využíva na KMŽaZ vodný model zariadenia pre plynulé odlievanie ocele v mierke 1:3 Obr. 12, umiestnený v LSPP (Laboratórium simulácie procesov prúdenia).

Samotný vodný model pozostáva z dvoch liacich panví, ktoré je možné meniť v priebehu simulácie liatia, ochrannej trubice a medzipanvy, z ktorej výtok cez ponorné výlevky do kryštalizátorov je regulovaný dvoma zátkovými tyčami. V jednotlivých uzloch sú umiestnené indukčné prietokomery. Vo všetkých nádobách sú umiestnené snímače teploty a výšky hladiny vody. Model je ovládaný elektronickým systémom Simatic, kde je možné ovládať všetky prietoky, výšky hladín, ako aj posuv paniev a ochrannej trubice. Voda môže byť privádzaná z vonku, alebo môže cirkulovať vo vnútri modelu. Model je vybavený prístrojmi od firmy Moravian Instruments na snímanie vodivosti a teploty vody. Pre neizotermické merania je zabudovaná jednotka na ohrev vody.



Obr. 12 Laboratórium simulácie procesov prúdenia (LSPP)

Spolu s KCl je do ochrannej trubice injektovaný roztok hypermangánu KMnO_4 pôsobiaci ako kontrastná látka, čo umožňuje aj vizuálne sledovanie prúdenia v medzipanve.

Podmienky podobnosti

V prípade použitia dĺžkového kritéria 1:1 by model spĺňal Reynoldsove aj Froudeho kritériá podobnosti. Z hore uvedených dôvodov bol model skonštruovaný v mierke 1:3, čím boli na základe jeho rozmerov dodržané tiažové a zotrvačné sily. Z toho dôvodu nebolo možné súčasne dodržať tiažové a viskozitné požiadavky podobnosti. Tiažové a zotrvačné sily sú charakterizované Froudeho kritériom ako pre model, tak aj pre dielo:

$$Fr = Fr' \quad (13)$$

$$\frac{w^2}{g \cdot l} = \frac{w'^2}{g' \cdot l'} \quad (14)$$

Dielo aj model sú vystavené rovnakému pôsobeniu tiažového zrýchlenia a preto je možné toto vynechať, čím sa získa rovnica:

$$\frac{w^2}{l} = \frac{w'^2}{l'} \quad (15)$$

Čas je potom daný pomerom:

$$\tau = \frac{l}{w} \quad (16)$$

Postupným odvodením sa získajú vzťahy [6]:

$$M_l = M_\tau^2 \quad (17)$$

$$M_l = M_Q^{2/5} \quad (18)$$

kde: M_l je dĺžkové merítko

M_τ je časové merítko

M_w je merítko rýchlostí

V prípade modelu zostrojeného v mierke 1:3 je $M_l=0,33$. Pre dielo s rozmermi kryštalizátora 225x1590mm môžeme pri rýchlosti liatia uvažovať s minútovou produkciou $Q_m=5335\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$, ak uvažujeme hustotu ocele $\zeta=7800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemový prietok z panvy do medzipanvy je potom $Q_v=0,7606\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, ak uvažujeme hustotu tekutej ocele $\zeta=7014\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V prípade modelu je objemový prietok potom $Q_v=0,0475\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}=47,58\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Ak je tento objemový prietok na modeli dodržaný, je splnená podmienka $Fr=Fr'$. Podľa rovnice (17) je potom časové merítko:

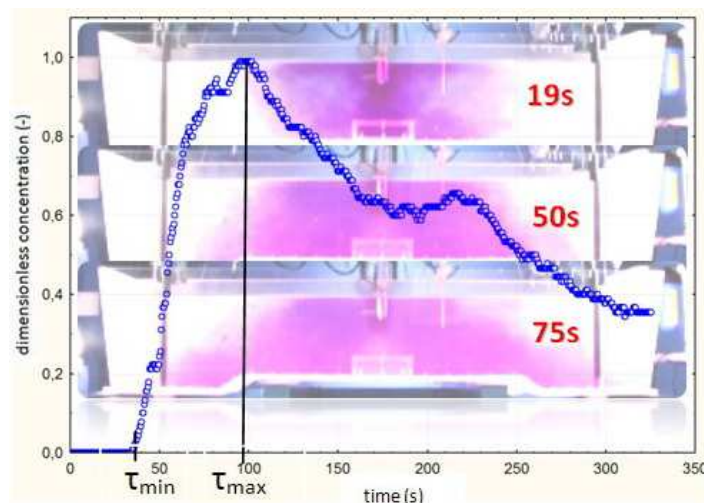
$$M_\tau = M_l^{1/2} = 0,33^{1/2} = 0,5773 \quad (19)$$

Z uvedených výpočtov vyplýva, že na použitom vodnom modeli sa bude dosahovať rýchlostí 1,73 krát menších než na diele pri a splnení rovnice (1) budú podobné stavy dosiahnuté za časový úsek 1,73 krát kratší než na diele.

Meranie pomocou tzv. C-kriviek

Táto metóda umožňuje zdefinovať charakteristiky prúdenia ocele v medzipanve za konštantných podmienok liatia. Po dosiahnutí požadovanej hladiny v kryštalizátore a ustálení rýchlosti liatia sa vstrekuje odmerané množstvo vodného roztoku KCl do ochrannej trubice. Na vstupe do medzipanvy a jej výtokových uzloch sú umiestnené vodivostné sondy, ktoré zaznamenávajú zmenu vodivosti vody vplyvom pridanej soli, čím sa získa C-krivka (Obr. 13). Z tejto krivky vieme určiť minimálny retenčný čas τ_{min} , čo je minimálna doba, za ktorú sa impulz značkovacej látky injektovaný do ochrannej trubice ($\tau_0 = 0s$) objaví na výtoku z medzipanvy. Minimálny retenčný čas má rozhodujúci vplyv na dobu ktorú majú inklúzie na vyplávanie z ocele do trosky. Maximálny retenčný čas τ_{max} je doba medzi τ_0 a maximálnou nameranou koncentráciou značkovacej látky na výstupe z medzipanvy.

Na osi X pri C aj F krivkách je možné uvádzať čas, ale aj napr. odliate množstvo ocele [$t \cdot \text{min}^{-1}$], na osi Y sa uvádza napr. bezrozmerná koncentrácia, kedy sú namerané hodnoty vodivosti, resp. koncentrácie prevedené na bezrozmerné hodnoty v rozsahu $<0,1>$ kvôli prehľadnosti a zjednodušeniu porovnania jednotlivých meraní.



Obr. 13 Príklad C-krivky pre medzipanvu vystrojenú Turbostopom pre rýchlosť liatia $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Výpočet zátkového objemu a mŕtvych zón

Jedným z dôležitých kritérií na posúdenie prúdenia kúpeľa v medzipanve je tzv. zátkový objem medzipanvy, ktorý je možné zdefinovať vzťahom (20) podľa [3], [4]:

$$PV = \frac{t_{delay}}{t_r} * 100\% \quad (20)$$

kde PV – zátkový objem (plug volume) [%]

t_{delay} – nameraný minimálny retenčný čas

t_r – teoretický retenčný čas medzipanvy

Zóna v medzipanve, kde dochádza len k minimálnemu prúdeniu sa nazýva mŕtva zóna a je možné ju definovať vzťahom (21), pričom sa jedná o percentuálne vyjadrenie objemu stopovacej látky zostávajúcej v medzipanve po čase $2t_r$.

$$DZ = \frac{V_{kp} * c_{2t_r}}{m_{KCl}} * 100\% \quad (21)$$

kde DZ – podiel mŕtvych zón [%]

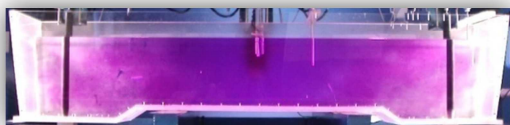
c_{2t_r} – koncentrácia stopovacej látky po čase $2t_r$ [kg/m³]

m_{KCl} – vstupný objem KCl [kg]

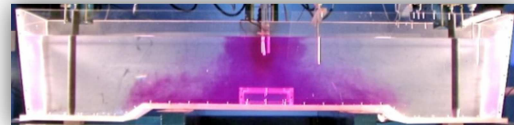
V_{kp} – objem medzipanvy [m³]

Úloha 1:

Porovnajte retenčný čas nevystrojenej medzipanvy s medzipanvou vystrojenou dopadovou doskou pri rýchlostiach liatia 0,8 a 1,2 m.min⁻¹ (Obr. 14). Merania vyhodnoťte vizuálne a graficky. Veľmi nízke hodnoty τ_{min} ukazujú na tzv. skratové prúdenie. Znamená to, že oceľ vstupujúca do medzipanvy sa dostáva do ponornej výlevky najkratšou možnou cestou čo môže byť spojené so vznikom tzv. mŕtvych zón v medzipanve. Jedným z cieľov optimalizácie prúdenia je preto dosiahnuť čo najvyššiu hodnotu minimálneho retenčného času. Z nameraných údajov vypočítajte a vyhodnoťte podiel mŕtvych zón pre jednotlivé konfigurácie.



Nevystrojená medzipanva

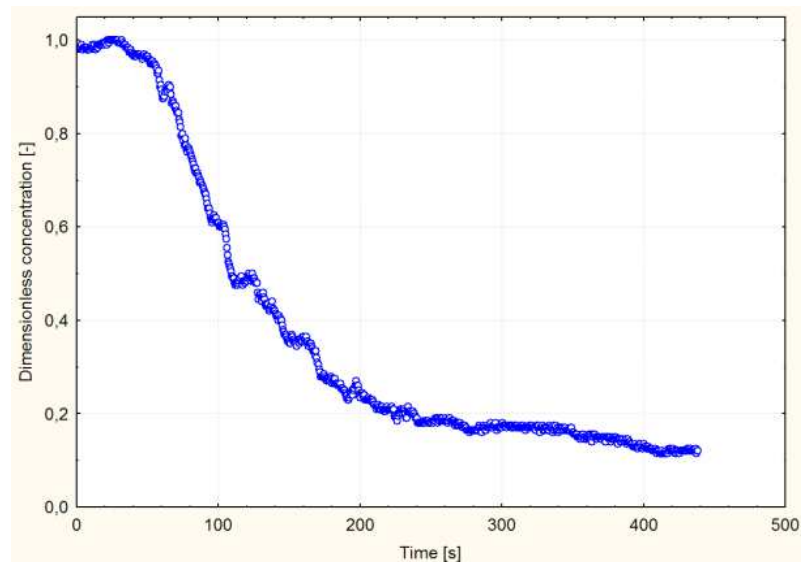


Medzipanva s Turbostopom

Obr. 14 Vizualizácia merania C-kriviek pre rôzne vystrojenú medzipanvu

Meranie pomocou F-kriviek

Získavanie hodnôt pre zostrojenie F-krivky sa realizuje podobným spôsobom ako pre C-krivku. Rozdiel je v tom, že v medzipanve na modeli sa spúšťa hladina vodného roztoku so „stopovacou látkou“ známej koncentrácie. Po znížení hladiny na požadovanú hodnotu sa následne medzipanva dopĺňa čistou vodou na maximálnu úroveň hladiny. Dopĺňanie čistej vody spôsobuje pokles vodivosti na sondách umiestnených na výtokových uzloch medzipanvy. Z takto nameraných hodnôt sa zostrojí graf, ktorého výsledkom je tzv. F-krivka (Obr. 15). U takto zostrojenej krivky sa dá vypočítať, v ktorom čase za daných podmienok sa koncentrácia analyzovaného prvku znížila, alebo zvýšila na požadovanú hodnotu. Takisto sa dá vypočítať, aké množstvo ocele bolo odliate a kde sa nachádza tzv. prechodová oblasť.



Obr. 15 Príklad F-krivky

Úloha 2:

Navrhните 2 rôzne konfigurácie medzipanvy a s využitím popísanej metodiky stanovte F-krivky porovnávaných konfigurácií. Meranie preveďte za izotermických podmienok, čo znamená, že teplota vody počas merania je konštantná v liacej panve a aj v medzipanve. Uvažujte spustenie hladiny ocele na 20t a jej dopĺňanie rýchlosťou 100% na 50t, čo predstavuje pracovný objem danej medzipanvy v praxi.

7. Štúdium kinetiky rozpúšťania ocelového šrotu

Štúdium vplyvu niektorých technologických faktorov na rýchlosť tavenia ocelového šrotu.

Rozvoj výroby ocele je úzko spojený s využitím ocelového odpadu, ktorý predstavuje 20 až 100% objemu vsádzky pre výrobu ocele v závislosti od použitej technológie.

V súčasnej dobe existujú rôzne spôsoby využitia šrotu v oceliarskych agregátoch, od jeho jednoduchého pretavovania až po pridávanie do tavenín rozličného zloženia. Vo všetkých prípadoch je však výrobnosť agregátu v značnej miere určovaná rýchlosťou tavenia vsadeného šrotu. Preto sa hľadajú spôsoby zvýšenia rýchlosti tavenia, skúma sa jeho mechanizmus a vplyv rozličných technologických faktorov.

Tavenie kovu je zložitý fyzikálne – chemický proces, podmienený prechodom z jedného skupenského stavu do druhého. Tento proces sa stáva ešte zložitejším, keď prebieha v tekutej tavenine majúcej iné zloženie, ako tavený kov. V tomto prípade rýchlosť tavenia je určovaná pochodmi výmeny tepla a výmeny hmoty na hranici tuhé teleso – tavenina. Ide tu teda o jav, s ktorým sa stretávame vo väčšine oceliarskych agregátov nielen v perióde tavenia, ale i perióde dohotovenia ocele.

Najzložitejší prípad nastane, keď sa studený šrot ponára do tekutého kovu. Pritom na ponorenom kuse s veľkou rýchlosťou prebieha namrzanie taveniny. Podľa miery prehriatia tok tepla vedúci do vnútra kusu sa znižuje a v dôsledku toho stupeň zamrznutia sa postupne znižuje až na nulu. Až potom začne prebiehať odtavovanie namrzutej vrstvy až po jej úplne zmiznutie. Pritom sa teplota na povrchu kúska rovná teplote taveniny. Celý tento časový úsek od ponorenia šrotu do taveniny do úplného zmiznutia namrzutej vrstvy železa sa nazýva tepelnou periódou. Jej trvanie je určované podmienkami výmeny tepla.

Potom sa začína tavenie samotného kúska, pričom tento proces prebieha pri teplotách obyčajne nižších ako teplota tavenia šrotu. To sa vysvetľuje difúznymi javmi na hranici tavenina – tuhá látka. Prebieha nasýtenie povrchových vrstiev uhlíkom taveniny a ich odtavenie. Táto perióda sa nazýva difúznou. Jej trvanie je značne dlhšie ako tepelnej periódy a teda difúzna perióda je určujúcou v celkovom trvaní tavenia. Proces tavenia šrotu prebieha so značnou stratou tepla, preto rýchlosť tavenia šrotu závisí od tepelného príkonu privádzaného k rozhraniu fáz.

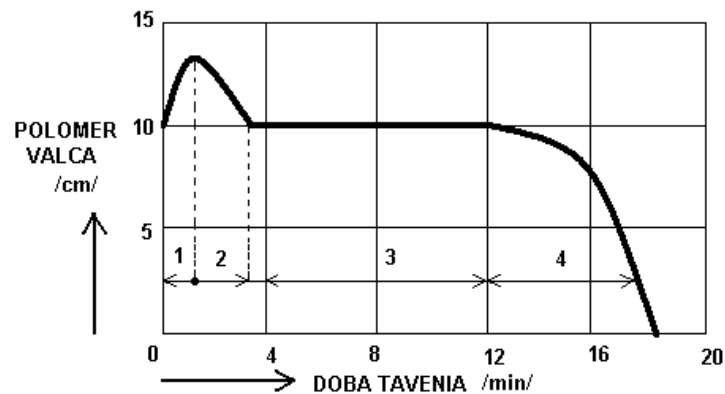
V difúznej perióde na rýchlosť tavenia má veľký vplyv rozdiel koncentrácie uhlíka medzi taveninou a vzorkou a intenzita premiešavania taveniny.

Na základe uvedeného je možné proces rozpúšťania ocelového šrotu v železouhlíkovej tavenine rozdeliť na dve periódy a štyri základné štádia, Obr. 16.

Na Obr. 17 je znázornená schéma hraničných vrstiev pri tavení ocelového odpadu a na Obr. 18 je schematické zobrazenie rozdelenia teplôt a koncentrácií uhlíka v diagrame Fe - C.

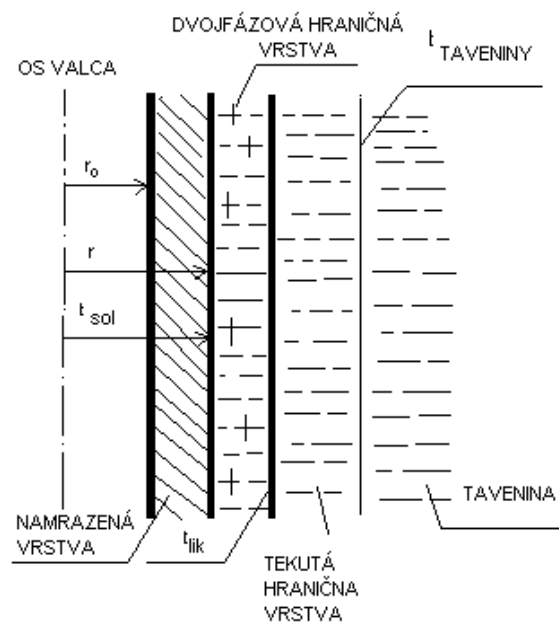
Pre intenzívne tavenie prehriateho ocelového odpadu postačuje nahličovanie tenkej povrchovej vrstvy.

Vo štvrtom štádiu je pochod tavenia limitovaný prenosom tepla a hmoty v tekutej fáze. Ako ukázali metalografické pozorovania povrchových vrstiev tuhého oceľového odpadu obsah uhlíka v nich sa udržiava na hodnote odpovedajúcej teplote.

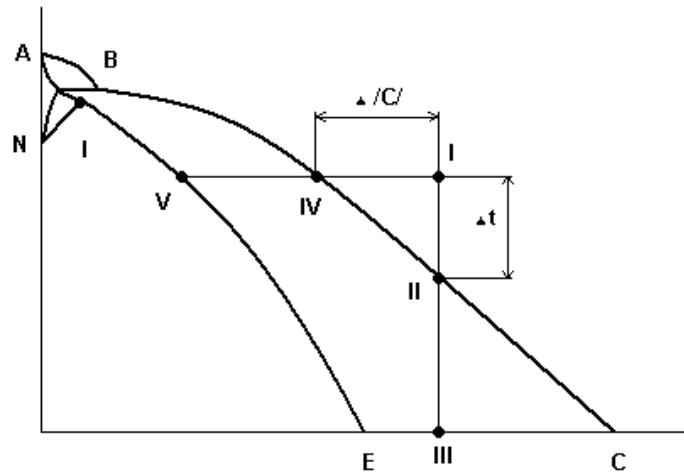


Obr. 16 Zmena polomeru vzorky ocele pri jej tavení v kovovom kúpeľi:

1- prvé štádium – trvá od ponorenia vzorky do Fe-C taveniny až po dosiahnutie maximálneho namrzenia taveniny na povrchu vzorky; 2- druhé štádium – štádium odtavenia namrzenej vrstvy; 3- tretie štádium – ohrevu vzorky na teplotu, pri ktorej dochádza k stacionárnemu taveniu; 4- štvrté štádium – intenzívneho tavenia vzorky



Obr. 17 Schéma hraničných vrstiev pri tavení oceľového odpadu



Obr. 18 Schéma rozdelenia teplôt a koncentrácií uhlíka v diagrame Fe-C pri tavení ocelového odpadu:

I. – tavenina, - likvidus, III. – solidus, IV.,V. – tekutá a tuhá hraničná vrstva v IV. Štádiu / bod V., obr.č.3./, ktorá je podstatne vyššia ako teplota solidu taveniny / bod III., obr.č.3/, avšak o niečo nižšia ako teplota taveniny. Pritom zloženie a teplota povrchovej tekutej vrstvy /bod IV., obr.č.3/ zabezpečuje nevyhnutný rozdiel teplôt a koncentrácií na synchronizáciu vonkajších tokov tepla a hmoty /uhlíka/. Vďaka tomu vo štvrtom štádiu prebieha intenzívne stacionárne tavenie ocelového odpadu.

Pre štúdium časového prechodu ocelového odpadu, prípadne ferozliatin do kovového kúpeľa sa používa stanovenie úbytku hmotnosti (Obr. 19) v čase v rôznych štádiách procesu. Prakticky význam má štádium jednotlivých činiteľov ovplyvňujúcich parametre jednotlivých štádiách procesu.



Obr. 19 Úbytok hmotnosti na vzorkách

Tab. 6 Tabuľka pre zápis výsledkov sledovania úbytku hmotnosti

číslo vzorky	m_1 [g]	m_2 [g]	$m_1 - m_2$ [g]	[%]	čas [s]
1					1
2					2
3					3
4					8
5					15
6					20
7					30
8					40

17. Baumannove skúšky

Síra v oceli nepriaznivo ovplyvňuje tvárnenie za tepla, pretože porušuje kov. Takéto porušenie spôsobuje eutektikum s FeS, ktoré sa vylučuje pozdĺž hraníc zŕn a má nižšiu teplotu tavenia, ako je teplota tvárnenia. Nepriaznivé účinky sa odstraňujú Mn, ktorý čiastočne nahradí v sulfide Fe podľa rovnice



Eutektikum MnS + Fe má vyššiu teplotu tavenia, ako je teplota tvárnenia, a tak nie je na prekážku.

Rozloženie síry v oceliach zisťujeme Baumannovou skúškou. Podstatou skúšky sú reakcie medzi sírou v skúšanom materiáli a bromostrieborným fotografickým papierom pomocou 5 % roztoku kyseliny sírovej.

Reakcie prebiehajú podľa rovníc:

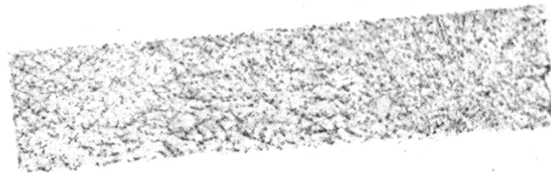


Pri skúške postupujeme takto: Skúšaná vzorka sa postupne vybrúsi až na najjemnejšom brúsiacom papieri. Umyje sa vodou a odmastí etylalkoholom. Fotografický papier sa namočí do 5 % roztoku kyseliny sírovej na 5 až 10 minút. Po 10 minútach sa papier položí emulznou stranou hore na sklenenú podložku. Na emulznú stranu sa pritlačí odmastená plocha skúšanej vzorky na 3 až 5 minút. Najvhodnejší čas sa určí pokusne. Po tomto čase sa fotografický papier veľmi dôkladne opláchne a usušuje minimálne 30 minút. Po ustálení sa opäť opláchne a vyleští na fotografickej leštičke.

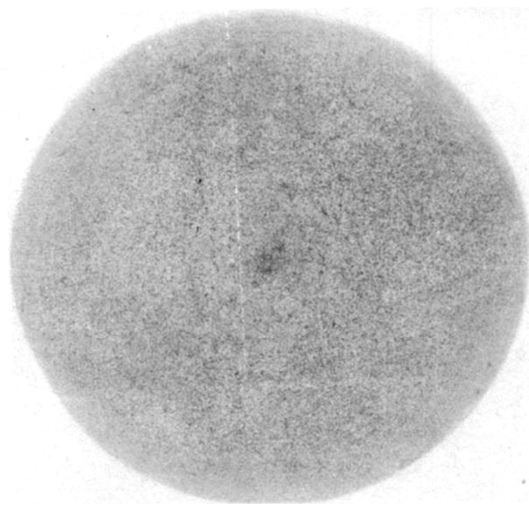
Baumannovu skúšku používame aj na skúmanie veľkých kusov, pričom postupujeme tak, že fotografický papier namočený do kyseliny sírovej na 5 minút prikladáme na odmastenú plochu skúšaného predmetu, ktorú sme predtým brúsili až najjemnejším brúsiacim papierom, a to emulznou stranou k ploche vzorky. Opačnú stranu papiera potierame handrou alebo vatou namočenou do 5 % roztoku kyseliny sírovej, aby nastal bezprostredný styk emulzie a vyleštenou plochou vzduchových bublín. Ďalší postup je totožný s uvedeným postupom. Na takto pripravenom fotografickom papieri vzniknú v miestach, kde sa nachádza síra, hnedé škvrny sulfidu strieborného. Podľa ich rozloženia a tvaru môžeme zistiť vlastnosti materiálu a z vlastností materiálu môžeme určiť možnosti jeho použitia.

Na obr. 1, 2 a 3 sú makro snímky na zisťovanie tvaru a rozloženie síry v danej vzorke. Na obr. 1 je znázornená Baumannova skúška na rozloženie síry v liatine. Síra sa dostáva do medzidendritických oblastí a vykresľuje tak tvar dendritickej kryštalizácie. Síra v miestach, kde sa vylučuje, zoslabuje kovové vlastnosti materiálu. Na obr. 2 je tyčová oceľ s chemickým zložením C = 0,40 %, P = 0,46 %, Mn = 1,03 %, S = 0,022 %, Si = 0,36 %. V priereze je rovnomerné rozloženie síry.

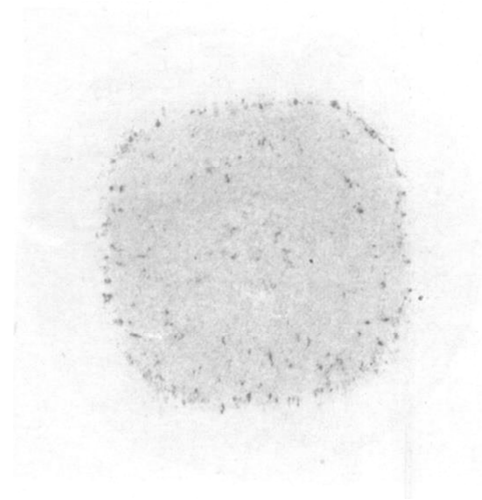
Na obr. 3 je tyčová oceľ s chemickým zložením $\text{Cu} = 0,15 \%$, $\text{P} = 0,28 \%$, $\text{Mn} = 0,37 \%$, $\text{S} = 0,22 \%$. Síra sa vylučuje v strede a vytvára štvorcový útvar so silnejšou a slabšou koncentráciou.



Obr. 20 Rozloženie síry v liatine (Baumannova skúška)



Obr. 21 Tyčová oceľ s chemickým zložením $\text{C} = 0,40 \%$, $\text{P} = 0,46 \%$, $\text{Mn} = 1,03 \%$, $\text{S} = 0,022 \%$, $\text{Si} = 0,36 \%$ (Baumannova skúška)



Obr. 22 tyčová oceľ s chemickým zložením $\text{Cu} = 0,15 \%$, $\text{P} = 0,28 \%$, $\text{Mn} = 0,37 \%$, $\text{S} = 0,22 \%$, (Baumannova skúška)

18. Studené modelovanie kyslíkovo-konvertorovej tavby

Cieľ:

Štúdium aerodynamických zákonitostí fúkania kyslíka, spôsobu pohybu kúpeľa, formy a rozmerov reakčnej zóny v prvej beztroskovej perióde výroby ocele v kyslíkovom konvertore.

Teoretická časť:

Podstata LD – pochodu spočíva v skujňovacom účinku prúdu kyslíka o vysokej čistote (99,5%), vystupujúceho z vodou chladenej trysky zasunutej do hrdla konvertora a narážajúceho na povrch kúpeľa. Znalosť povahy tohto kyslíkového prúdu je dôležitá pre regulovanie priebehu skujňovania. Hlavné parametre, ktoré majú vplyv na priebeh pochodu, sú množstvo a tlak privádzaného kyslíka, vzdialenosť ústia trysky od hladiny kúpeľa a priemer trysky.

V súvislosti s tým, že bezprostredné merania na kyslíkovom konvertore sú veľmi zložité a často neriešiteľné, významné miesto zaujíma štúdium jednotlivých charakteristík kyslíkovo-konvertorového procesu približným modelovaním s nízkoteplotnými taveninami.

V praxi nie je možné počas tavby meniť priemer trysky, tlak kyslíka určuje množstvo O₂ fúkaného do konvertora za jednotku času. Ak sa predpokladá, že využitie kyslíka nezávisí na jeho príkone, je časové množstvo kyslíka priamo úmerné dobe fúkania, t.j. výkonu konvertora. Ak je doba tavby predpísaná, môže tavič regulovať fúkanie prakticky len zmenou výšky trysky nad kúpeľom.

Medzi základné charakteristiky, majúce prvoradý význam pre priebeh celého pochodu skujňovania ocele v kyslíkovom konvertore, patrí hodnota prehĺbenia modelujúcej kvapaliny pod účinkom prúdu plynu.

Pri vníkaní prúdu plynu do kvapaliny sú určujúce sily inercie pôsobiace zo strany prúdu plynu a vytlačacie sily pôsobiace zo strany taveniny. Keďže viskozita a povrchové napätie hrajú v tomto prípade iba nevelkú úlohu, môžeme ich zanedbať.

V teórii podobnosti sa vzťah medzi silami inercie a vytlačovania zapisuje Archimedovým kritériom:

$$A_r = \frac{\gamma_g \cdot w_g^2}{\gamma_l \cdot g \cdot l} \quad (25)$$

Kde: γ_g a γ_l – merná hmotnosť plynu a taveniny, kg/m³

g – gravitačné zrýchlenie, m/s²

w – rýchlosť plynu, m/s

l – charakteristický lineárny rozmer, m

Po úpravách predchádzajúcej rovnice dostávame:

$$\frac{\pi \cdot \gamma_g \cdot w_g}{4 \cdot \gamma_l \cdot g \cdot l} \cdot \frac{1^2}{1^2} = \frac{\pi \cdot \gamma_g \cdot w_g^2 \cdot 1^2}{4 \cdot \gamma_l \cdot g \cdot l^3} = \frac{\rho_g \cdot w_g^2 \cdot f_g}{\rho_l \cdot g \cdot h_0^3} = \frac{i_g}{\rho_l \cdot g \cdot h_0^3} \quad (26)$$

kde: f – prierez otvoru dýzy, m^2

h – výška trysky od hladiny taveniny v pokoji, m

i_g – impulzy prúdu, kg

$\rho_g \rho_l$ – hustota plynu a taveniny, $kg \cdot s^2 \cdot m^4$ ($kg \cdot m^{-3}$)

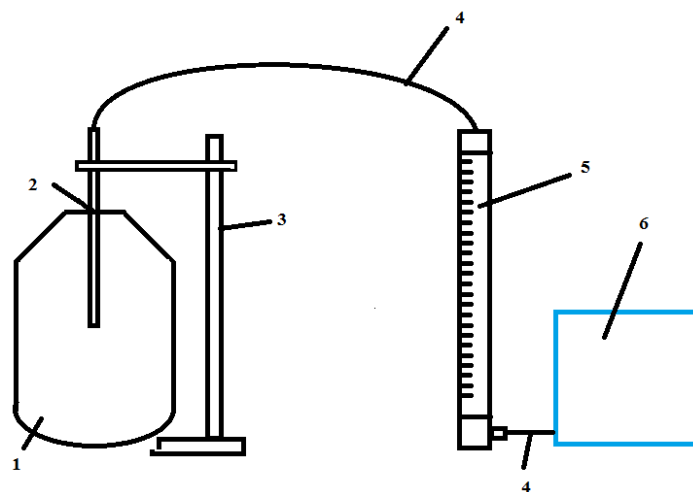
Takto získanú bezrozmernú veličinu označíme symbolom I – bezrozmerným impulzom:

$$I = \frac{i_r}{\rho_l \cdot g \cdot h^3} \quad (27)$$

Výskumy prevedené na modeloch s použitím rôznych kvapalín a plynov, taktiež rôznych dýz s rôznymi rozmermi otvorov ukázali, že bezrozmerná hĺbka dutiny je určená bezrozmerným impulzom a nezávisí od druhu taveniny a plynu, ani od rozmeru dýzy. Z toho vyplýva, že ak je model podobný modelovému agregátu, takéto modelovanie možno prepočítať na reálny konvertor.

Experimentálna časť

Schéma použitého zariadenia (Obr. 23)



Obr. 23 Schéma zostavy zapojenia pre studené modelovanie kyslíkového konvertora:

1 – sklenený model kyslíkového konvertora v mierke 1:20, 2 – trysky s rôznymi priermi, 3- statív pre reguláciu výšky trysky, 4 – spojovacie hadice, 5 – prietokomer, 6 - kompresor

Studené modelovanie kyslíkovo konvertorového pochodu sa robí na sklenenom modeli (Obr. 24) v mierke 1:20. Roztavený kov sa nahrádza vodou. Plní sa ho do takej výšky (h_k), aby hladina vody modelovala hladinu 180 t tekutej surovej ocele.

Rozmery skutočného konvertora sú:

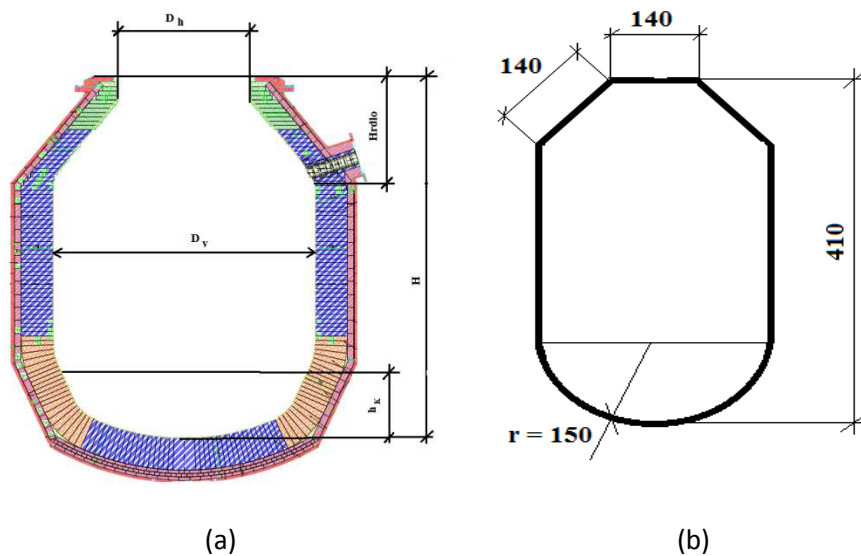
$$H = 8,5 \text{ m}$$

$$D_h = 3,098 \text{ m}$$

$$D_v = 6,11 \text{ m}$$

$$\text{Hrdlo} = 2,227 \text{ m}$$

$$h_k = 1,527 \text{ m}$$



Obr. 24 Základné rozmery skutočného (a) a skleneného modelu konvertora (b)

Výpočet výšky hladiny vody:

$$G = V \cdot \gamma \quad (28)$$

kde: G – množstvo ocele v kyslíkovom konvertore

$$\gamma = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$V_{180t \text{ ocele}} = \frac{G}{\gamma} = 23,08 \text{ m}^3 \quad (29)$$

Kov v kľude sa nachádza v sférickom segmente a na valcovitej časti konvertora

$$V_{180t \text{ ocele}} = V_1 + V_2 \quad (30)$$

Objem guľového odseku h_{SS} vypočítame podľa vzťahu (31):

$$V_1 = \frac{1}{6} \pi h_{SS} \cdot (3r_K^2 + h_{SS}^2) [m^3] \quad (31)$$

Kde h_{SS} – prijatá hĺbka sférického segmentu, [m]

Objem valcovitej časti konvertora naplnenej kovom podľa vzťahu (31):

$$V_2 = \pi r_K^2 \cdot h_V \quad (32)$$

kde h_V – výška valcovitej časti konvertora

Celková hĺbka kovového kúpeľa sa vypočíta podľa daného vzťahu (33):

$$h_K = h_V + h_{SS} \quad (33)$$

kde h_K – celková hĺbka kovového kúpeľa

V našom prípade výška hladiny kúpeľa v kyslíkovom konvertore sa nachádza len v sférickom segmente gule. Skutočná výška hladiny je 1527 mm.

Rôzne druhy trysiek: jednotvorové s priemerom (d) 3, 5, 7, 9 mm a viacotvorová.

Výška hladiny v modeli: 76,4 mm.

Výška trysky od dna (x): 80, 120, 160 mm.

Tryska sa pomocou hadičky napojí cez prietokomer na kompresor. Nastaví sa požadovaná výška trysky (x) a začne sa s fúkaním. Pritom sa odčíta hĺbka a šírka krátera. V každej polohe trysky sa postupne zvyšuje tlak vzduchu až na hodnotu, pri ktorej začína rozstrek.

Experimenty sú zaznamenané podľa schém

Tab. 7 a Tab. 8 [16].

Tab. 7 Namerané hodnoty funkcie $p_{\text{rozstrek}} = f(x/d)$

x/d	$P_{\text{rozst.}}$	x/d	$P_{\text{rozst.}}$	x/d	$P_{\text{rozst.}}$	x/d	$P_{\text{rozst.}}$

Tab. 8 Závislosť prehĺbenia kvapaliny od tlaku

Tlak roztreku [l/min]	Priemer trysky (d)	Výška trysky od dna v [mm]					
		80		120		160	
		Parametre krátera v [mm]					
		šírka	hĺbka	šírka	hĺbka	šírka	hĺbka

Úlohy:

- Graficky a tabelárne vyhodnoťte:
 - $p_{\text{rozstrek}} = f(x/d)$ pre $x = 80, 120, 160$ mm a $d = 3, 5, 7, 9$ mm,
 - prehĺbenie kvapaliny od tlaku pre $d = 3, 5, 7, 9$ mm a $x = 80, 120, 160$ mm.
- Graficky zaznamenajte schému prúdenia kvapaliny pri:
 - povrchovom fúkaní: $d = \dots$ mm, $x = +80$ mm, $p = \dots$
 - povrchovom fúkaní: $d = \dots$ mm, $x = -80$ mm, $p = \dots$
- Získané závislosti vysvetlite.

Výpočtové cvičenia

8. Sievertsov zákon – rozpustnosť plynov v roztokoch

Vo všeobecnosti je rozpustnosť plynov v roztavených kovoch veľmi malá a z tohto dôvodu môžeme považovať plyny v roztavených kovoch za nekonečne zriedené roztoky.

Sievertsov zákon určuje závislosť molekulárne rozpusteného plynu v roztavenom kove na jeho tlaku pri konštantnej teplote:

$$x = K_S \cdot \sqrt{p_{X_2}} \quad (34)$$

Kde: x – molárny zlomok atomárne rozpusteného plynu x v roztavenom kove

K_S – konštanta sievertsovho zákona

p_{X_2} – relatívny parciálny tlak plynu x nad roztaveným kovom v molekulárnej podobe.

Všeobecne je možné definovať rozpustnosť plynov v roztavenom kove takto:

$$\frac{1}{2} X_2(g) = [\% X] \quad (35)$$

Pomocou aktivity, resp. fugacity sa dá vyjadriť konštanta Sievertsovho zákona pri konštantnej teplote:

$$K_S = \frac{a_x}{p_{X_2}^{1/2}} = \frac{f_{x[\%X]}}{p_{X_2}^{1/2}} \quad (36)$$

Rozpustené plyny v roztavených kovoch považujeme za nekonečne zriedené roztoky, preto sa aktivitný koeficient plynu f_x blíži jednej a preto platí:

$$[\%X] = K_S \cdot p_{X_2}^{1/2} \quad (37)$$

Príklad:

1. Pri teplote 1550°C a tlaku 101,325kPa sa v roztavenom železe rozpustí $2,24 \cdot 10^{-3}$ % vodíka. Vypočítajte s využitím rovnovážnej konštanty K_S , koľko vodíka sa rozpustí pri tlaku zníženom na 10,1325kPa.
2. Vypočítajte parciálny tlak vodíka pri teplote 1600°C, kedy je konštanta Sievertsovho zákona $K_S=0,0027$ a pri teplote 600°C, ak je $K_S=0,000116$. V oboch prípadoch počítajte s obsahom vodíka v železe 0,0009%.
3. Vypočítajte, koľko dusíka sa rozpustí atomárne v tekutom železe pri teplote 1547°C a tlaku 101,325kPa a 10,1325kPa, ak je rovnovážna konštanta pri danej teplote $K_S=1,92 \cdot 10^{-6}$.

9. Výpočet aktivity síry vo viacložkovej sústave

Aktivita prvku B v zriedenom viacložkovom roztoku so základným rozpúšťadlom A je do značnej miery ovplyvňovaná prítomnosťou ďalších prvkov. Aktivitný koeficient ktoréhokoľvek rozpusteného prvku je možné vyjadriť ako súčin jednotlivých aktivitných koeficientov, ktoré vyjadrujú vplyv každého z rozpustených prvkov. Koeficient aktivity prvku B vo viacložkovej sústave vyjadríme:

$$f_B^{A...E} = f_B^* \cdot f_B^C \cdot f_B^D \cdot \dots \cdot f_B^E \quad (38)$$

Kde f_B^* je koeficient aktivity prvku B v binárnej sústave A-B

$f_B^C \cdot f_B^D \cdot \dots \cdot f_B^E$ sú koeficienty, ktoré vyjadrujú vplyv rozpustených prvkov C,D,...E na aktivitu prvku B zodpovedajúcich sústavách A-B-C, A-B-D, A-B-E.

Odvođením získame Wagnerovu rovnicu, ktorá využíva poznatok, že v zriedených ternárnych roztokoch s rozúšťadlom A je možné vyjadriť vplyv druhého prvku E na koeficient aktivity prvku B v roztoku A-B-E:

$$\log f_B^E = e_B^E [\%E] \quad (39)$$

Kde e_B^E je interakčný koeficient, vyjadrujúci vplyv prvku E na koeficient aktivity prvku B v roztoku A-B-E a celková rovnica je potom:

$$\log a_B^{A...E} = \log f_B^* + e_B^C [\%C] + \dots + e_B^E [\%E] + \dots + \log [\%B]^{A...E} \quad (40)$$

Hodnoty interakčných koeficientov nájdeme v tabuľkách.

Príklady:

1. Zloženie ocele je: 0,3%Cr, 0,8%Ni, 0,25%Si, 0,1%C, 1,2%Mn, 0,1%Al, 0,5%Ti, 0,01%S. Zbytok je železo. Vypočítajte aktivitu síry v tejto oceli s využitím aktivitných koeficientov:
 $e_S^C = 0,11, e_S^{Cr} = -0,022, e_S^{Ni} = 0, e_S^{Si} = 0,066, e_S^{Mn} = -0,025, e_S^{Al} = 0,058, e_S^{Ti} = 0, e_S^S = -0,028.$
2. Porovnajte možnosti odsírenia ocele z Pr.1 s čistým železom (sústava Fe-S).

10. Výpočet teplotného intervalu tuhnutia nízkolegovaných a uhlíkových ocelí

Veľmi dôležitým parametrom pri odlievaní každej ocele je jej charakteristika tuhnutia, teda teplota likvidu, solidu a teplotného intervalu tuhnutia. Tieto parametre je nutné poznať v prípade klasického odlievania ocele, ale aj pri plynulom odlievaní, kde má zvlášť veľký význam z hľadiska kvality odliatku, no najmä z hľadiska plynulosti a schodnosti samotného technologického procesu. Pri plynulom odlievaní býva odlievacia teplota 10 - 30°C nad teplotou likvidu odlievanej ocele.

Na výpočet teploty likvidu existuje viacero vzťahov, napr. [5] (41):

$$T_l = 1536 - [78.(\%C) + 7,6.(\%Si) + 4,9.(\%Mn) + 34.(\%P) + 30.(\%S) + 5,0.(\%Cu) + 3,1.(\%Ni) + 1,3.(\%Cr) + 3,6.(\%Al) + 2,0.(\%Mo) + 2,0.(\%V) + 18.(\%Ti)] \quad [^\circ\text{C}] \quad (41)$$

Podobný vzťah pre výpočet odlievacej teploty ocele T_l je možné zostaviť z údajov nameraných pri tuhnutí laboratórnych vzoriek rôznych značiek ocelí [5] (42):

$$T_l = 1534 - [80.(\%C) + 14.(\%Si) + 4.(\%Mn) + 35.(\%P) + 35.(\%S) + 2,6.(\%Ni) + 1,4.(\%Cr) + 3,4.(\%Al) + 1,2.(\%Mo)] \quad [^\circ\text{C}] \quad (42)$$

Teplotu likvidu a solidu môžeme určiť zo vzťahov (43) a (44):

$$T_l = 1535 - \Delta T_l \quad (43)$$

$$T_s = 1535 - \Delta T_s \quad (44)$$

Kumulatívne posunutie týchto teplôt sa určí zo vzťahov (45) a (46):

$$\Delta T_l = \Delta T_l^C + \Delta T_l^{Mn} + \Delta T_l^{Si} + \dots + \Delta T_l^S + \Delta T_l^{Me} \quad (45)$$

$$\Delta T_s = \Delta T_s^C + \Delta T_s^{Mn} + \Delta T_s^{Si} + \dots + \Delta T_s^S + \Delta T_s^{Me} \quad (46)$$

Všetky hodnoty sú tabelované a výsledná hodnota sa potom vypočíta zo vzťahu (47):

$$\Delta T_{\text{tuh}} = \Delta T_l + \Delta T_s \quad (47)$$

Iným spôsobom pre tento výpočet je využitie regresných koeficientov uvedených v

Tab. 9 s využitím vzťahu (48):

$$\Delta T_{l,s} = A + B(\%Me) + C(\%Me)^2 \quad (48)$$

Tab. 9 Regresné koeficienty pre výpočet poklesu teplôt likvidu solidu

Prvok		Regresné koeficienty		
		A	B	C
C	ΔT_l	0,4848451	79,30863	2,372946
Mn		-0,0771777	5,705279	-0,08557327
Si		0,5149525	13,16580	-0,07529225
P		-0,1455983	36,55065	-105,99154
S		-0,3220267	62,36033	91,86318
Cr		-0,05228790	2,915382	-0,1047831
C	ΔT_s	pre $0,1 \leq \%C \leq 0,51$ je $\Delta T_s^C = -39K$, pre $\%C > 0,51$:		
		-186,5635	490,4698	-79,30304
Mn		-0,0712892	8,342010	-0,07725272
Si		0,2859975	18,56130	1,416243
P		-0,4434250	324,5316	-1790,370
S		-4,554523	728,1773	579,8470
Cr	-0,1255632	5,384737	-0,2150478	

Príklad:

Vypočítajte teplotný interval tuhnutia ocele STN 42 2630 s chemickým zložením 0,1%C, 0,1%Mn, 0,2%Si, 0,035%P, 0,035%S a 0,05%Cr.

11. Výpočet spotreby dezoxidovadiel a legúr pri výrobe ocele

Jednou z finálnych etáp výroby ocele je jej dezoxidácia legovanie. Dezoxidácia je zníženie obsahu aktívneho, voľného kyslíka rozpusteného v tavenine počas skujňovania ocele. Ako dezoxidovadlá sa využívajú prvky s vysokou afinitou ku kyslíku. Môžu byť aplikované vo forme čistých prvkov ako napríklad hliník, alebo vo forme ferozliatin. V mnohých prípadoch nie je možné proces dezoxidácie a legovania oddeliť, z čoho vyplýva že časť ferozliatiny vstúpi do reakcie s kyslíkom, prípadne s nekovmi a časť sa využije ako legúra. Tomuto javu sa hovorí prepál. Na legovanie sa však používajú aj prvky s nižšou afinitou ku kyslíku ako má železo, napríklad nikel, molybdén, atď.

Orientačne vyjadruje prepál legúr Tab. 10:

Tab. 10 Prepál legúr

Legúra	Forma legúry	Čas a miesto zavedenia	Prepál [%]
Ni	Nikel	Do vsádzky	-
Mo	Feromolybdén	Na začiatku varu	-
Cr	Ferochróm	Do pece	15-20
Cr	silikochróm	Do pece	15-20
Mn	Feromangán	Do pece	15-20
Si	Ferosilícium	Do panvy	10-20
Al	Hliník	Do panvy	50-90
V	Ferovanád	Do panvy	15-25
Ti	Ferotitán	Do panvy	50-60
B	ferobór	Do panvy po Al a Ti	30-60

Pre výpočet potrebného množstva dezoxidovadla alebo legúry môžeme použiť nasledovný vzťah (49):

$$Fz = \frac{a \cdot m \cdot 1000}{b \cdot c} [kg] \quad (49)$$

Kde: Fz – potrebná hmotnosť dezoxidovadla alebo legúry

a – množstvo legujúceho prvku, ktoré je do ocele potrebné vnieť (požadovaný obsah daného prvku v oceli mínus jeho obsah v kove pred legovaním) [kg]

b – obsah legovacieho prvku v legúre [%]

c – stupeň asimilácie aktívneho prvku

m – hmotnosť ocele [t]

Príklady:

1. Vypočítajte potrebné množstvo feromangánu, ak požadovaná oceľ obsahuje 0,4% Mn a oceľ pred legovaním 0,13% Mn pri hmotnosti tavby 200t. Obsah mangánu vo feromangáne je 80% a jeho prepál je 30%.
2. Vypočítajte spotrebu feromolybdénu, ak je do ocele potrebné vnieť 0,17% Mo. Hmotnosť tavby je 150t a obsah Mo vo feromolybdéne je 52%.

12. Výpočet požadovanej hĺbky dezoxidácie pre potreby legovania ocele

Množstvo aplikovaného dezoxidovadla, alebo legúry do ocele je možné v závislosti od charakteru využitia, rozdeliť na tieto časti:

- prvok reagujúci s kyslíkom, prípadne dusíkom rozpusteným v oceli (užitočný prepál)
- zbytkový prvok v rovnováhe s kyslíkom po ukončení dezoxidačnej reakcie pri danej teplote (analytické stanovenie ako prvok v roztoku)
- prvok reagujúci s kyslíkom v troske (závisí na technológii a charaktere trosky)
- prvok reagujúci s kyslíkom atmosféry (neužitočný prepál)

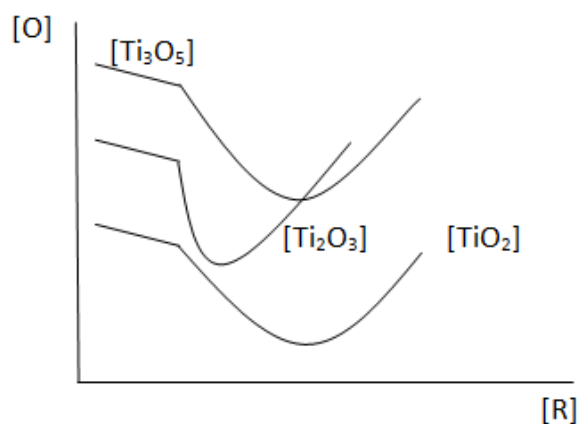
Množstvo dezoxidovadla sa dá potom vyjadriť ako funkcia aktivity kyslíka (50):

$$R_{teor} = f([a_O]) \quad [\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}] \quad (50)$$

Ak vychádzame z predpokladu, že všetok prvok reaguje iba s aktívnym kyslíkom až po dosiahnutie rovnováhy, vieme vypočítať množstvo dezoxidovadla takto (51):

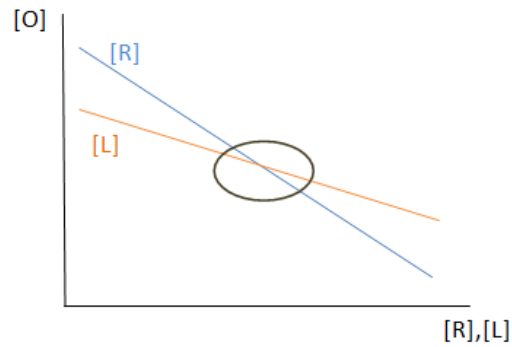
$$R_{vyp} - R_{poč} = R_{teor} \quad (51)$$

R_{teor} predstavuje nevyhnutné množstvo dezoxidačnej prísady potrebnú pre dosiahnutie požadovaného obsahu daného prvku v oceli pri požadovanej aktivite kyslíka. Jedná sa v podstate o stanovenie priesečníka stechiometrickej priamky charakterizujúcej stechiometriu danej dezoxidačnej reakcie s jej rovnovážnou krivkou. V Obr. 25 jednotlivé sklony kriviek v rôznych úsekoch vyjadrujú rovnováhu s daným produktom, čiže existuje určitá hodnota [R], kedy sa zníži aktivita kyslíka v oceli na minimum a potom začne rásť.



Obr. 25 Príklad rovnovážnych kriviek pre rôzne produkty

Priesečník rovnovážnych priamok na Obr. 26 predstavuje minimálne teoretické potrebné množstvo dezoxidovadla nevyhnutné pre potreby legovania.



Obr. 26 Príklad rovnovážnych stechiometrických priamok pre dezoxidovadlo R a legúru L

Ak sa v oceli pred dezoxidáciou nameria aktivita kyslíka $[a_O]_{poč}$, možno jej prostredníctvom rovnovážnej závislosti dezoxidácie určiť $[R]_{poč}$. Z požadovanej hodnoty aktivity kyslíka sa určí hľadaný priesečník oboch funkcií. S odpovedajúcim požadovaným množstvom R pre zabezpečenie rovnováhy s kyslíkom a zároveň zo stechiometrie danej dezoxidačnej reakcie R_{vyp} , z ktorej možno dosadením do rovnice uvedenej vyššie vypočítať teoretickú prísadu dezoxidačného prvku.

Ak by sme za požadovanú hodnotu aktivity kyslíka $[a_O]_{pož}$ považovali aktivitu kyslíka rovnovážnu s uvažovaným obsahom legúry, prípadne nižšiu, je možné týmto postupom vyšpecifikovať teoreticky nutné množstvo prísady dezoxidovadlá pre zabezpečenie legovania.

Ak sa označí dezoxidačný prvok symbolom R a legúra symbolom Me a uvažujeme s dezoxidačnými reakciami v tvare:



a



Ktorých rovnovážne konštanty sú:

$$\log K_{Me} = m_{Me} \log[\%Me] + n_{Me} \log[a_O] \quad (54)$$

$$\log K_R = m_R \log[\%R] + n_R \log[a_O] \quad (55)$$

Teoretická spotreba dezoxidovadla pre účely legovania sa určí podľa vzťahu (56) $[\text{kg.t}^{-1}]$:

$$[R]_{teor} = 10^{\frac{1}{m_R} \left(-\frac{A_R + B_R}{T} \right) - \frac{n_R}{m_R n_{Me}} \left(-\frac{A_{Me} + B_{Me}}{T} \right) \cdot [\%Me]^{\frac{m_{Me} \cdot n_R}{n_{Me} \cdot m_R} + \frac{1}{q_R}} [a_O]_{poč} - \frac{1}{q_R}} \cdot 10^{\frac{-\frac{A_{Me} + B_{Me}}{T}}{n_{Me}} \cdot [\%Me]^{\frac{m_{Me}}{n_{Me}} - [\%R]_{poč}} \quad (56)$$

kde q_r je smernica stechiometrickej priamky dezoxidovadla.

Tab. 11 Vstupné údaje pre stanovenie teoretickej spotreby dezoxidovadla

Prvok	A	B	m	n	q_2	Produkt
C	1043	-2,14	1	1	1,33	CO
Al	39284	11,050	2	3	0,89	Al ₂ O ₃
Si	19240	5,71	1	2	1,14	SiO ₂
Mn	10560	3,96	1	1	0,29	MnO
Ti	91039	32,572	3	5		Ti ₃ O ₅ do 0,3% Ti
	50946	18,543	2	3		Ti ₂ O ₃ nad 0,3% Ti
Nb	77529	33,142	2	5		Nb ₂ O ₅ do 0,25% Nb
	29053	12,171	1	2		NbO ₂ od 0,25-3% Nb
V	52226	20,768	2	4		FeO.V ₂ O ₃ do 0,22% V
	37877	15,027	2	3		V ₂ O ₃ nad 0,22% V

13. Výpočet rýchlosti vyplavovania nekovových vtrúsenín

Posúďte sklon nekovových vtrúsenín k vyplavovaniu sa z ocele pri 1873K ak sa ich polomer bude: a/ 0,1mm, b/0,01mm, c/0,001mm pri mernej hmotnosti ocele pri 1873K $7140\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mernej hmotnosti nekovovej vtrúseniny $4500\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (silikát mangán) a ak viskozita ocele pri 1873K sa bude rovnáť $0,0025\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Pre posúdenie sklonu laminárne sa pohybujúcich nekovových vtrúsenín k vyplavovaniu sa z ocele možno v určitom priblížení použiť Stokesov vzťah (57):

$$v = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\eta} \quad (57)$$

kde: v – rýchlosť vyplavovania častice [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]

r – polomer častice [cm]

g – gravitačné zrýchlenie [$981\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$]

ρ_2, ρ_1 – merná hmotnosť ocele a vyplavujúcej sa častice [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

η – viskozita roztavenej ocele [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Potom:

$$\text{a/} \quad v = \frac{2}{9} * 0,1^2 * 9,81 * \frac{(7,14-4,5)}{0,0025} = 23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{b/} \quad v = \frac{2}{9} * 0,01^2 * 9,81 * \frac{(7,14-4,5)}{0,0025} = 0,23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{c/} \quad v = \frac{2}{9} * 0,001^2 * 9,81 * \frac{(7,14-4,5)}{0,0025} = 0,0023 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$$

14. Výpočet aktivity kyslíka pri vákuovej dezoxidácii ocele

Určte aktivitu kyslíka, ktorú teoreticky možno dosiahnuť pri vákuovej dezoxidácii ocele obsahujúcej 0,1%C pri znížení tlaku vo vákuovej komore na 0,1MPa a na 0,001MPa pri teplote 1873K.

Vychádzajte z chemickej reakcie:



pre ktorú bola odvodená teplotná závislosť rovnovážnej konštanty [A] v tvare:

$$\log K = \frac{2975}{T} + 1,06 \quad (59)$$

Z ktorej sa dá odvodiť:

$$a_{[O]} = \frac{p_{CO}}{K \cdot a_{[C]}} \quad (60)$$

Ak sa zjednodušené predpokladá, že aktivný koeficient uhlíka sa pri jeho nízkom obsahu blíži k jednej, môžeme napísať:

$$a_{[O]} = \frac{p_{CO}}{K \cdot [\%C]} \quad (61)$$

Potom, pri $p_{CO} = 0,1\text{MPa}$:

$$a_{[O]} = \frac{\frac{0,1}{0,1}}{444,9 \cdot 0,1} = 0,02 \quad (62)$$

Vypočítajte aktivitu kyslíka pri $p_{CO}=0,01\text{MPa}$ a $p_{CO}=0,001\text{MPa}$

Z výpočtu vyplýva výrazný účinok vákua na dezoxidačnú schopnosť uhlíka. Jedná sa však o hodnoty iba teoretické, v praxi nedosiahnuteľné, naznačujú mimoriadny význam tejto technológie mimopecného spracovania ocele.

15. Výpočet vsádzky pre kyslíkový konvertor o hmotnosti 100 t

Teoretická časť:

Oceľ vyrábame fúkaním kyslíka do surového železa, čím vzniká surová oceľ, troska, plyn a úlet. Kyslíkovo konvertorový proces je sústava zložitejších a jednoduchších metalurgických dejov, ktoré môžeme spojiť do jedného celku cez riadiaci model.

Na to, aby sa systém dielčich procesov mohol riadiť, je potrebné zbierať informácie, za pomoci algoritmov ich spracovávať a ako výsledok v konkrétnej minúte vyslať príslušný impulz (napr.: kedy pridať vápno, aké množstvo vápna, zvýšiť alebo znížiť prítok kyslíka, ukončiť skujňovanie a počkať na vyhodnotene celej operácie). Podľa určitého programu stanoveného pre konkrétny čas sa pri riadení procesu snímajú napr.: množstvá kovových prísad (kovového odpadu), predredukovaných peliet, surového železa, kyslíka, troskotvorných prísad, uhlíka, ferozliatin atď. Sledujú sa chemické charakteristiky jednotlivých surovín v závislosti na vplyv s vyšším alebo nižším dopadom na riadený proces a teplotné charakteristiky. Niekedy sa používajú špeciálne snímače, napríklad v priebehu riadenia sa používa meracia sonda na stanovenie uhlíka a teploty kúpeľa.

Statický proces riadenia

Cieľom statického riadenia procesu je zabezpečiť optimálne zloženie vsádzky za účelom dosiahnutia požadovaných parametrov tavby.

Jeho podstata zahŕňa:

- výpočet základnej vsádzky (oceľový odpad, surové železo, vápno, chladiace médium),
- výpočet kyslíka potrebného na sfúkanie danej tavby,
- výpočet dezoxidačných a legujúcich prísad,
- poskytnutie výsledkov výpočtov prevádzkovému personálu, resp. priame zabezpečenie príslušných komponentov,
- proces prispôsobovania sa modelov na skutočné prevádzkové podmienky.

Vstupy pre statický model:

- teplota a hmotnosť surového železa,
- obsahy prvkov v surovom železe (C, Mn, Si, P, S),
- teplota a hmotnosť oceľového šrotu,
- obsahy prvkov v oceľovom šrote (C, Mn, Si, P, S),
- hmotnosť vápna a dolomitického vápna, ich chemické zloženie a požadované hodnoty : teplota a chemické zloženie konečnej ocele (C, Mn, Si, P, S).

Pre úspešný priebeh skujňovacieho procesu z pohľadu dosahovania optimálnej bazicity je potrebné realizovať jeho materiálno - tepelnú bilanciu.

Presné údaje o vsádzkových materiáloch a vyrábanej produkcii umožňuje na základe chemického pochodu a priebehu tavby vypočítať množstvo i skladbu vsádzaných a vyprodukovaných materiálov - materiálóvú bilanciu pochodu.

Tento základný cieľ je možné dosiahnuť zabezpečením:

- optimálneho využitia O_2 v závislosti na zložení spalín a momentálnych kinetických rýchlostiach priebehu príslušných reakcií,
- ekologicky najvyššou úrovňou vedenia tavieb.

Materiálovo-tepelná bilancia

Materiálovo-tepelná bilancia sa robí pri konci procesu v porovnaní so vstupom, je možné robiť ju v ktorejkoľvek minúte skujňovania a riadenie procesov. Spočíva v tom, ako presne vieme v danej minúte proces charakterizovať.

Vstupné údaje pre materiálovú bilanciu sú:

- hmotnosť prvkov v kovonosnej vsádzke (vypočíta sa),
- hmotnosť troskotvorných prísad najmä CaO , ktorá sa riadi obsahom Si v surovom železe, (vypočíta sa),
- hmotnosť a zloženie ďalších vstupných prísad (zohľadní sa),
- objem kyslíka potrebného na oxidáciu prvkov (vypočíta sa).

Výstupné údaje pre materiálovú bilanciu sú:

- požadované zloženie surovej ocele, zloženie trosky,
- strata prvkov úletom v spalinách.

Výpočet materiálovej bilancie na 100 t kovonosnej vsádzky

Zadanie:

Vstupné údaje pre samotný výpočet.

Tab. 12 Základné údaje – kovonosná vsádzka

Surovina	Teplota [°C]	Obsah prvkov [%]				
		C	Mn	Si	P	S
Surové železo	1335	4,5	0,4	0,5	0,065	0,002
Šrot	25	0,15	0,6	0,2	0,015	0,02
Oceľ	x	0,045	0,15	0	0,015	0,0015

Tab. 13 Zloženie troskotvorných prísad a ostatných materiálov

Materiál	Obsah zložiek [hmot.%]					
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	CO ₂
Vápnó	1,3	-	96,0	0,6	2	3,5
Vápenec	1,2	-	50	0,3	45	43,1
Konvertorový prach	3,5	82	2,5	-	-	-
Výmurovka	2	6.4	20,3	2,0	64.0	-

Pomer surového železa a šrotu je **86.2% : 13.8%**.

Z celkového množstva C sa spaľuje **96% na CO a 4% na CO₂**.

Čistota kyslíka je **99,7% O₂**, využitie kyslíka je **95%**.

Straty železa:

- 2% hmotnosti kovonosnej vsádzky sa oxiduje a prechádza do trosky,
- z toho **1,6% ako FeO a 0,4% ako Fe₂O₃**
- **1,5%** hmotnosti kovonosnej vsádzky sa viaže vo forme **kvapiék v troske ako kovové Fe**,
- **1%** hmotnosti kovonosnej vsádzky prechádza do konvertorového plynu (prachu) ako **Fe₂O₃**.

Výmurovka:

2% hmotnosti kovonosnej vsádzky (to odpovedá opotrebeniu výmurovky cca 120 tavičiek za kampaň), výmurovka prechádza do trosky.

Síra:

- ako MnS a po prechode ako CaS prechádza do trosky,
- v plynnej forme sa odstráni v množstve 10% (na SO₂).

Spotreba vápenca: 1.3 t na 100t kovonosnej vsádzky.

Zásaditosť trosky: $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 3,0$

Atómové hmotnosti prvkov (g/mol): Fe – 55,8, Mn - 55, P - 31, C - 12, Ca - 40, S - 32, Si - 28, O – 16
[6]

Postup výpočtu:

1. Výpočet potrebného množstva kyslíka:
 - 1.1. Podľa prepalu prvkov kovonosnej vsádzky
 - 1.2. Podľa stupňa využitia kyslíka
 - 1.3. Podľa čistoty kyslíka
2. Výpočet spotreby vápna:
 - 2.1. Množstvo CaO na požadovanú bazicitu trosky
 - 2.2. Množstvo CaO na viazanie S
 - 2.3. Množstvo CaO prineseného vápencom (uvažovať v.z., $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
 - 2.4. Množstvo CaO z výmurovky
 - 2.5. Celkové potrebné množstvo CaO (podľa 2.1 – 2.4) prepočítať na potrebné množstvo vápna s uvažovaním voľných zásad vápna (ako $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
3. Výpočet jednotlivých zložiek prinášaných vápencom, vápnom, výmurovkou
4. Výpočet množstva a zloženia trosky
5. Kontrola zásaditosti trosky
6. Výpočet množstva a zloženia konvertorového plynu a prachu
7. Materiálová bilancia [7][8][9][10][11]

1. Výpočet potrebného množstva kyslíka

1.1 Podľa prepalu prvkov v kovonosnej vsádzke

86.2 % sur. Fe + 13.8 % šrotu = kovonosná vsádzka

C: $4,5 \times 0,862 + 0,15 \times 0,138 = 3,903$ % C vo vsádzke

Mn: $0,4 \times 0,862 + 0,6 \times 0,138 = 0,427$ % Mn vo vsádzke

Si: $0,5 \times 0,862 + 0,2 \times 0,138 = 0,459$ % Si vo vsádzke

P: $0,065 \times 0,862 + 0,015 \times 0,138 = 0,058$ % P vo vsádzke

S: $0,002 \times 0,8 + 0,02 \times 0,138 = 0,004$ % S vo vsádzke

Aby sa dosiahlo predpísané zloženie ocele musí sa z procesu odstrániť /oxidovať/:

prvok vo vsádzke – prvok v hotovej oceli = množstvo prvku, kt. sa musí zoxidovať:

C: $3,903$ % - $0,045$ % = $3,858$ % C (zoxidovať) z toho: 96% na CO tj. **3,703** % C

4% na CO₂ tj. **0,154** % C

Mn: $0,427$ % - $0,15$ % = $0,49$ % Mn (zoxidovať) z toho: MnS tj. **0,005** % Mn

MnO tj. **0,273** % Mn

Si: $0,459$ % - 0 % = **0,52** % Si (zoxidovať)

P: $0,058$ % - $0,015$ % = **0,0431** % P (zoxidovať)

S: $0,004$ % - $0,0015$ % = **0,003** % S (zoxidovať) z toho: 10% na SO₂ tj. **0,00029** % S

90 % na MnS tj. **0,0026** % S

Tab. 14 Množstvo kyslíka a prepalu prvkov

Prvok	Množstvo prvku [t]	Produkt	Množstvo produktu [t]	Množstvo potrebného kyslíka [t]
C	3,703	CO	8,641	4,938
C	0,154	CO ₂	0,566	0,411
Mn	0,273	MnO	0,352	0,079
Mn	0,005	MnS	0,007	-
Si	0,458	SiO ₂	0,983	0,524
P	0,043	P ₂ O ₅	0,099	0,056
S	0,00029	SO ₂	0,001	0,0003
S	0,0026	CaS	0,006	-
Kovonosná vsádzka	1,6 Fe	FeO _{tr.}	2,057	0,457
Kovonosná vsádzka	0,4 Fe	Fe ₂ O _{3tr.}	0,571	0,171
Kovonosná vsádzka	1,0 Fe	Fe ₂ O _{3pl.}	1,429	0,429
Kovonosná vsádzka	1,5 Fe	Kvapky Fe	1,500	-
Celkove	9,140	Tr. pl.	5,576 10,636	7,066

Prepal prvkov podľa tabuľky činí **9,140 t**,

teda **množstvo vyrobenej ocele** = 100 t (kov. vs.) – 9,140 t (prepal) = **90,860 t** zo 100 t kov. vs.

Potrebné množstvo kyslíka na oxidáciu prvkov je 7,066 t

1.2 Podľa stupňa využitia kyslíka (95%)

$$7\,066 \text{ kg O}_2 \cdot (22,4 / 32) = 4946,323 \text{ m}^3 \text{ O}_2$$

ak máme 95% využitie kyslíka do procesu ho musíme pridať oproti požadovanej hodnote o 5 % viacej:

$$4946,323 / 0,95 = 5206,656 \text{ m}^3 \text{ O}_2$$

1.3 Podľa čistoty kyslíka (99,7%)

ak máme 99,7% čistotu kyslíka do procesu ho musíme pridať oproti požadovanej hodnote o 0,3 % viacej:

$$5\,206,656 / 0,997 = 5\,222,323 \text{ m}^3 \text{ technicky čistého kyslíka}$$

$$100 \% \text{ technicky čistého kyslíka} = 99,7 \% \text{ O}_2 + 0,3 \% \text{ N}_2$$

$$5222,323 \text{ m}^3 \text{ technicky čistého kyslíka} = 5206,656 \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 15,667 \text{ m}^3 \text{ N}_2$$

$$5\,206,656 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \times (32/22,4) = 7438,080 \text{ kg O}_2$$

$$15,667 \text{ m}^3 \text{ N}_2 \times (28/22,4) = 19,584 \text{ kg N}_2$$

$$\mathbf{7457,7 \text{ kg} = 7,458 \text{ t technicky čistého kyslíka}}$$

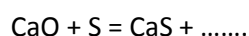
2. Výpočet spotreby vápna:

2.1. Množstvo CaO na požadovanú bazicitu trosky

$$B = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 3,0$$

$$\text{CaO} = B \times (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 3,0 (1,114 + 0,327) = \mathbf{3,246 \text{ t CaO na požadovanú bazicitu trosky}}$$

2.2. Množstvo CaO na viazanie S



$$0,018 \text{ t S} \times (56/32) = \mathbf{0,00458 \text{ t CaO na viazanie S}}$$

2.3. Množstvo CaO prineseného vápencom (uvažovať v.z., $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

do procesu je potrebné pridať 1 t vápenca - zadanie

$$\text{VZV} = \text{CaO} - (\text{B} \times \text{SiO}_2)$$

$$\text{VZV} = 50 - (3 \times 1,2) = 46,4 \%$$

do procesu je nutné pridať 1 t vápenca t.z. **0,464 t CaO**

2.4. Množstvo CaO z výmurovky (opotrebenie 2%)

$$2 \times 0,02 = \mathbf{0,406 \text{ t CaO}}$$
 z výmurovky

2.5. Celkové potrebné množstvo CaO (podľa 2.1 – 2.4) prepočítať na potrebné množstvo vápna s uvažovaním voľných zásad vápna (ako $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

Celkové potrebné množstvo CaO = CaO na baz. + CaO na viaz. S – CaO z vápenca – CaO z vým.

$$\text{Celkové potrebné množstvo CaO} = 3,246 \text{ t} + 0,00468 \text{ t} - 0,464 \text{ t} - 0,406 \text{ t}$$

$$\text{Celkové potrebné množstvo CaO} = \mathbf{2,381 \text{ t}}$$

voľné zásady vápna:

$$\text{VZV} = \text{CaO} - (\text{B} \times \text{SiO}_2)$$

$$\text{VZV} = 96,0 - (3 \times 1,3) = 92,1 \%$$
 voľného CaO

$$2,381 / 0,921 = \mathbf{2,585 \text{ t vápna}}$$
 (ktoré donesie 2,381 t voľného CaO)

3. Výpočet jednotlivých zložiek prinášaných vápencom, vápnom, výmurovkou

Tab. 15 Zložky prinesené výmurovkou, vápnom, vápencom

Zložka	Množstvo jednotlivých zložiek [t]		
	Z výmurovky	Z vápenca	Z vápna
SiO ₂	0,04	0,012	0,034
CaO	0,406	0,5	2,481
Al ₂ O ₃	0,04	0,003	0,016
MgO	1,28	0,45	0,052
CO ₂	-	0,431	0,090
Fe ₂ O ₃	0,128	-	-
Spolu	1,894	1,396	2,673

vápenec CO₂: 431 kg x (22,4 / 44) = 219,418m³

vápno CO₂: 90 kg x (22,4 / 44) = 46,055 m³

4. Výpočet množstva a zloženia trosky

Tab. 16 Množstvo a zloženie trosky

Zložka	Množstvo zložky z jednotlivých materiálov [t]				Spolu	
	z oxid.vs.	z vápna	z vápenca	z výmurovky	[t]	[%]
SiO ₂	0,983	0,034	0,012	0,040	1,069	9,702
CaO	-	2,481	0,5	0,406	3,387	30,749
Al ₂ O ₃	-	0,016	0,003	0,040	0,059	0,531
MgO	-	0,052	0,45	1,280	1,782	16,174
CaS	0,006	-	-	-	0,006	0,055
P ₂ O ₅	0,099	-	-	-	0,099	0,897
FeO	2,0570	-	-	-	2,0570	18,674
Fe ₂ O ₃	0,5710	-	-	0,128	0,699	6,349
MnO	0,352	-	-	-	-	-
MnO z MnS	0,006	-	-	-	-	-
MnO Σ	0,358	-	-	-	0,358	3,252
Kvapky Fe	1,5000	-	-	-	1,5000	13,617
Celkové množstvo trosky					11,016	100,00

5. Kontrola zásaditosti trosky

$$B = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 30,749 / (9,702 + 0,897) = 2,90$$

bolo by nutné pridať CaO a prepočet upresniť, aby bola dosiahnutá bazicita 3

6. Výpočet množstva a zloženia konvertorového plynu a prachu

$$\text{CO}_2 \text{ z C: } 565,797 \text{ kg} \times (22,4 / 44) = 288,042 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$$

$$\text{CO z C: } 8641,256 \text{ kg} \times (22,4 / 28) = 6913,005 \text{ m}^3 \text{ CO}$$

z fúkaného kyslíka do konvertorového plynu odchádza kyslík a dusík:

$$\text{N}_2: 15,667 \text{ m}^3 \text{ N} - \text{čo odpovedá čistote } 99,7 \% (0,3 \% \text{ dusíka do konvertorového plynu)}$$

$$\text{O}_2: 5206,656 - 4946,323 = 260,333 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \text{čo odpovedá } 95 \% \text{ využitiu kyslíka (5\% kyslíka do konvertorového plynu)}$$

$$\text{SO}_2: \text{do plynu } 0,001 \text{ t SO}_2 \dots 4 \text{ kg} \times (22,4 / 64) = 1,4 \text{ m}^3 \text{ SO}_2$$

Tabuľka č.6 Množstvo a zloženie konvertorového plynu

Tab. 17 Množstvo a zloženie konvertorového plynu

Zložka	Prechod z jednotlivých materiálov [m ³]				Spolu	
	z oxidácie	z vápna	z vápenca	z fúk. kyslíka	[m ³]	[obj.%]
CO ₂	288,042	46,0551	219,4182	-	553,515	7,15
CO	6913,005	-	-	-	6913,0	89,28
N ₂	-	-	-	15,667	15,667	0,20
O ₂	-	-	-	260,333	260,333	3,36
SO ₂	0,208	-	-	-	0,208	0,003
Celkové množstvo plynu [m³]					7742,728	100,00

$$\text{CO}_2 : 553,515 \text{ m}^3 \times (44 / 22,4) = 1087 \text{ kg CO}_2$$

$$\text{CO} : 6913 \text{ m}^3 \times (28 / 22,4) = 8641 \text{ kg CO}$$

$$\text{N}_2: 15,667 \text{ m}^3 \times (28 / 22,4) = 20 \text{ kg N}_2$$

$$\text{O}_2: 260,33 \text{ m}^3 \times (32 / 22,4) = 372 \text{ kg O}_2$$

$$\text{SO}_2: 0,208 \text{ m}^3 \times (64 / 22,4) = 1 \text{ kg SO}_2$$

celkové množstvo konvertorového plynu v kg = 10121 = 10,121 t

Celkové množstvo konvertorového prachu:100 t konver. prachu 82 t Fe₂O₃X t konver. prachu 1,429 t Fe₂O₃

.....

Celkové množstvo konvertorového prachu je **1,742 t** na 100 t kovonosnej vsádzky

7. Materiálová bilancia

Tab. 18 Materiálová bilancia

DODANÉ	t	ZÍSKANÉ	t
Surové železo	86,0	Oceľ	90,860
Šrot	13,731	Troska	11,016
Vápenec	0,130	Konvertorový plyn	10,121
Vápno	2,585	Konvertorový prach	1,742
Výmurovka	2,000		
t.č.kyslík	7,458		
Spolu	112,172		113,739

Rozdiel: získané – dodané = 1,566 t čo predstavuje cca 1,396 % chybu [1,2,3,4,5].

16. Výpočet tepelnej bilancie pre kyslíkový konvertor o hmotnosti 100 t

Teoretická časť:

Tepelná bilancia akéhokoľvek tepelného agregátu alebo sústavy predstavuje rovnosť medzi množstvom **prinášaného** a **spotrebovaného** tepla. Deje sa to na základe zákona o zachovaní energie, ktoré sa určuje podľa rôznych tepelných ukazovateľov daného agregátu alebo sústavy.

Tepelná bilancia LD – konvertora, na rozdiel od iných agregátov, nepotrebuje tepelnú energiu zvonku. Tepelná bilancia je potrebná pre analýzu efektivity tepelnej energie a pre ďalšie zdokonaľovanie a vývoj LD - konvertorového pochodu [12][13][14][15].

Výpočet tepelnej bilancie na 100 t kovonosnej vsádzky

Potrebné vstupné údaje pre samotný výpočet tepelnej bilancie.

Tab. 19 Základné údaje – kovonosná vsádzka

Surovina	Teplota [°C]	Obsah prvkov [%]				
		C	Mn	Si	P	S
Surové železo	1335	4,5	0,4	0,5	s0,065	0,002
Šrot	25	0,15	0,6	0,2	0,015	0,02
Oceľ	X	0,045	0,15	0	0,015	0,0015

Tab. 20 Zloženie troskotvorných prísad a ostatných materiálov

Materiál	Obsah zložiek [hmot.%]					
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	CO ₂
Vápno	1,3	-	96,0	0,6	2	3,5
Vápenec	1,2	-	50	0,3	45	43,1
Konvertorový prach	3,5	82	2,5	-	-	-
Výmurovka	2	6.4	20,3	2,0	64	-

Pomer surového železa a šrotu je **86% : 14%**.

Z celkového množstva C sa spaľuje **96% na CO a 4% na CO₂**.

Čistota kyslíka je 99,7% O₂, využitie kyslíka je 95%.

Straty železa:

- 2% hmotnosti kovonosnej vsádzky sa oxiduje a prechádza do trosky,
- z toho **1,6% ako FeO a 0,4% ako Fe₂O₃**,
- **1,5%** hmotnosti kovonosnej vsádzky sa viaže vo forme **kvapiek v troske ako kovové Fe**,

- 1% hmotnosti kovonosnej vsádzky prechádza do konvertorového plynu (prachu) ako Fe_2O_3 .

Výmurovka:

2% hmotnosti kovonosnej vsádzky (to odpovedá opotrebeniu výmurovky cca 120 taviieb za kampaň) výmurovka prechádza do trosky.

Síra:

- ako MnS a po prechode ako CaS prechádza do trosky,
- v plynnej forme sa odstráni v množstve 10% (na SO_2).

Spotreba vápenca: 1,31 na 100t kovonosnej vsádzky.

Zásaditosť trosky: $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 3,0$

Atómové hmotnosti prvkov (g/mol): Fe – 55,8, Mn - 55, P - 31, C - 12, Ca - 40, S - 32, Si - 28, O - 16

Postup výpočtu:

1. Výpočet fyzikálneho tepla surového železa, Q_1
2. Výpočet tepla exotermických reakcií, Q_2
3. Výpočet tepla tvorby trosky, Q_3
 - 3.1 Výpočet celkového privádzaného tepla, $Q_{\text{prich}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$
4. Výpočet fyzikálneho tepla ocele, Q_4
5. Výpočet fyzikálneho tepla trosky, Q_5
6. Výpočet tepla odnášaného plynmi, Q_6
7. Výpočet tepla spotrebovaného na rozklad vápenca, Q_7
8. Výpočet tepla odnášaného prachom vo forme Fe_2O_3 , Q_8
9. Straty tepla, Q_9
10. Celkové spotrebované teplo, $Q_{\text{spot}} = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$
11. Výpočet teploty vyrobenej ocele, X

Tepelná bilancia – pri výpočte sa vychádza z výsledkov materiálovej bilancie

Výpočet pre 100 t kovonosnej vsádzky:**1. Fyzikálne teplo surového železa**

$$Q_1 = G \cdot C_s T_t + Q_t + C_1(T - T_t) \quad [\text{kJ}]$$

G – podiel surového železa vo vsádzke: **voliteľná hodnota v materiálovej bilancii** [kg]

C_s – tepelná kapacita tuhého surového železa: **0,745** [kJ.kg⁻¹.grad⁻¹]

C_1 – tepelná kapacita tekutého surového železa: **0,837** [kJ.kg⁻¹.grad⁻¹]

Q_t – latentné teplo tavenia surového železa: **217,714**[kJ.kg⁻¹]

T – teplota tekutého surového železa: **voliteľná hodnota**[°C]

T_t – teplota tavenia surového železa: **1200** [°C]

$$Q_1 = 86\,000 ((0.745 \times 1200) + 217.714 + 0.837 (1335 - 1200)) = 105\,654\,476 \text{ kJ}$$

2. Teplo exotermických reakcií

$$Q_2 = Q_R \cdot m_i \quad [\text{kJ}]$$

Q_R – tepelné zafarbenie reakcie: **konštanta pre danú reakciu** [kJ.kg⁻¹]

m_i – hmotnosť reagujúceho prvku: **vypočítané v materiálovej bilancii**, Tab. 14[kg]

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 \quad m_{\text{C}} \cdot 34\,069,62 = Q_{\text{CO}_2}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} \quad m_{\text{C}} \cdot 10\,458,63 = Q_{\text{CO}}$$

$$\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 \quad m_{\text{Si}} \cdot 31\,078,62 = Q_{\text{SiO}_2}$$

$$\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \quad m_{\text{P}} \cdot 24\,986,82 = Q_{\text{P}_2\text{O}_5}$$

$$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} \quad m_{\text{Mn}} \cdot 7\,360,39 = Q_{\text{MnO}}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}_{\text{tr}} \quad m_{\text{Fe}} \cdot 4\,814,82 = Q_{\text{FeO}_{\text{tr}}}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{tr}} \quad m_{\text{Fe}} \cdot 7\,360,39 = Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{tr}}}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{pl}} \quad m_{\text{Fe}} \cdot 7\,360,39 = Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{pl}}}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 \quad 154 \cdot 34\,069,62 = 5\,257\,219,642$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} \quad 3\,703 \cdot 10\,458,63 = 38\,732\,441,44$$

$$\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 \quad 458 \cdot 31\,078,62 = 14\,259\,092,61$$

$$\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \quad 43 \cdot 24\,986,82 = 1\,077\,794,26$$

$$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} \quad 278 \cdot 7\,360,39 = 2\,042\,227,866$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}_{\text{tr}} \quad 1\,600 \cdot 4\,814,82 = 7\,703\,712,00$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{tr}} \quad 400 \cdot 7\,360,39 = 2\,944\,156,00$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{pl}} \quad 1000 \cdot 7360,39 = 7\,360\,900,00$$

$$Q_2 = 79\,377\,034,12 \text{ kJ}$$

3. Teplo tvorby trosky

$$Q_3 = Q_{R \text{ SiO}_2} \cdot m_{i \text{ Si}} + Q_{R \text{ P}_2\text{O}_5} \cdot m_{i \text{ P}} \quad [\text{kJ}]$$

$Q_{R \text{ SiO}_2}$ – tepelné zafarbenie reakcie vzniku SiO_2 : **2 319,49** [kJ.kg⁻¹]

$m_{i \text{ Si}}$ – hmotnosť reagujúceho Si: **vypočítané v materiálovej bilancii**, Tab. 14 [kg]

$Q_{R \text{ P}_2\text{O}_5}$ – tepelné zafarbenie reakcie vzniku P_2O_5 : **4 739,46** [kJ.kg⁻¹]

$m_{i \text{ P}}$ – hmotnosť reagujúceho P: **vypočítané v materiálovej bilancii**, Tab. 14 [kg]

$$\text{SiO}_2 \rightarrow \text{kremičitan} \quad 2\,319,49 \cdot 458 = 1\,064\,198,562$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{fosforečnan} \quad 4\,739,46 \cdot 43 = 204\,434,344$$

$$Q_3 = 1\,268\,632,907 \text{ kJ}$$

3.1 Celkové prichádzajúce teplo

$$Q_{\text{prich}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad [\text{kJ}]$$

$$Q_{\text{prich}} = \mathbf{186\,300\,143,0 \text{ kJ}}$$

4. Fyzikálne teplo ocele

$$Q_4 = G_o \cdot / C_{s_o} T_{to} + Q_{to} + C_{l_o}(T_o - T_{to}) / \quad [kJ]$$

G_o – podiel ocele vo vsádzke: **voliteľná hodnota v materiálovej bilancii** [kg]

C_{s_o} – tepelná kapacita tuhej ocele: **0,699** [kJ.kg⁻¹.grad⁻¹]

C_{l_o} – tepelná kapacita tekutej ocele: **0,837** [kJ.kg⁻¹.grad⁻¹]

Q_{to} – latentné teplo tavenia ocele: **272,16** [kJ.kg⁻¹]

T_o – teplota tekutej ocele: **vypočíta sa v tejto bilancii X** [°C]

T_{to} – teplota tavenia ocele: **1500** [°C]

$$Q_4 = 90\,860 (0,699 \times 1500 + 272,16 + 0,837 (X - 1500))$$

5. Fyzikálne teplo trosky

$$Q_5 = G_{trosky} (C_{s_{trosky}} \cdot T_{t_{trosky}} + Q_{trosky})$$

G_{trosky} – množstvo trosky: **vypočítané v materiálovej bilancii**, Tab. 16 [kg]

$C_{s_{trosky}}$ – tepelná kapacita tekutej trosky: 1.248 [kJ.kg⁻¹.grad⁻¹]

$T_{t_{trosky}}$ – teplota tavenia trosky: 1600 [°C]

Q_{trosky} – latentné teplo tavenia trosky: 209,35 [kJ.kg⁻¹]

$$Q_5 = 11\,016 / 1,248 \cdot 1\,600 + 209,35 / = 24\,302\,815,35 \text{ kJ}$$

6. Teplo odnášané plynmi

$$Q_6 = Q_{CO_2} + Q_{CO} + Q_{N_2} + Q_{O_2}$$

$$Q_{pl} = Q_{Rpl} \cdot m_{pl}$$

kde Q_{Rpl} – latentné teplo [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$]

m_{pl} – množstvo plynu [kg]

$$Q_{CO_2} = Q_{CO_2} \cdot m_{CO_2} = 3\,408,22 \cdot m_{CO_2}$$

$$Q_{CO} = Q_{CO} \cdot m_{CO} = 5\,932 \cdot m_{CO}$$

$$Q_{N_2} = Q_{N_2} \cdot m_{N_2} = 2\,210,74 \cdot m_{N_2}$$

$$Q_{O_2} = Q_{O_2} \cdot m_{O_2} = 2\,089,31 \cdot m_{O_2}$$

$$CO_2 \quad 3\,408,22 \cdot 1\,087 = 3\,705\,627,546$$

$$CO \quad 2\,118,62 \cdot 8\,641 = 18\,307\,537,27$$

$$O_2 \quad 2\,210,74 \cdot 372 = 822\,183,079$$

$$N_2 \quad 2\,089,31 \cdot 20 = 40\,916,445$$

$$Q_6 = 22\,876\,264,34 \text{ kJ}$$

7. Rozklad vápenca

$$Q_7 = Q_{R\text{ váp}} \cdot m_{\text{ váp}} \cdot m_{CaCO_3}$$

$Q_{R\text{ váp}}$ – latentné teplo reakcie rozkladu vápenca: $4\,044,64 \text{ [kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$

$m_{\text{ váp}}$ – hmotnosť vápenca *voliteľná hodnota v materiálovej bilancii* [kg]

m_{CaCO_3} – % podiel $CaCO_3$ vo vápenci : 100, *voliteľná hodnota v materiálovej bilancii*

$$Q_7 = 4\,044,64 \cdot 130 \cdot 0,931 = 489\,522,78 \text{ kJ}$$

8. Častice Fe_2O_3 odnášajú teplo

$$Q_8 = 4\,270,74 \text{ kJ}$$

9. Straty tepla 3,8 % z prichádzajúceho tepla

$$Q_9 = Q_{prich} \cdot 0,038 = 7\,079\,405,434 \text{ kJ}$$

10. Spotrebované teplo sa rovná:

$$Q_{\text{spot}} = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$$

$$Q_{\text{spotr.}} = \dots\dots\dots \text{ kJ}$$

11. Teplota vyrobenej ocele X:

$$Q_4 = 90\,860 (0,699 \times 1500 + 272,16 + 0,837 (X - 1500))$$

$$Q_{\text{prich}} = Q_{\text{spotr}}$$

$$Q_{\text{prich}} = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$$

$$Q_{\text{prich}} - Q_5 - Q_6 - Q_7 - Q_8 - Q_9 = Q_4$$

$$Q_{\text{prich}} - Q_5 - Q_6 - Q_7 - Q_8 - Q_9 = 90\,860 (0,699 \times 1500 + 272,16 + 0,837 (X - 1500))$$

$$X = (Q_{\text{prich}} - (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9) - (0,699 * 1\,500 * 90\,860) - (90\,860 * 272,16) - (0,837 * (-1500) * 90\,860)) / (0,837 * 90\,860)$$

X=1651,9 °C - Vypočítaná teplota tekutej ocele

4. Fyzikálne teplo ocele

$$Q_4 = 90\,860 (0,699 \times 1500 + 272,16 + 0,837 (1651,9 - 1500)) = 131\,547\,864,4 \text{ kJ}$$

Tab. 21 Tepelná bilancia

Privedené teplo	<i>kJ</i>	Spotrebované teplo	<i>kJ</i>
Q_1 . Fyzikálne teplo surového železa	105 654 476	Q_5 - Fyzikálne teplo trosky	24 302 815,35
Q_2 . Teplo exotermických reakcií	79 377 034,12	Q_6 - Teplo odnášané plynmi	22 876 264,34
Q_3 . Teplo tvorby trosky	1 268 632,907	Q_7 - Rozklad vápenca	489522,78
		Q_8 - Častice Fe_2O_3 odnášajú teplo	4270,74
		Q_9 - Straty tepla 3,8 % z prichádzajúceho tepla	7 079 405,43
		Q_4 - Fyzikálne teplo ocele	131 547 864,4
Spolu	186 300 143,0	Spolu	186 300 143,0

19. Simulácia mimopecného spracovania ocele

Teoretická časť

Procesy mimopecného spracovania ocele (ďalej len MPO) začínajú už v priebehu odpichu a môžu byť spojené s pozitívnymi aj negatívnymi efektmi. Popri prebiehajúcej dezoxidácii, legovaní a odsírení dochádza k naplyňovaniu, vyššej nehomogenite kúpeľa a znečisťovaniu vonkajšími nečistotami. Základ MPO sa realizuje v panve, a preto MPO nazývame aj panvová metalurgia.

Niekedy týmto procesom hovoríme sekundárna metalurgia.

Základným technologickým prvkom, v ktorom procesy MPO prebiehajú, je odlievacia panva.

Medzi úlohy MPO obvykle patrí:

- Ohrev, prípadne ochladzovanie kovu,
- Prívádzanie inertných alebo rafinačných plynov,
- Prívod rôznych rafinačných médií v pevnom alebo kvapalnom stave s cieľom upraviť chemické zloženie a regulovať teploty,
- Zvýšenie mikročistoty a zabezpečenie chemickej a tepelnej homogenity tak,

Rozdelenie postupov sekundárnej metalurgie podľa miesta a pracovného tlaku:

Podľa miesta možno postupy sekundárnej metalurgie rozdeliť na :

- Postupy prebiehajúce v konvertore.
- Postupy realizované v liacej panve.

Podľa tlaku nad hladinou ocele sa delia na :

- Technologické postupy pri zníženom tlaku – vákuovanie.
- Technologické postupy – metódy aplikované pri atmosférickom tlaku.
- Technologické postupy pri zvýšenom tlaku.

Základné rozdelenie postupov sekundárnej metalurgie podľa spôsobu agitácie taveniny:

- S využitím energie prúdu taveniny pri odpichu ocele z taviaceho agregátu:
 - Dezoxidácia, legovanie, odsírenie ocele syntetickou troskou pridávanou na hladinu ocele v LP pri odpichu tavby.
- Fúkanie inertného plynu (Ar, N) do taveniny tryskou zhora, alebo póreznou tvárnou cez dno liacej panvy (LP). Realizuje sa na oddelených špecializovaných pracoviskách MPO. Používa sa u všetkých uvedených metód, t.j. pri:
 - Dezoxidácii, legovaní, tepelnej a chemickej homogenizácii, odplynení, odsírení, odfosforení, znižovaní obsahu sprievodných prvkov, modifikácii vtrúsenín a príhrevu ocele.
- Injektáž prachových zmesí v prúde inertného plynu v špecializovaných zariadeniach s cieľom dezoxidácie, odsírovania, odfosforenia a modifikácie vtrúsenín. Zariadenia, ako aj postupy, sa odlišujú podľa druhu, resp. zloženia injektovanej zmesi.

- Injektáž drôtov plnených legúrami, alebo zmesami na odsírovanie a modifikáciu vtrúsenín v spojení s premiešavaním taveniny inertným plynom (Ar, N).
- Predúprava, MPO – kvalitatívna funkcia za čo najpriaznivejších podmienok, odľahčenie taviaceho agregátu od produkcie kovu (zvýšenie výrobnosti výrobnej jednotky).
- Orientácia na odsírenie, odkremičenie a odfosforenie, stabilizácia teploty.

Cieľ

Cieľom simulácie je upraviť odpichnutú oceľ z kyslíkového konvertora (ďalej len KK) do liacej panvy a uskutočniť jej premiestnenie do určeného zariadenia tak, aby upravená oceľ spĺňala určený čas na spracovanie s predpísaným chemickým zložením, teplotou a obsahom inklúzií.

Ďalej je potrebné minimalizovať náklady na mimopecné spracovanie.

Experimenálna časť

Možnosti simulácie

Pre koho je simulácia určená

Simulácia bola vyvinutá pre 2 skupiny: pre vysoké školy a pre oceliarsky priemysel.

1. Simulácia pre študentov:

Na tejto úrovni sa očakáva, že užívateľ bude pristupovať k problému vedecky, pričom využije vedomosti z termodynamiky a kinetiky, na základe ktorých sa bude rozhodovať o rôznych možnostiach spracovania.

2. Simulácia pre oceliarsky priemysel:

Na tejto úrovni sa očakáva vedecký prístup. Vyžaduje sa rýchle riešenie rôznych prevádzkových problémov.

Rýchlosť simulácie

Simulácia môže prebiehať pri rôznych rýchlostiach 1 – 64. Je možné ju meniť kedykoľvek, okrem prípadu, ak sa uskutočňuje naklápanie KK, pohyb žeriavu, panve atď., kedy sa rýchlosť automaticky nastaví na rýchlosť 8. Rýchlosť sa volí v ľavom hornom rohu obrazovky.

Požadovaná akosť ocele

V simulácii je možný výber 4 typov ocele, pre využitie rôznych spôsobov spracovania.

- **Konštrukčná oceľ** – nenáročná na spracovanie, pre začínajúcich užívateľov. Hlavnou úlohou je voľba správneho typu legujúcich prísad.

- **TiNb** - nízko uhlíková oceľ pre automobilový priemysel s obsahom C pod 0,0035 %. Hlavnou úlohou je správny výber jednotky pre mimopecné spracovanie ocele za účelom efektívneho zníženia prebytočného C.
- **Oceľ pre výrobu rúr (Linepipe steel)** - na distribúciu plynu, je veľmi náročná na úpravu, pretože vyžaduje nízky obsah nečistôt (S,P,H,O a N) a dostatočnú pevnosť a húževnatosť. Spracovanie tejto ocele pre skúsených užívateľov.
- Posledná oceľ označovaná ako **Engineering steel** má výraznejší obsah Cr a Mo a taktiež vyžaduje nízky obsah H.

V Tab. 22 je udané chemické zloženie dostupných ocelí v simulácii.

Tab. 22 Požadované chemické zloženie ocelí dostupných v simulácii

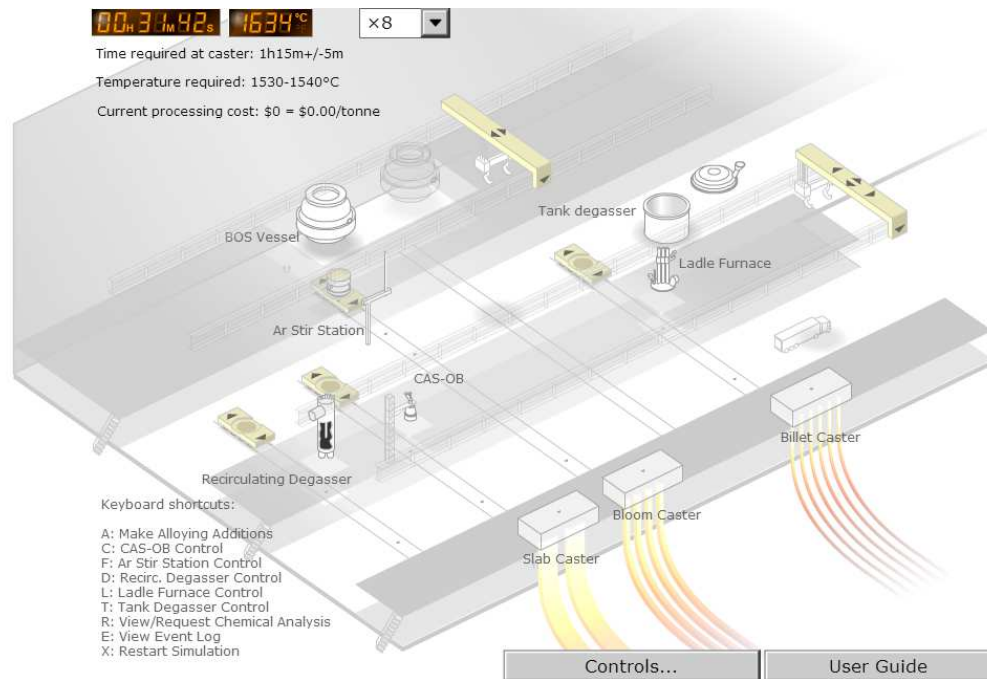
	Construction steel	TiNb ULC steel for car bodies	Linepipe steel	Engineering steel
C	0.1450	0.0030	0.0700	0.4150
Si	0.2000	0.2100	0.1800	0.4000
Mn	1.4000	0.7500	1.0500	0.7500
P	<0.0250	0.0650	<0.0120	0.0350
S	<0.0200	<0.0120	<0.0030	0.0350
Cr	<0.1000	<0.0500	<0.0600	1.0500
Al	0.0350	0.0450	0.0300	0.0225
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

Ďalšie možnosti simulácie

- Základnými ukazovateľmi je čas, teplota, chemické zloženie ocele a taktiež minimalizácia nákladov.
- Panva sa pohybuje od KK na transportnom vozidle.
- Prvou zastávkou je prefúkavanie ocele pomocou argónu, kde dochádza k tepelnej a chemickej homogenizácii ocele.
- Panva sa presúva pomocou žeriavov a dopravných vozov.

Usporiadanie závodu a jeho popis:

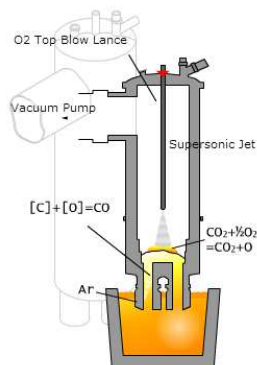
Na Obr. 27 je možné vidieť usporiadanie závodu mimopecného spracovania.



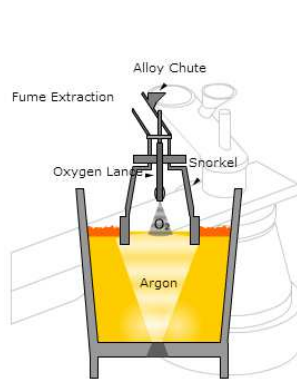
Obr. 27 Usporiadanie závodu MPO

Transportné vozidlá s liacimi panvami sa pohybujú po paralelných tratiach od KK až k zariadeniu na odlievanie. Simulácia disponuje dvoma žeriavmi na každom úseku spracovania. Prvý úsek je medzi jednotlivými zariadeniami MPO a druhý pri troch druhoch kontinuálneho odlievania (bramové, sochorové, blokové).

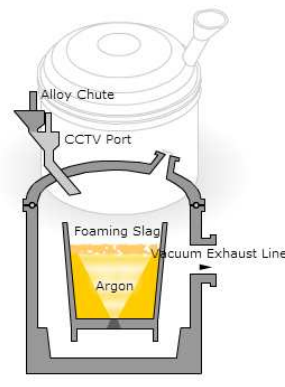
Zariadenia pre mimopecné spracovania sú: vákuové zariadenie RH (RH Degasser) Obr. 28, prebublávacia stanica (CSA-OB) Obr. 29, vákuové odplynenie (Tank Degasser) Obr. 30, panvová pec (Ladle Arc Furnace) Obr. 31 .



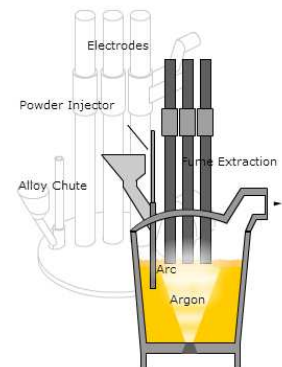
Obr. 28 RH Degasser



Obr. 29 CAS-OB



Obr. 30 Tank Degasser



Obr. 31 Ladle Arc Furnace

Tab. 23 Súhrn rôznych procesov spracovania mimopecného spracovania ocele.

Zariadenie	Odplynenie	Zohrievanie	Rafinácia
RH Degasser	Odstránenie C, O, H (plus N ak je nízky O a S)	Fúkanie Al+O ₂	
Tank Degasser	Odstránenie C, O, H (plus N ak je nízky O a S)		
CAS-OB		Fúkanie Al+O ₂	Pridanie prísad v inertnej atmosfére argónu
Ladle Arc Furnace		Elektricky	

Ovládanie simulácie

Panvy

Každá panva sa pohybuje uložená na vozíku po koľajniciach pozdĺž svojej dráhy kliknutím na šípky. Pohyb sa automaticky ukončí v nastavených bodoch.

Žeriavy

Pre uľahčenie ovládania vrhá každý žeriav tieň. Šípky umiestnené na žeriavoch sa používajú pre ich pohyb.

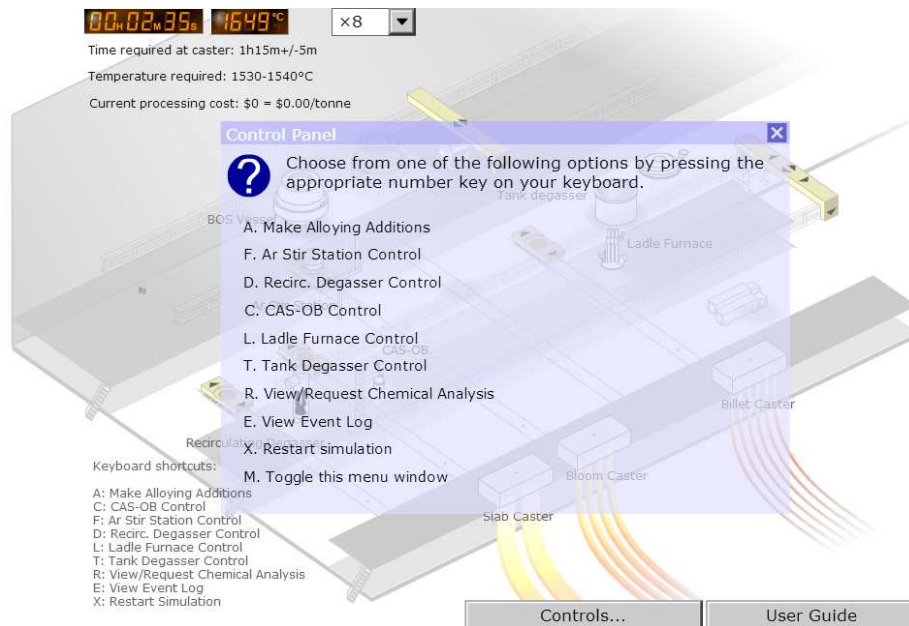
- Šípky 1 a 2 pre pohyb žeriavu hore a dole.

Žeriav sa zastaví automaticky v zadaných bodoch pozdĺž žeriavovej dráhy.

- Šípky 3 a 4 pre pohyb žeriavov pozdĺž svojej dĺžky. Toto je potrebné iba pre žeriav k plynulému odlievaniu.
- Šípka 5 slúži na zdvihnutie alebo polozenie panvy na pojazdny vozík.

Ovládací panel

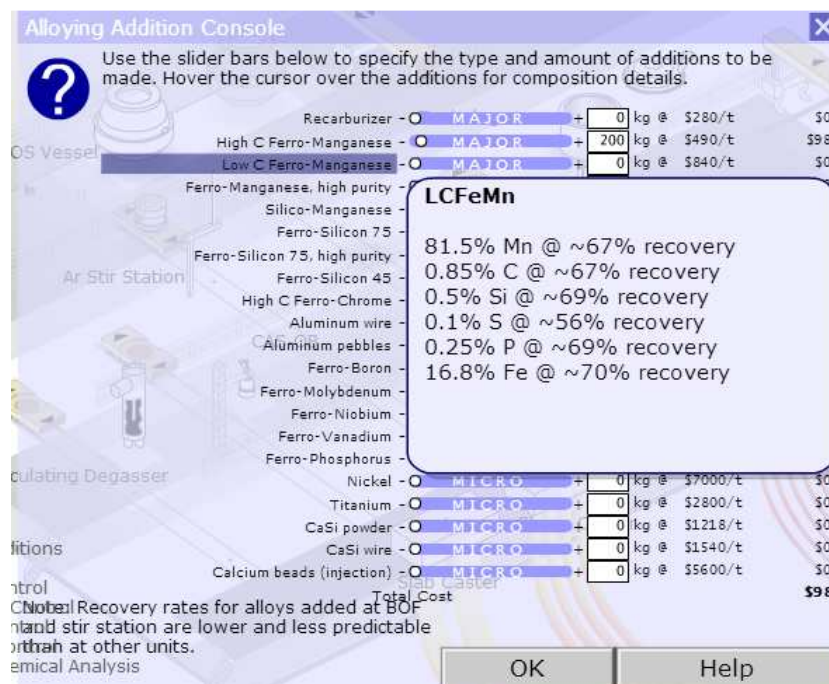
- Ako náhle začne simulácia, môžete ovládať jednotlivé hutnícke zariadenia cez ovládacie panely (Obr. 32).



Obr. 32 Ovládací panel

Pridávanie prísad

- Rôzne prísady môžu byť pridané do panvy pomocou "Alloying Addition Console" Obr. 33.
- Množstvo každej prísady je nastavené na nulu. Pri zvolení množstva sa zobrazia náklady na použitie prísady.
- Prísady sa delia na "hlavné" a "mikro" prísady (Obr. 33). Hlavné prísady sú feromangán a ferossilícium, môžu byť pridané v množstvách až do 5000 kg. Mikro prísady zahŕňajú hliník, chróm, nikel, feroniób, atď., a môžu byť pridané až do hmotnosti 500 kg.



Obr. 33 Dostupné prísady s chemickým zložením a cena za tonu prísady

Fúkanie argónu

Keď sa panva dopraví do argónovacej stanice, automaticky sa otvorí okno umožňujúce ovládať rýchlosť prietoku Ar a zobrazia sa náklady na argónovanie.

- \$ 0,60 za $N.m^3$ pre Ar (t. j. 1 minúta pri $1,0 N.m^3 \cdot min^{-1}$ bude stáť 0,60 dolárov).

Fúkanie kyslíka

Keď sa panva dopraví do požadovanej stanice, automaticky sa otvorí okno umožňujúce ovládať rýchlosť prietoku kyslíka a zobrazia sa náklady.

Chemická analýza

(Stlačením tlačidla **R** na klávesnici)

Analýzu je možné si pozrieť kedykoľvek stlačením tlačidla R. Analýza stojí \$ 40 a výsledky sa zobrazia do cca 3 minút, napr., aby sa získala analýza o 22 reálnych sekúnd, rýchlosť simulácie musí byť nastavená na hodnotu x 8.

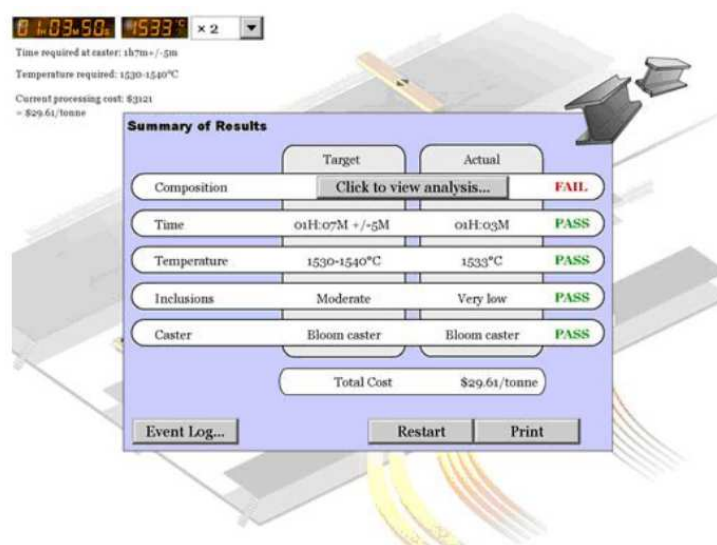
Protokol udalostí

(Stlačením tlačidla **E** na klávesnici)

Protokol udalostí udržuje chronologické záznamy o všetkých hlavných krokoch spracovania, vrátane pridávania prísad. To je užitočné pre sledovanie všetkých postupov v priebehu simulácie a tiež pri analýze výsledkov na konci mimopecného spracovania.

Simulačné výsledky

Ako náhle položíme panvu na odlievacie zariadenie simulácia končí a zobrazia sa výsledky simulácie spolu s celkovými prevádzkovými nákladmi prepočítaných na tonu ocele (Obr. 34).



Obr. 34 Výsledný protokol

Plánovanie programu

Pred začatím simulácie je dôležité naplánovať si, čo a ako sa bude robiť. Prvá vec, ktorú je nutné spraviť, je porovnať zloženie ocele a teplotu odpichu s hodnotami požadovanými pre odlievanie. Ďalším bodom je určiť spôsob, ako dosiahnuť tieto hodnoty v požadovanom čase.

Tab. 24 Príklad zloženia ocele pri odpichu a požadovaného zloženia ocele (hmot. %).

	Tap / wt%	Aim / wt%	Difference / wt%
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
Temperature	1650°C	1535°C	-115°C

Z Tab. 24 vyplýva, že obsah C, Mn, Si, a Al sa musí zvýšiť, zatiaľ čo obsah O je nutné znížiť. Aby bolo splnené požadované zloženie, je potrebné pridať niektoré prísady.

Zloženie

Kľúčové otázky, na ktoré je potrebné odpovedať:

1. Ktorá prísada môže byť použitá pre dosiahnutie tohto cieľa?
2. Aké množstvo danej prísady bude potrebné (v kg)?
3. Bude táto prísada ovplyvňovať ostatné prvky, a ak áno, ako?
4. Kde a kedy treba vykonať prídanie danej prísady?
5. Ako bude prídavok prísady ovplyvňovať cenu, teplotu a čistotu ocele?

Pre ďalšiu pomoc pri výpočte prídania prísad Tab. 25 pozri kapitolu "Výpočet prísad pre dosiahnutie požadovaného zloženia".

Tab. 25 Zloženie a cena dostupných prísad

Additive	Composition	Cost per tonne
Recarburizer	98%C + Fe bal.	\$280
High C Ferro-Manganese	76.5%Mn, 6.7%C, 1%Si, 0.03%S, 0.3%P + Fe bal.	\$490
Low C Ferro-Manganese	81.5%Mn, 0.85%C, 0.5%Si, 0.1%S, 0.25%P + Fe bal.	\$840
Ferro-Manganese, high purity	49%Mn + Fe bal.	\$1820
SiMn	60%Mn, 30%Si, 0.5%C, 0.08%P, 0.08%S + Fe bal.	\$560
Ferro-Silicon 75	75%Si, 1.5%Al, 0.15%C, 0.5%Mn, 0.2%Ca + Fe bal.	\$770
Ferro-Silicon 75, high purity	75%Si, 0.06%Al, 0.2%Mn, 0.02%C + Fe bal.	\$840
Ferro-Silicon 45	45%Si, 2%Al, 0.2%C, 1%Mn, 0.5%Cr + Fe bal.	\$630
Aluminum wire	98%Al + Fe bal.	\$2100
Aluminum pebbles	98%Al + Fe bal.	\$1400
Ferro-Boron	20%B, 3%Si, 0.2%P + Fe bal.	\$3780
Ferro-Chrome	66.5%Cr, 6.4%C + Fe bal.	\$1260
Ferro-Molybdenum	70%Mo + Fe bal.	\$16800
Ferro-Niobium	63%Nb, 2%Al, 2%Si, 2%Ti, 0.2%C, 0.2%S, 0.2%P + Fe bal.	\$9800
Ferro-Vanadium	50%V + Fe bal.	\$8400
Ferro-Phosphorus	26%P, 1.5%Si + Fe bal.	\$630
Ferro-Sulphide	28%S + Fe bal.	\$700
Nickel	99%Ni + Fe bal.	\$7000
Titanium	99%Ti + Fe bal.	\$2800
CaSi powder	50%Ca, 50%Si	\$1218
CaSi wire	50%Ca, 50%Si	\$1540

Ďalšie prvky ako C, O, S, H, P a N bude potrebné odstrániť, pričom je nutné zodpovedať na tieto otázky :

1. Ktorý proces, alebo sled procesov, je najúčinnjší pre odstránenie týchto prvkov?
2. Aké sú hlavné premenné procesu (ako napr. chemické zloženie trosky a jej hmotnosť, fúkanie kyslíka atď.) a ako ovplyvnia odstránenie prvkov?
3. Má aktuálne zloženie a teplota ocele vplyv na kinetiku procesu, a ak áno, aký?

Teplota

Nato, aby panva dorazila na uzol ZPO so správnou teplotou, je dôležité počítať aj s účinkom rôznych procesov na teplotu ocele v panve.

1. Odpich: teplota ocele sa znižuje približne o 60°C počas odpichu.
2. Za normálnych podmienok, v prípade transportu panve alebo jej státia, teplota ocele klesá približne o 0,5 °C za min.
3. Tona prísad spôsobuje zníženie teploty ocele o 6 °C.
4. Dezoxidácia Al je vysoko exotermická. Každých 100 kg Al, ktoré zreagujú s kyslíkom, spôsobuje zvýšenie teploty o 12 °C.
5. Oceľ v panve je možné zohriať elektricky v panvovej peci (pri plnom výkone asi 3 °C za min.).

Výpočet teploty likvidu

Je nevyhnutné, aby sa zabránilo poklesu teploty kúpeľa pod teplotu likvidu, pri ktorej začína oceľ tuhnúť. Teplota likvidu závisí od zloženia a môže byť vypočítaná z nasledujúcej rovnice :

Pre $C < 0.5\%$:

$$T_{\text{lik.}} = 1537 - 73.1\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad (63)$$

Pre $C > 0.5\%$:

$$T_{\text{lik.}} = 1531 - 61.5\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad (64)$$

Výpočet prísad pre dosiahnutie požadovaného zloženia

Prísady sa pridávajú do panve za účelom:

1. Úpravy konečného zloženia ocele.
2. Dezoxidácie ocele.
3. Modifikácie vtrúsenín.

Výpočet prísad – prvkov

Množstvo prvku, ktoré je potrebné pridať do panve:

$$m_{\text{additive}} = \frac{\Delta\%X \times \text{ladle mass}}{100\%} \quad (65)$$

kde: m_{additive} – množstvo prvku,

$\Delta\%X$ – požadovaný obsah v hmot. % X ($\% X_{\text{konečný}} - \% X_{\text{súčasný}}$),

Ladle mass – objem ocele v panve.

Výpočet prísad - zliatin

V niektorých prípadoch je viac praktickejšie (ekonomickejšie) pridávať namiesto čistých prvkov zliatinu (prísada - zliatina dvoch a viacerých prvkov).

$$m_{\text{additive}} = \frac{100 \times \Delta\%X \times \text{ladle mass}}{\%X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X} \quad (66)$$

kde: m_{additive} – množstvo prísady,

Recovery rate of X – výťažnosť prvku X ,

$\Delta\%X$ – požadovaný obsah v hmot. % X ($\% X_{\text{konečný}} - \% X_{\text{súčasný}}$),

Ladle mass – objem ocele v panve,

% X in master alloy – obsah prvku X v prísade.

Zachytenie ostatných prvkov

Pri pridávaní hlavných prísad je dôležité mať na pamäti vplyv ostatných zložiek prísad na celkové zloženie ocele.

Množstvo zachytených prvkov sa dá určiť z nasledujúcej rovnice :

$$\Delta \%X = \frac{m_{additive} \times \%X \text{ in master alloy} \times \text{recovery rate of } X}{100 \times \text{ladle mass}} \quad (67)$$

kde: $m_{additive}$ – množstvo prísady,

Recovery rate of X – výťažnosť prvku X,

$\Delta \% X$ – požadovaný obsah v hmot. % X (% X_{konečný} - % X_{súčasný}),

Ladle mass – objem ocele v panve,

% X in master alloy – obsah prvku X v prísade.

Čas miešania

V procese simulácie je potrebné sa uistiť, že je dostatok času na rozpustenie pridávaných prísad a j nutné si uvedomiť, že :

1. Prísady, vo forme práškov, drôtov a jemných častíc, sa rozpúšťajú rýchlejšie ako hrubšie a väčšie častice, napr. tyče a pod.
2. Premiešavanie panve, napr. argónom, urýchľuje proces rozpúšťania a je tiež nevyhnutné pre homogenizáciu tekutej ocele.
3. Čas miešania sa zvyšuje so znižujúcou sa teplotou ocele.
4. Prísady, pridané pri nižšej teplote bez miešania, sa budú rozpúšťať dlhšie, čo má za následok nedostatočne homogenizovanú oceľ.

Dezoxidácia

Hliník je veľmi silný dezoxidačný prvok. Dezoxidácia Al prebieha podľa reakcie :



- Rovnovážna konštanta reakcie :

$$K_{Al-O} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_O^3 \cdot a_{Al}^2} \quad (69)$$

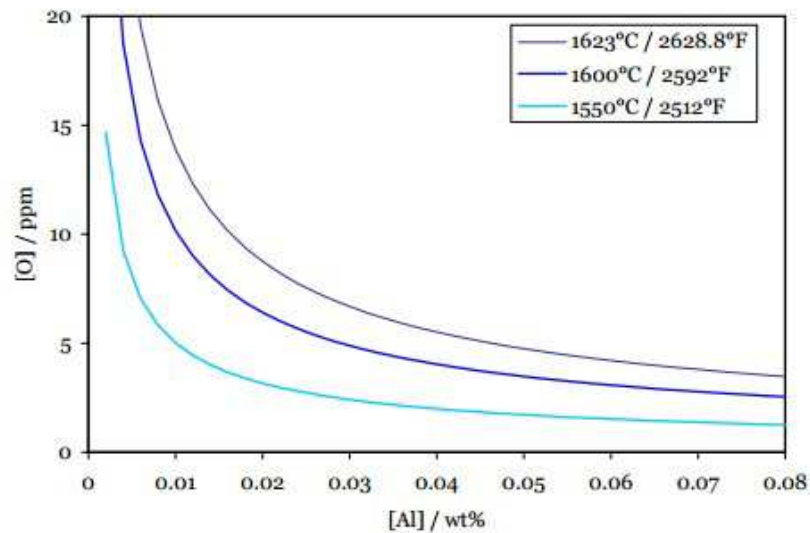
- Kde:

$$\log K_{Al-O} = \frac{62.780}{T[K]} - 20.5 \quad (70)$$

- Aktivita kyslíka :

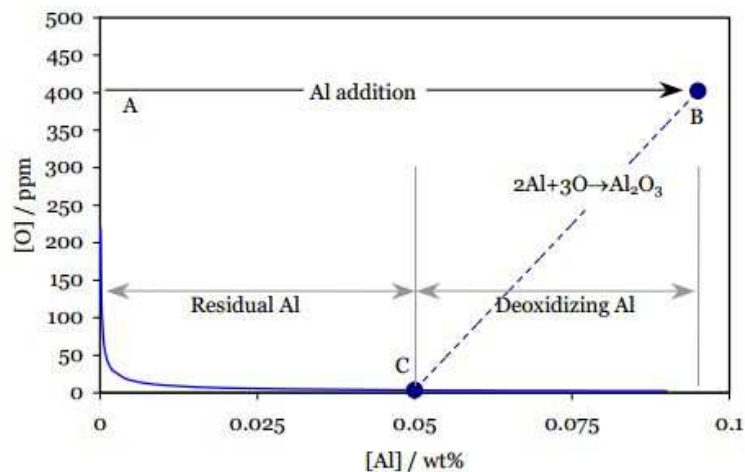
$$a_O = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 \cdot K_{Al-O}}} \quad (71)$$

Vzťah medzi a_O a a_{Al} je znázornený pre tri rôzne teploty na Obr. 35. Z Obr. 35 vyplýva, že dezoxidácia hliníkom je účinnejšia pri nižších teplotách.



Obr. 35 Al - O rovnovážne krivky pri troch rôznych teplotách

Výpočet prísady hliníka



Obr. 36 Výpočet prísady Al pri začiatočnej aktivite O

Bod A v diagrame – 400 ppm kyslíka bez prítomnosti Al

Bod B – prísada 0,095 % Al

Kedže tieto body sa nachádzajú vysoko nad rovnovážnou krivkou Al – O, Al a O reagujú za vzniku Al_2O_3 .

Bod C – predstavuje rovnovážne zloženie reakcie pri reakcii 2 atómov Al (54 hmot. %) a 3 atómov O (48 hmot. %)

Hmotnostné % Al potrebného na dezoxidáciu :

$$\%Al_{deox} \approx \frac{54}{48} [\%O]_{initial} \quad (72)$$

Po výpočte celkového množstva prísady Al, musí byť táto hodnota pridaná na dosiahnutie cieľového Al v oceli.

Príklad:

250 t ocele v panve s obsahom kyslíka 450 ppm (0,045%) má byť dezoxidované pri odpichu. Stupeň výťažnosti Al 60 %, potrebný Al 0,040 %, celkové množstvo Al v prísade 98 %.

Postup:

- Al pre dezoxidáciu zo vzťahu (71) – $(54/48) \times 0,045 \% = \mathbf{0,051 \%}$
- Prísada Al – $\mathbf{0,040 \%}$
- Celkové množstvo potrebného Al = $0,051 + 0,040 = \mathbf{0,091 \%}$
- Po dosadení do vzťahu (66)

Oduhličenie

Termodynamika oduhličenia

Oduhličenie prebieha podľa reakcie



Rovnovážna konštanta reakcie :

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C a_O} \quad (74)$$

Kinetika oduhličenia

Stupeň oduhličenia sa vypočíta podľa vzťahu :

$$\ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{equ}}{[\%C]_i - [\%C]_{equ}} \right\} = -k_C t \quad (75)$$

kde: $[\%C]_f$ = koncentrácia C po čase t (po oduhličení),

$[\%C]_i$ = počiatočná koncentrácia C,

$[\%C]_{equ}$ = rovnovážna koncentrácia C,

k_c = rovnovážna konštanta oduhličenia (min^{-1}).

Po úprave vzťahu (71) dostávame finálnu koncentráciu C:

$$[\%C]_f = [\%C]_{equ} + ([\%C]_i - [\%C]_{equ}) \exp(-k_c t) \quad (76)$$

Rovnovážna konštanta pre proces RH:

$$k_c = \frac{Q}{V_b \rho} \frac{q}{\rho + q} \quad (77)$$

kde: Q – stupeň cirkulácie ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$),

V_b – množstvo ocel. kúpeľa v panve (m^3),

ρ - hustota tekutej ocele $7200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

Q – objemový koeficient prenosu množstva ocele ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Odsírenie

Odsírenie prebieha podľa reakcie:



V praxi je možné odsírenie dosiahnuť :

- Pridaním syntetickej trosky obsahujúcej prevažne množstvo CaO.
- Dezoxidáciou ocele hliníkom, aby sa znížila aktivita kyslíka v oceli.
- Premiešaním ocele v kesóne za účelom dôkladného premiešania ocele a trosky.

Odsírenie syntetickou troskou

Na začiatku simulácie je možnosť pridania syntetickej trosky (majoritná zložka CaO). Je potrebné zadať množstvo syntetickej trosky. Čím viac trosky sa pridáva, tým viac S sa odstráni, ale je potrebné brať do úvahy aj cenu trosky.

Zadajte zloženie trosky, pomer medzi CaO a Al_2O_3 . Trosky s vyššou koncentráciou CaO mávajú vyšší rozdeľovací koeficient síry LS a sú preto účinnejšie pri odstránení S.

Teoreticky je rovnovážna koncentrácia S pre danú trosku určená vzťahom:

$$[\%S]_{equ} = [\%S]_0 \frac{\left(\frac{1}{L_S W_S}\right)}{1 + \left(\frac{1}{L_S W_S}\right)} \quad (79)$$

kde: $[\%S]_0$ = počiatočná koncentrácia S (hmot. %),

L_s = rozdeľovací koeficient S,

W_s = hmotnosť trosky (kg),

W_m = hmotnosť kovu (kg).

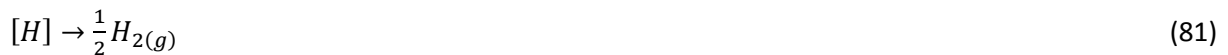
Rovnica (79) môže byť upravená podľa potrebného množstva trosky na dosiahnutie špecifickej koncentrácie S :

$$W_S = \left(\frac{W_m}{L_S} \right) \left(\frac{[\%S]_0 - [\%S]_{aim}}{[\%S]_{aim}} \right) \quad (80)$$

Odstránenie vodíka

Termodynamika odstránenia vodíka

Odstránenie H prebieha podľa reakcie:



kde:

$$\log \frac{[ppm H]}{(p_{H_2})^{\frac{1}{2}}} = -\frac{1,900}{T} + 2,423 \quad (82)$$

Tab. 26 Vzťah medzi rovnovážnou koncentráciou rozpusteného H a parciálnym tlakom H pri 1600 °C

p_{H_2}	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.10
0.01	2.56
0.001	0.81

Kinetika odstránenia vodíka

Kinetika odstránenia H je vyjadrená vzťahom:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f - [H]_{equ}}{[H]_i - [H]_{equ}} \right\} = -k_H t \quad (83)$$

kde: $[H]_f$ = koncentrácia H v čase t (ppm),

$[H]_i$ = počiatočná koncentrácia (ppm),

$[H]_{equ}$ = rovnovážna koncentrácia H (ppm),

K_H = rovnovážna konštanta odstránenia H (min^{-1}).

Finálna koncentrácia H vyjadrená zo vzťahu (84):

$$[H]_f = [H]_{equ} + ([H]_i - [H]_{equ}) \exp(-k_H t) \quad (84)$$

Elektrický ohrev

Energia E nutná pre zvýšenie teploty kúpeľa o Δt , za predpokladu, že 100% účinnosť je daná podľa vzťahu:

$$E = m C_p \Delta t \quad (85)$$

kde: m = hmotnosť kúpeľa,

C_p = merná tepelná kapacita pri konštantnom tlaku.

Teoretické zvýšenie teploty:

$$\Delta T_{th} = \frac{E}{m C_p} \quad (86)$$

Teoretická rýchlosť ohrevu:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{th} = \frac{dE}{dT} \frac{1}{m C_p} = \frac{P}{m C_p} \quad (87)$$

kde: P = vykurovací výkon.

Preto nárast teploty v čase Δt je daná vzťahom:

$$\Delta T_{th} = \frac{P \Delta t}{m C_p} \quad (88)$$

- Samozrejme, vykurovanie nie je 100% účinné, pretože vznikajú straty tepla na elektródach, do atmosféry, v panve, cez žiaruvzdorné materiály atď.
- η účinnosť je definovaná ako pomer skutočného a teoretického kúrenia.

$$\eta = \frac{\Delta T_{act}}{\Delta T_{th}} \quad (89)$$

Použitá literatúra

- [1] Šmrha, L., Chvojka, J., Kaňok, M.: Modelování a rozbor staženin u kruhových ingotů pro výrobu trub, Hutnické listy, Ročník XVIII, čís. 9
- [2] DE KOCK, D. J.: Optimal Tundish design methodology in a continuous casting process, Doctoral Thesis, University of Pretoria, Electronic theses and dissertations, 2002, [online], [cit. 2013-5-5]. Dostupné na internete: <<http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-10072005-095941/unrestricted/01thesis.pdf>>.
- [3] MICHALEK, K. a kol.: Zlepšování provozních parametrů sochorového ZPO úpravami vnitřního uspořádání mezipánve, Hutnické listy, č.7 - 8 (1999), str. 45 – 50
- [4] MICHALEK, K. a kol.: Optimalizace proudění lázně v mezipánvi zařízení pro plynulé lití sochorů v Třineckých železárnách, a.s., Hutnické listy, č.1 (1998), str. 3 – 8
- [5] *W.R. Irving: Continuous casting of steel, 1993*, ISBN-13: 978-0901716538
- [6] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://web.tuke.sk/hf-kmzaz/vovkk/image1/periodicka%20tabulka.html>
- [7] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/85706717/mathematical-model-thermal-material-balance-melting-oxygen-converter-criteria-optimization>
- [8] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: http://nptel.ac.in/courses/113104059/lecture_pdf/Lecture%2011.pdf
- [9] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=24&pageid=2081272092>
- [10] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://eprints.nmlindia.org/3051/1/200-210.PDF>
- [11] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://web.tuke.sk/hf-kmzaz/vovkk/index.html>
- [12] [7] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=24&pageid=2081272092>],
- [13] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/bos_userguide.pdf
- [14] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: <http://www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/The%20Basic%20Oxygen%20Steelmaking%20Process.aspx>
- [15] [online], [2014.22.08], Dostupné na internete: [http://web.tuke.sk/hf-kmzaz/vovkk/index.html].
- [16] J. Kijac: Oceliarenstvo Laboratórne cvičenie, Prvé vydanie, VŠT v Košiciach, 1983

KMŽaZ

Návody na cvičenia z predmetu oceliarstvo

NÁZOV: Oceliarstvo - cvičenia (Laboratórne a výpočtové cvičenia)

AUTORI: Buľko Branislav, Kijac Jozef, Demeter Peter

VYDAVATEĽ: Technická univerzita v Košiciach

ROK: 2014

VYDANIE: prvé

NÁKLAD: ? ks

ROZSAH: 90 strán

ISBN: 978-80-553-1785-4