

# ONLINE SIMULÁCIE VÝROBY, SPRACOVANIA A ODLIEVANIA OCELE NA PLATFORME STEELUNIVERSITY.ORG



2019

Návody na cvičenia

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
FAKULTA MATERIÁLOV, METALURGIE A RECYKLÁCIE  
ÚSTAV METALURIGE  
ODDELENE HUTNÍCTVA A ZLIEVARENSTVA

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH**

**FAKULTA MATERIÁLOV, METALURGIE A RECYKLÁCIE**

**ÚSTAV METALURIGE**

**ODDELENE HUTNÍCTVA A ZLIEVARENSTVA**

Ing. Peter Demeter, PhD., Doc. Ing. Branislav Bulko, PhD., Ing. Petra Demeterová, PhD.

## **ONLINE SIMULÁCIE VÝROBY, SPRACOVANIA A ODLIEVANIA OCELE NA PLATFORME STEELUNIVERSITY.ORG**

Návody na cvičenia

# Obsah

Zoznam obrázkov .....	5
Zoznam tabuliek .....	7
Úvod .....	8
O Steeluniversity .....	8
1. Simulácia kyslíkovo-konvertorovej tavby.....	10
1.1. Technologický proces výroby ocele v kyslíkovom konvertore .....	11
1.2. Podstata výroby ocele .....	12
1.2.1. Oxidácia prvkov počas fúkania technicky čistého kyslíka .....	13
1.2.2. Materiálno – tepelná bilancia .....	16
1.3. Postup pri simulácii kyslíkovo-konvertorovej tavby [3] .....	16
1.3.1. Možnosti simulácie.....	17
1.3.2. Pre koho je simulácia určená .....	17
1.3.3. Výber vyrábanej akosti ocele .....	17
1.3.4. Vsádzkové materiály pre kyslíkový konvertor .....	18
1.3.5. Ďalšie nastavenia.....	19
1.3.6. Zhrnutie zadaných parametrov .....	19
1.3.7. Ovládanie simulácie .....	21
1.3.8. Ovládanie kyslíkovej trysky .....	21
1.3.9. Zhrnutie výsledkov .....	24
2. Simulácia mimopecného spracovania ocele .....	26
2.1. Postup pri simulácii mimopecného spracovania ocele [4].....	27
2.1.1. Možnosti simulácie.....	28
2.1.2. Ovládanie simulácie .....	33
2.1.3. Plánovanie programu .....	39
2.1.4. Teplota.....	40
2.2. Podkladové vedecké vzťahy [5], [6] .....	40
2.2.1. Výpočet prísad pre dosiahnutie požadovaného zloženia.....	40

2.2.2.	Dezoxidácia.....	42
2.2.3.	Oduhličenie .....	44
2.2.4.	Odsírenie .....	45
2.2.5.	Odstránenie H .....	46
2.2.6.	Kinetika odstránenia H .....	47
2.2.7.	Elektrický ohrev .....	47
3.	Simulácia plynulého odlievania ocele .....	49
3.1.	Nové smery v plynulom odlievaní ocele .....	54
3.2.	Postup pri simulácii plynulého odlievania ocele [14].....	55
3.2.1.	Nastavenie simulácie.....	56
3.2.2.	Určenie rýchlosti odlievania a rýchlosti sekundárneho chladenia.....	57
3.2.3.	Priebeh simulácie .....	59
3.2.4.	Vyhodnotenie simulácie.....	60
	Zoznam použitej literatúry .....	63

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Úvodná obrazovka pri zadávaní údajov simulácie .....	17
Obrázok 2 Rôzne akosti ocele .....	18
Obrázok 3 Príklad vsádzkových materiálov pre výrobu ocele.....	19
Obrázok 4 Ukážka zadania požadovanej teploty surového železa.....	19
Obrázok 5 Ukážka všetkých zadaných hodnôt pre začatie simulácie .....	20
Obrázok 6 Úvodné zobrazenie simulácie .....	20
Obrázok 7 Ukážka sledovania priebehu simulácií.....	21
Obrázok 8 Ovládanie kyslíkovej trysky.....	22
Obrázok 9 Tlačidlá pre pridanie prídavkov na úpravu chemického zloženia vyrábanej ocele a odber vzorky .....	23
Obrázok 10 Odpich ocele .....	23
Obrázok 11 Ukážka výsledkov simulácie.....	24
Obrázok 12 Ukážka výsledkov chemického zloženia ocele a trosky. ....	24
Obrázok 13 Priebeh chemického zloženia ocele počas celého procesu. ....	25
Obrázok 14 Ukážka výberu užívateľskej úrovne .....	28
Obrázok 15 Ukážka výberu akosti ocele.....	29
Obrázok 16 Chemické zloženie ocelí dostupných v simulácii .....	30
Obrázok 17 Príklad vstupného a požadovaného chemického zloženia ocele. Zloženie uhlíka, mangánu, kremíka a hliníka sa musí zvýšiť, zatiaľ čo kyslík sa musí odstrániť.....	31
Obrázok 18 Usporiadanie závodu MPO .....	31
Obrázok 19 Zariadenia mimopecného spracovania ocele .....	32
Obrázok 20 Dostupné prísady s chemickým zložením a cena za tonu prísady .....	33
Obrázok 21 Argónovacia stanica (Ar Stir Station) .....	34
Obrázok 22 Prebublávacia stanica CAS-OB .....	35
Obrázok 23 Ukážka kontrolného panela pre vákuové zariadenie RH .....	36
Obrázok 24 Ukážka kontrolného panela pre panvovú pec .....	36
Obrázok 25 Ukážka kontrolného panela pre vákuové odplynenie .....	37
Obrázok 26 Chemická analýza.....	38
Obrázok 27 Výsledný protokol .....	38
Obrázok 28 Príklad zloženia ocele pri odpichu a požadovaného zloženia ocele (hmot. %). ....	39
Obrázok 29 Al - O rovnovážne krivky pri troch rôznych teplotách .....	43
Obrázok 30 Výpočet prísady Al pri začiatkovej aktivite O .....	43
Obrázok 31 Spôsoby plynulého odlievania ocele.....	49

Obrázok 32 Hlavné časti dvojprúdového ZPO s kryštalizátormi bramového typu [7] .....	50
Obrázok 33 Liaci stojan s liacou panvou [8] .....	51
Obrázok 34 Medzipanva [9] .....	52
Obrázok 35 Kryštalizátor [10].....	53
Obrázok 36 Sekundárne chladenie [11] .....	53
Obrázok 37 Laboratórium simulácie procesov prúdenia [12].....	55
Obrázok 38 Numerické simulácie [13] .....	55
Obrázok 39 Ukážka nastavania simulácie .....	56
Obrázok 40 Výber akosti ocele.....	57
Obrázok 41 Príklad nastavenia oscilácie kryštalizátora a liaceho prášku .....	58
Obrázok 42 Ukážka nastavenia teplôt panví .....	58
Obrázok 43 Úvodná obrazovka simulácie .....	59
Obrázok 44 Priebeh simulácie.....	60
Obrázok 45 Súhrn nastavení simulácie .....	60
Obrázok 46 Hlavné výsledky nastavenia .....	61
Obrázok 47 Záznam informácií o simulácii.....	61
Obrázok 48 Záznam o kvalite kontiodliatku .....	62
Obrázok 49 Grafické zobrazenia rôznych parametrov simulácie.....	62

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Zariadenia mimopecného spracovania s možnosťami spracovania ocele .....	32
Tabuľka 2 Vzťah medzi rovnovážnou koncentráciou rozpusteného H a parciálnym tlakom H pri 1600 °C .....	46
Tabuľka 3 Rôzne druhy akostí ocele a rozsahy hodnôt.....	57

## Úvod

Výroba ocele je veľmi zložitý proces. Primárne sa na výrobu ocele používajú dve zariadenia. Prvým zariadením je kyslíkový konvertor (KK) a druhým elektrická oblúčková pec (EOP). Výroba ocele v týchto zariadeniach je odlišná nielen čo sa týka vsádzkových surových používaných na výrobu, ale aj v technológii samotnej výroby. Aby sme vedeli pochopiť priebeh týchto procesov, je potrebné poznať základné princípy metalurgických pochodov v jednotlivých zariadeniach. Produktom EOP alebo KK je surová oceľ. Túto surovú oceľ je v ďalšej etape potrebné upraviť najmä z pohľadu čistoty, chemického zloženia a teploty v procese mimopecného spracovania ocele. Treťou etapou je odlievanie ocele, spravidla na zariadení pre plynulé odlievanie ocele (ZPO).

Jednotlivé zákonitosti a nadväznosti pri výrobe, spracovaní a odlievaní ocele je možné pochopiť a odskúšať aj pomocou simulácií. Veľmi dobrým nástrojom pre takéto simulácie je platforma <https://steeluniversity.org>. Cieľom tejto publikácie je ukázať, ako postupovať pri jednotlivých simuláciách.

## O platforme Steeluniversity

World Steel Association je priemyselnou univerzitou poskytujúcou vzdelávanie a odbornú prípravu súčasným a budúcim zamestnancom oceliarskych spoločností a súvisiacich podnikov. Cieľom oceliarskej rozmanitosti je inšpirovať a motivovať študentov a ľudí z oceliarskeho priemyslu.

Steeluniversity poskytuje súbor vzdelávacích možností na získanie väčších vedomostí o tom, ako sa vyrába oceľ, ako sa používa a ovplyvňuje náš každodenný život. Webová stránka Steeluniversity, ktorá sa nazýva learning+, poskytuje komplexný balík online vzdelávania v oblasti výroby ocele, metalurgie ocele, oceliarskych aplikácií, životného prostredia a bezpečnosti. Učebný obsah je dodávaný interaktívnym, informačným a zábavným spôsobom.

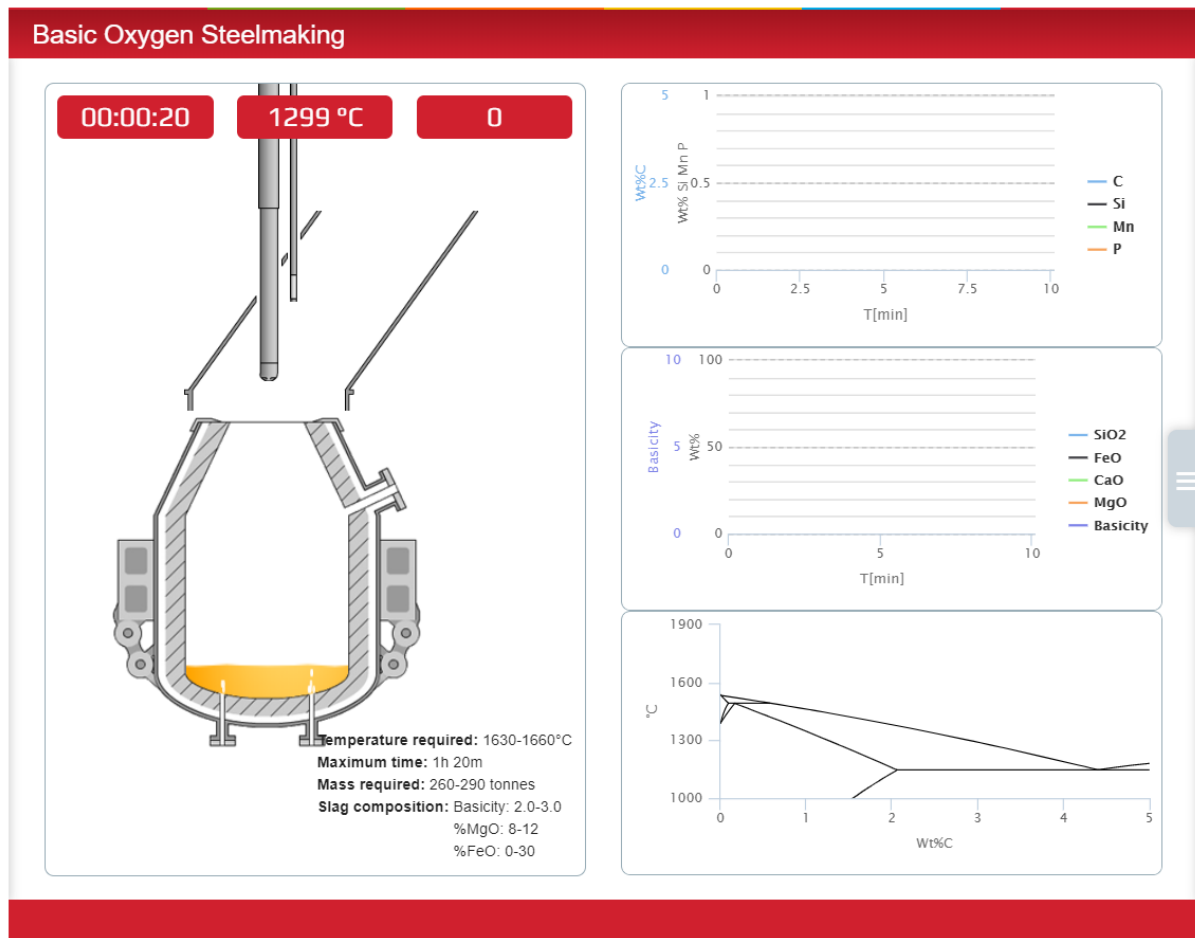
Webová stránka The steeluniversity learning+ poskytuje príležitosť študovať a uplatňovať základné vedecké, metalurgické a technické princípy, termodynamiku a kinetiku, ktoré sú základom výroby a využívania ocele. V jeho jadre sa nachádza séria realistických simulácií hlavných operácií výroby ocele.

Stránka je určená pre študentom vysokých škôl a postgraduálnym študentom spolu so zamestnancami oceliarskej spoločnosti a ľuďmi v dodávateľskom reťazci oceliarskeho priemyslu.



Profesori, inštruktori, učitelia a školitelia môžu využívať túto stránku na organizovanie a dopĺňanie výučby pre svojich študentov. [1]

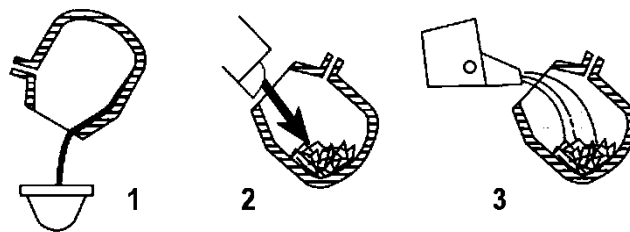
# 1. Simulácia kyslíkovo-konvertorovej tavby



Kyslíkový konvertor je metalurgické zariadenie pre výrobu surovej ocele. Má tvar hruškovitej nádoby so zužujúcim sa hrdlom. Z vonkajšej strany sú po bokoch umiestnené nosné čapy, ktoré sú uložené v ložiskách, čím umožňujú obojsmerné naklápanie okolo vodorovnej osi. Kolmo na os naklápania sa na jednej strane nachádza odpichový otvor pre odpich ocele. Troska sa z agregátu vylieva cez protiľahlú stranu hrdla. Vnútorňa časť konvertora je vymurovaná žiaruvzdornými materiálmi. V súčasnosti sa pre pracovnú časť výmurovky používajú takmer výlučne periklas-uhlíkové (MgO-C) žiaruvzdorné materiály. Dôležitou konštrukčnou časťou konvertora je kyslíková tryska určená na prívod technicky čistého kyslíka. Koncová časť trysky je z dôvodu dobrej tepelnej vodivosti vyrobená z medi.

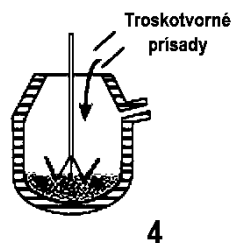
## 1.1. Technologický proces výroby ocele v kyslíkovom konvertore

**Vsádzanie:** Po vyklopení trosky z predchádzajúcej tavby (1) sa urobí **kontrola opotrebenia výmurovky** a odpichového otvoru. Pokiaľ nie sú na výmurovke známky porušenia a odpich predchádzajúcej tavby trval predpísanú dobu, bude konvertor uvoľnený pre ďalšiu tavbu. Po **vsadení šrotu** (2) sa do konvertora naleje  $\frac{1}{4}$  až  $\frac{1}{2}$  z plánovanej hmotnosti **surového železa** (3). Zároveň sa pridávajú troskotvorné prísady na báze vápna a dolomitického vápna. Po uplynutí dvoch minút a znížení množstva vznikajúcich spalín sa doleje zvyšok surového železa.



**Fúkание:** Po vsadení pevnej a tekutej vsádzky a splnení ďalších podmienok sa začne **fúkať technicky čistý kyslík** cez kyslíkovú trysku spustenú nad hladinu taveniny (4). Režim fúkania je možné riadiť **ručne** z velína, alebo cez **dynamický model** fúkania.

Počas fúkania preniká prúd kyslíka do taveniny, pričom ju **oxiduje** a vytvára tak primárnu reakčnú zónu s teplotami až do 2500 °C.



**Troskový režim:** Pre dosiahnutie žiadaných parametrov vyrábanej ocele je nutné **rýchle vytvorenie** tekutej konvertorovej trosky. Fyzikálno-chemické vlastnosti trosky sa počas tavby **menia**.

Pridávanie troskotvorných prísad prebieha v **dvoch fázach**:

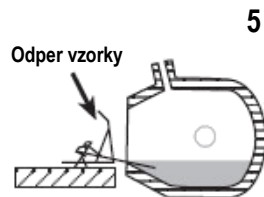
### 1. FÁZA:

Prvá dávka, 60 % vápna vrátane celej dávky dolomitického vápna, sa spustí do agregátu po zapálení plameňa v prvej minúte fúkania kyslíka.

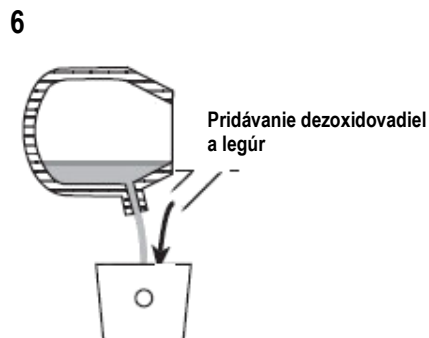
### 2. FÁZA:

Druhá dávka, 40 % vápna, sa obvykle vsádza medzi 2,5 až 6. minútou od začiatku fúkania.

**Dohotovenie tavby:** Po sfúkaní tavby sa **odoberie vzorka** na rýchloanalýzu (5) a zároveň sa zistí **teplota kovového kúpeľa**. Pokiaľ teplota, resp. chemické zloženie surovej ocele nie je vyhovujúce, uskutoční sa **dofuk**, s možným prídavkom FeSi. Čas trvania dofuku sa pohybuje od niekoľkých sekúnd do niekoľkých minút.



**Odpich tavby:** Pokiaľ výsledky ďalšej rýchloanalýzy spĺňajú definované parametre (teplota a chemické zloženie), surová oceľ z KK sa odpichne do liacej panvy (6). Počas odpichu sa oceľ dezoxiduje a leguje.

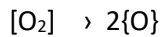


## 1.2. Podstata výroby ocele

Pri konvertorovom spôsobe výroby ocele sú sprievodné prvky ako **uhlík (C)**, **kremík (Si)** a **mangán (Mn)** rozpustené v tavenine. Na odstraňovanie týchto prvkov sa využíva ich afinita ku kyslíku, ktorá je vyššia než v prípade Fe. Fúkaním technicky čistého kyslíka teda dochádza k ich oxidácii a prechodu buď do trosky alebo do konvertorového plynu. Toto **odstraňovanie sprievodných prvkov** (primárne uhlíka) je podstatou procesu skujňovania surového železa – výroby ocele.

### 1.2.1. Oxidácia prvkov počas fúkania technicky čistého kyslíka

Pri fúkaní prúd kyslíka vniká do kovovej taveniny, oxiduje ju a vytvára v nej primárnu reakčnú zónu. Technicky čistý kyslík sa v tekutom kove rozpúšťa z molekulárnej podoby na atomárnu podľa sievertsovho zákona. Rozpustený kyslík následne reaguje so sprievodnými prvkami a oxiduje ich.



V procese skujňovania vzniká kovovo - trosková emulzia, ktorá zväčšuje styčnú plochu medzi jednotlivými reagujúcimi fázami, a tým zintenzívňuje reakcie na fázovom rozhraní. Negatívnym efektom vzniku kovovo - troskovej emulzie je nižší výťažok ocele.

#### 1.2.1.1. Oxidácia uhlíka

Oduhličovacia reakcia je najdôležitejšou reakciou, ktorá prebieha v kyslíkovom konvertore v kovovom kúpeľi. Jej produktom sú oxid uhoľnatý a oxid uhličitý. Var kúpeľa, spôsobený vznikom bublín oxidu uhoľnatého a ich vylučovanie cez vrstvu kovu a trosky, zabezpečuje premiešavanie kúpeľa, urýchľuje prenos tepla od plameňa do kovu, odstraňuje škodlivé prímеси z kovu do trosky, napomáha homogenizácii zloženia a teploty kovovej taveniny, značnému odplyneniu a napomáha vyplavovaniu nekovových vtrúsenín do trosky.

Uhlík začína vyhoriavať už na počiatku tavby, pričom rýchlosť jeho oxidácie sa začne zvyšovať až po vyhorení kremíka a čiastočne mangánu.

Oxidácia uhlíka v oceli sa uskutočňuje podľa reakcie (1) :



Rovnovážna konštanta pre reakciu (1) má tvar (2):

$$K_C = \frac{p_{\text{CO}}}{a_{\text{C}} \cdot a_{\text{O}}} = \frac{p_{\text{CO}}}{\chi_{\text{C}} \cdot [\% \text{C}] \cdot \chi_{\text{O}} \cdot [\% \text{O}]} \quad (2)$$

Kde:  $a_{\text{C}}, a_{\text{O}}$  - aktivita uhlíka, kyslíka

$p_{\text{CO}}$  - rovnovážny tlak CO

$\chi_{\text{C}}, \chi_{\text{O}}$  - koeficient aktivity uhlíka, kyslíka

$[\% \text{C}], [\% \text{O}]$  - obsah uhlíka resp. kyslíka v kove

Proces vyhoriavania uhlíka pozostáva z týchto krokov:

- transport uhlíka a kyslíka na rozhranie kov - plyn ,
- vznik CO na rozhraní,
- transport CO do plynnej fázy.

Fúkanie dnom konvertora spôsobuje intenzívne premiešavanie, čím sa zlepšuje stupeň oduhličenia. Pri kombinovanom fúkaní prebieha proces oduhličovania rovnomernejšie počas celej tavby.

Predpokladá sa, že oduhličenie prebieha podľa tzv. "trapezoidného modelu", kde sa určuje obsah tranzitného uhlíka ( $C_T$ ), pri ktorom rýchlosť prívodu kyslíka sa stáva určujúcim faktorom rýchlosti reakcie (3).

$$C_v = \frac{[C]_T}{100} = \frac{Q \cdot K}{1000} \quad (3)$$

Kde:  $C_v$  - rýchlosť cirkulácie roztavenej ocele ( $t \cdot \text{min}^{-1}$ )

$[C]_T$  - obsah tranzitného uhlíka (%)

$Q$  - prietok fúkaného kyslíka ( $\text{N} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )

$K$  - maximálna rýchlosť oduhličenia ( $\text{kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ )

#### 1.2.1.2. Oxidácia mangánu

Oxidácia mangánu sa uskutočňuje na fázovom rozhraní troska - kov, výmenou náboja medzi atómami mangánu rozpustenými v železe a kationmi železa rozpustenými v troske. Reakcia má tvar :



Oxid manganatý má vysokú teplotu tavenia (2148 K). Podmienky pre oxidáciu mangánu v kovovom kúpeľi nie sú veľmi priaznivé. Čím je teplota kúpeľa vyššia, tým menej mangánu prejde do trosky.

#### 1.2.1.3. Oxidácia kremíka

Oxidácia kremíka je exotermická reakcia, pri ktorej sa uvoľňuje veľké množstvo tepla. Na začiatku fúkania má kremík najvyššiu afinitu ku kyslíku a preto väčšina vyhorí asi do piatich minút. V zásaditom procese má reakcia tvar (5):



#### 1.2.1.4. Oxidácia fosforu

Fosfor patrí v mnohých prípadoch medzi škodlivé zložky v oceli. Základnou podmienkou, ktorá zabezpečuje odfosforenie kovu je vysoká aktivita kyslíka v troske. Reakcia odfosforenia prebieha na rozhraní kov - troska. Proces odfosforenia možno vyjadriť rovnicou (6):



Medzi základné faktory, ktoré zabezpečujú účinné odfosforenie kovu patrí vysoký obsah CaO v troske a udržanie vysokej aktivity aniónov kyslíka v troske. Oxidácia fosforu prebieha pri nižších teplotách. Jej priebeh je sťažený prítomnosťou kremíka, mangánu, chrómu a iných katiónov v kovovom kúpeľi, ktoré majú vysokú afinitu ku kyslíku.

Technológiou kombinovaného fúkania sa zlepšujú podmienky pre odfosforenie ocele. Zlepšuje sa prechod fosforu z tekutého kovu do trosky na rozhraní oceľ - troska. Je to v dôsledku intenzívneho premiešavania tekutého kovu a trosky.

#### 1.2.1.5. Oxidácia síry

Odsírenie môže prebiehať prostredníctvom troskovej fázy a plynnej fázy. Zvyčajne si tento proces vyžaduje samostatnú etapu .

Pri odsírení troskovou fázou je rozhodujúca bazicita trosky, jej zloženie a teplota. Najintenzívnejšie prebieha odsírenie pri vyššej teplote tavby, vyššej zásaditosti a nízkom okysličení trosky. Odsírenie ocele možno popísať rovnicou (7):



Rovnovážna konštanta rovnice (7) má tvar (8):

$$K_p = \frac{a_{O^{2-}} \cdot a_{(S^{2-})}}{a_{[S]} \cdot a_{(O^{2-})}} \quad (8)$$

Odsírenie plynnou fázou, pri použití technicky čistého kyslíka, za vzniku plynného SO<sub>2</sub> prebieha podľa reakcie (9):



V kyslíkových konvertoroch pri fúkaní kyslíka zhora, z celkového odstráneného množstva síry prechádza 10 až 15 % do plynnej fázy vo forme SO<sub>2</sub> a zvyšok sa naviaže na vápno.

Proces odsírenia prebieha intenzívnejšie pri kyslíkových konvertoroch s kombinovaným fúkaním. Je to v dôsledku rýchlejšej tvorby trosky, menšieho okysličenia taveniny ako aj premiešavaním kúpeľa.

Stupeň odsírenia narastá aj so zvyšujúcou sa bazicitou trosky, ktorá v kyslíkovom konvertore dosahuje hodnoty 3 až 5.

### 1.2.2. Materiálovo – tepelná bilancia

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

Prvá sa urobí **materiálová bilancia** - porovnanie vstupných hmotností prvkov vo vsádzke, ktoré sa budú zúčastňovať na skujňovacích reakciách oxidačných, odsírovacích a odfosforovacích s predpokladanými, resp. požadovanými konečnými obsahmi prvkov na výstupe t.j. po sfúkaní pri zohľadnení všetkých pravdepodobných strát. Materiálová bilancia je jedným z dôležitých faktorov, určujúcich hodnotové ukazovatele technologického pochodu. Presný výpočet materiálovej bilancie umožňuje zdokonaľovať tento pochod a znížiť na minimum straty kovu v priebehu tavby.

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

Výpočet tepelnej bilancie v hutníckych agregátoch je veľmi dôležitý, pretože jeho riešenie umožňuje určiť najlepšie využitie daného agregátu, a teda čo najlepšie organizovať jeho prácu, plánovať rekonštrukciu taviaceho zariadenia a voliť suroviny.

Tepelná bilancia LD - konvertora, ktorý na rozdiel od iných agregátov nepotrebuje tepelnú energiu z vonku, je potrebná nielen pre analýzu efektivity tepelnej energie, ale aj pre ďalšie zdokonaľovanie a vývoj LD - konvertorového pochodu.

Pre výpočet tepelnej bilancie je potrebné vedieť množstvo, zloženie, tepelný obsah, teplotu a ďalšie údaje o vsádzkových materiáloch. Je potrebné stanoviť teplotu, ktorá vzniká z chemických reakcií, prebiehajúcich v agregáte alebo sústave. [2]

### 1.3. Postup pri simulácií kyslíkovo-konvertorovej tavby [3]

Cieľom tejto simulácie (**Basic Oxygen Steelmaking**) je skujňovanie 250 ton vsádzky zloženej zo surového železa a oceľového šrotu na oceľ. Toto sa dosiahne fúkaním technicky čistého kyslíka do taveniny, aby došlo k oduhlíčeniu v tavenine, čím sa zníži obsah uhlíka medzi 0,01% hmot. a 0,4% hmot. Výsledkom simulácie je dodržanie celkového času, celkových nákladov a chemického zloženia vyrábanej ocele.



### 1.3.1. Možnosti simulácie

Ako prvé je potrebné nastaviť počiatočné parametre simulácie. Pri simulácii je potrebné zadať pre koho je simulácia určená, aká akosť ocele sa bude vyrábať, vsádzkové materiály, teplotu surového železa a prietok miešaného plynu.

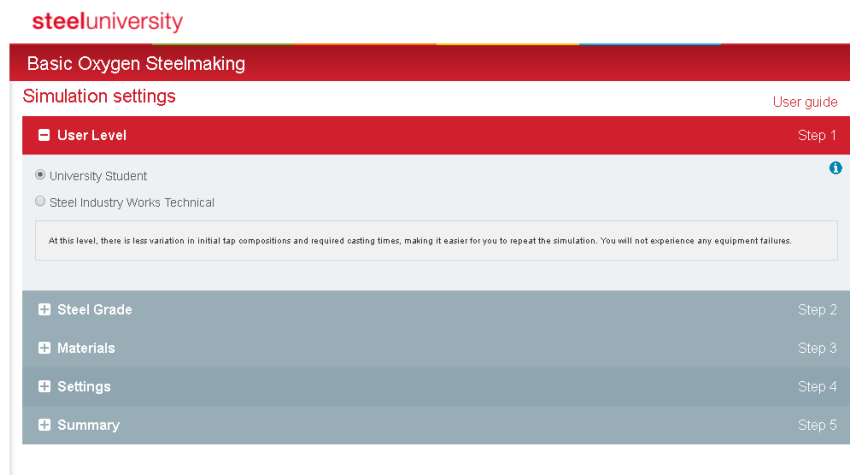
### 1.3.2. Pre koho je simulácia určená

Simulácia je vyvinutá pre 2 skupiny: pre vysoké školy (**University Student**) a pre oceliarsky priemysel (**Steel Industry Works Technical**) (**Obrázok 1**).

Simulácia pre študentov: V tomto prípade má užívateľ menej možností pri voľbe vsádzkových surovín a nevyskytujú sa poruchy zariadenia, čo uľahčuje opakovanie simulácie.

Simulácia pre oceliarsky priemysel: V tomto prípade sa očakáva, že sa užívateľ bude schopný vysporiadať s viacerými možnosťami voľby vsádzkových surovín, čo znamená, že simulácia sa pri každom ďalšom spustení môže líšiť. Na určenie správneho množstva vsádzky bude nutné vždy vykonať nové výpočty a počas simulácie reagovať aj na poruchy zariadenia.

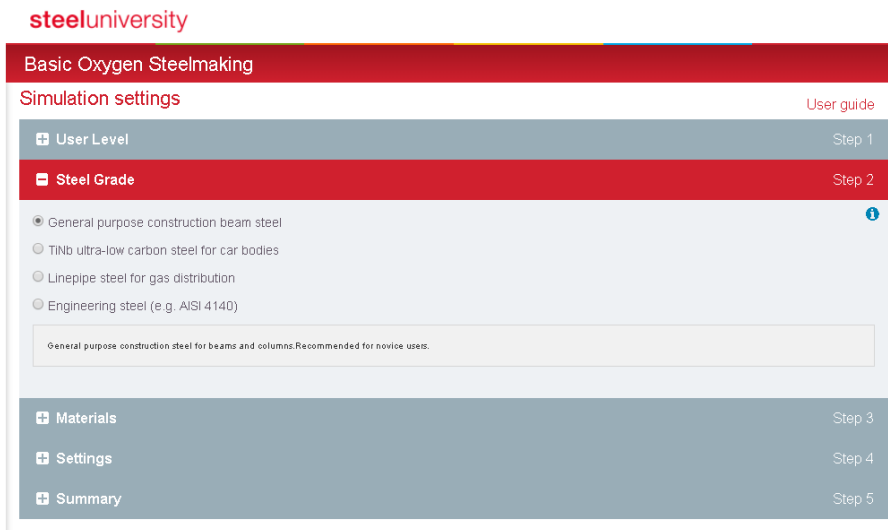
**V tomto návode je popísaná simulácia pre študentov.**



Obrázok 1 Úvodná obrazovka pri zadávaní údajov simulácie

### 1.3.3. Výber vyrábanej akosti ocele

Pri výbere akosti ocele je možnosť vybrať si zo štyroch akostí (**Obrázok 2**).



Obrázok 2 Rôzne akosti ocele

- **Konštrukčná oceľ (Construction steel)** – nenáročná na spracovanie, pre začínajúcich užívateľov.
- **Nízko-uhlíková oceľ (TiNb ULC steel)** – pre automobilový priemysel s obsahom C pod 0,0035 %.
- **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.
- Posledná oceľ označovaná ako **Engineering steel** má výraznejší obsah Cr a Mo a taktiež vyžaduje nízky obsah H.

#### 1.3.4. Vsádzkové materiály pre kyslíkový konvertor

K dispozícii je zoznam šiestich rôznych materiálov kovonosnej a troskotvornej časti vsádzky (tekuté surové železo, ľahký oceľový šrot, ťažký oceľový šrot, železná ruda, vápno, dolomit). Každý z týchto materiálov má presne definované vlastnosti, ako je chemické zloženie a cena. Pri simulácii sa skutočné zloženie v materiáli mení o  $\pm 5\%$  každého percentuálneho podielu.

Pri pridávaní množstiev jednotlivých vsádzkových materiálov je potrebné sa riadiť celkovým chemickým zložením zvolenej vyrábanej ocele, ktorá je definovaná minimálnou a maximálnou hodnotou pre jednotlivé prvky. Tieto informácie sa nachádzajú na pravej strane obrazovky.

Po navolení množstiev jednotlivých vsádzkových materiálov je v spodnej časti uvedená výsledná cena celkového množstva vsádzky a cena na jednu tonu vyrábanej ocele (**Obrázok 3**).

Steel Grade				Step 2
Materials				Step 3
Raw Material	Unit cost	Mass	Cost	
Hot metal	\$210.00/t	284	\$ 59640	
Light Scrap	\$0.15/kg	4400	\$ 660	
Heavy Scrap	\$0.13/kg	1000	\$ 130	
Iron Ore	\$0.14/kg	4100	\$ 574	
Lime	\$0.09/kg	3800	\$ 323	
Dolomite	\$0.09/kg	2700	\$ 230	
<b>Total</b>		<b>300</b>	<b>\$ 61557</b>	
<b>Cost per metric tonne</b>			<b>213</b>	

Target steel grade:				
Construction Steel				
Element	Result		Min	Max
C	4.417	✘	0.1	0.16
Si	0.393	✘	0	0.25
Mn	0.493	✔	0	1.5
P	0.079	✘	0	0.025
S	0.020	✔	0	0.1
Cr	0.005	✔	0	0.1
Mo	0.003	✔	0	0.04
Ni	0.007	✔	0	0.15
Cu	0.000	✔	0	0.15
N	0.000	✔	0	0.05
Nb	0.000	✔	0	0.05

Obrázok 3 Príklad vsádzkových materiálov pre výrobu ocele

### 1.3.5. Ďalšie nastavenia

V tejto časti je možné nastaviť teplotu surového železa a prietok prebublávacieho plynu dnom kyslíkového konvertora. Teplotný rozsah surového železa je medzi 1200°C až 1400°C a prietok prebublávacieho plynu je v rozsahu 0 - 0,15 Nm<sup>3</sup> (Obrázok 4).

Basic Oxygen Steelmaking	
Simulation settings <span style="float: right;">User guide</span>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>☰ User Level <span style="float: right;">Step 1</span></li> <li>☰ Steel Grade <span style="float: right;">Step 2</span></li> <li>☰ Materials <span style="float: right;">Step 3</span></li> <li>☰ Settings <span style="float: right;">Step 4</span></li> </ul>	
Select hot metal temperature (°C) <input type="text" value="1300"/>	Select bottom stirring gas flow rate (Nm <sup>3</sup> ) <input type="text" value="0.10"/>
<small>N.B. All other materials are at room temperature, i.e. 20°C</small>	<small>N.B. Cost of nitrogen gas is: \$0.07/Nm<sup>3</sup></small>
☰ Summary <span style="float: right;">Step 5</span>	

Obrázok 4 Ukážka zadania požadovanej teploty surového železa.

### 1.3.6. Zhrnutie zadaných parametrov

V poslednej časti nastavenia simulácie je súhrn zvolených hodnôt pre jednotlivé vsádzkové materiály, požadovaný čas výroby ocele, požadované množstvo vyrobenej ocele, zloženie trosky v podobe oxidov MgO a FeO, požadovanej bazicity trosky a náklady na výrobu jednej tony ocele.

Po skontrolovaní všetkých zvolených hodnôt (**Obrázok 5**) sa môže pristúpiť k samotnej simulácii stlačením tlačidla Štart simulácie (**START SIMULATION**).

**Summary**

**User Level**  
University Student

**Steel Grade**  
Construction Steel

**Hot metal temperature**  
1300°C

**Stirring gas flow rate**  
0.1 Nm<sup>3</sup>/min/tonne

**Temperature required**  
1630-1660°C

**Mass required**  
260-290 tonnes

**Maximum time**  
1h 20m

**Slag composition**  
Basicity: 2.0-3.0  
%MgO: 8-12  
%FeO: 0-30

**Materials**

Raw Material	Unit cost	Mass	Cost
Hot metal	\$210.00/t	284 t	\$ 59640
Light Scrap	\$0.15/kg	4400 kg	\$ 660
Heavy Scrap	\$0.13/kg	1000 kg	\$ 130
Iron Ore	\$0.14/kg	4100 kg	\$ 574
Lime	\$0.09/kg	3800 kg	\$ 323
Dolomite	\$0.09/kg	2700 kg	\$ 230
<b>Total</b>		<b>300</b>	<b>\$ 61557</b>
<b>Cost per metric tonne</b>			<b>213</b>

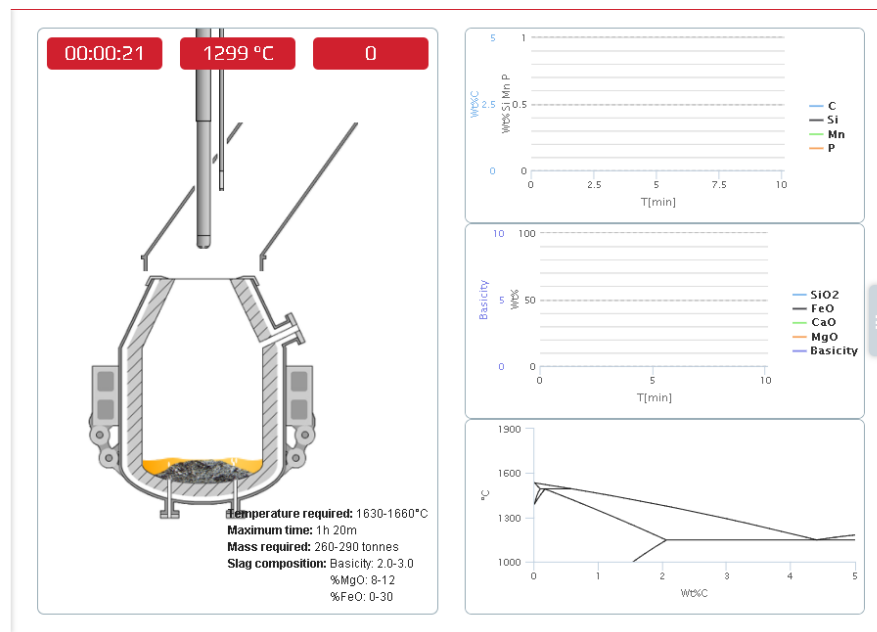
**Composition**

Element	Result	Min	Max
C	4.417	0.1	0.16
Si	0.393	0	0.25
Mn	0.493	0	1.5
P	0.079	0	0.025
S	0.020	0	0.1
Cr	0.005	0	0.1
Mo	0.003	0	0.04
Ni	0.007	0	0.15
Cu	0.000	0	0.15
N	0.000	0	0.05
Nb	0.000	0	0.05
Ti	0.000	0	0.01

START SIMULATION

Obrázok 5 Ukážka všetkých zadaných hodnôt pre začatie simulácie

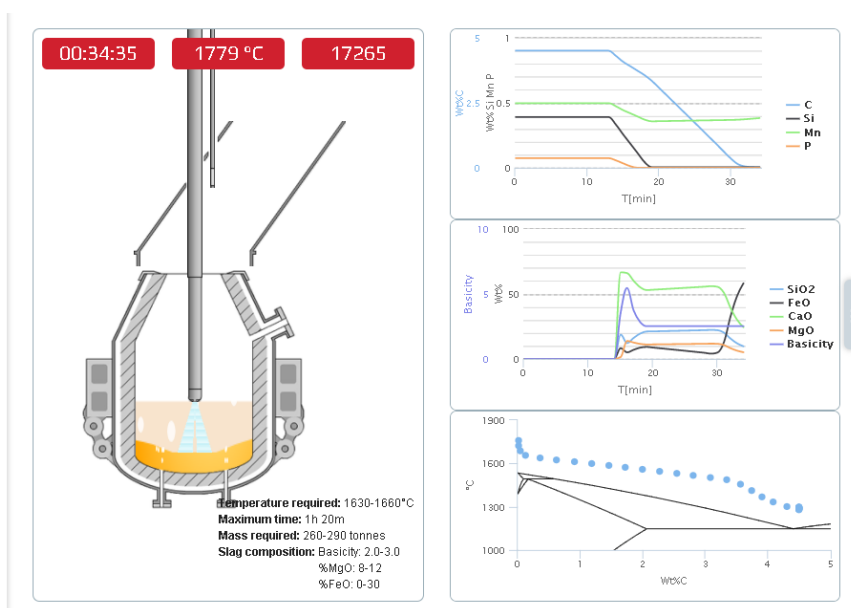
Jednotlivé druhy vsádzkových materiálov sa vsadia do kyslíkového konvertora. **Obrázok 6** znázorňuje kvapalný stav surového železa a tuhý stav ocelového šrotu.



Obrázok 6 Úvodné zobrazenie simulácie

### 1.3.7. Ovládanie simulácie

Simulácia môže byť spustená rôznymi rýchlosťami 1x – 32x. Rýchlosť môže byť počas simulácie kedykoľvek zmenená. V hornej časti obrazovky vľavo sa nachádzajú tri informatívne okná, ktoré zobrazujú z pravej strany aktuálny čas simulácie, teplotu ocele a množstvo fúkaného technicky čistého kyslíka a v spodnej časti sú zobrazené požadované parametre simulácie. V ľavej časti obrazovky sú grafy chemického zloženia ocele, chemického zloženia trosky a fázového diagramu železo-uhlík. Na základe týchto grafov je možné sledovať priebeh simulácie. Tieto grafy sa aktualizujú parametre v každej minúte simulácie (**Obrázok 7**).

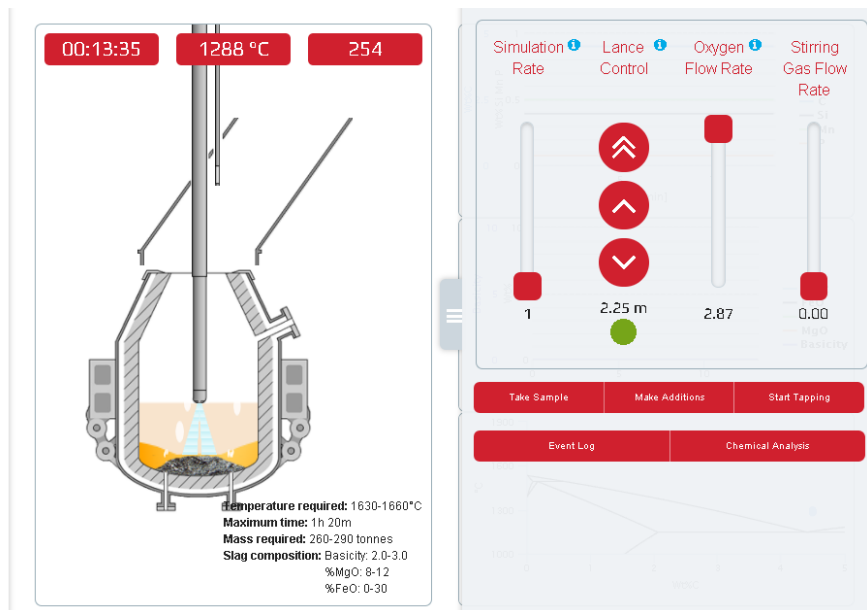


Obrázok 7 Ukážka sledovania priebehu simulácií

### 1.3.8. Ovládanie kyslíkovej trysky

Ovládací panel kyslíkovej trysky sa zobrazí po stlačení sivého tlačidla umiestneného v strednej časti obrazovky vpravo. Polohy kyslíkovej trysky (**Lance Control**) sa ovláda šípkami podľa smeru pohybu. Zelený krúžok predstavuje optimálnu výšku kyslíkovej trysky nad tekutým kovom (**Obrázok 8**). Optimálna poloha kyslíkovej trysky má vplyv na správnu tvorbu trosky. Keď je kyslíková tryska umiestnená vyššie dochádza k napenieniu trosky, ktorá pomáha chrániť žiaruvzdorné materiály, ale môže dôjsť k pretečeniu cez hrdlo kyslíkového konvertora a vtedy sa simulácia ukončí. Keď je kyslíková tryska v optimálnej polohe, je potrebné nastaviť ideálny prietok kyslíka. Ideálny prietok kyslíka reguluje teplotu taveniny a tiež úroveň napenenia trosky. Prietok kyslíka sa reguluje tak, aby pokračoval proces oduhličenia, ale aby sa zabránilo príliš vysokému nárastu teploty. Požadovaná teplota je uvedená v spodnej časti pod konvertorom. Pri samotnej

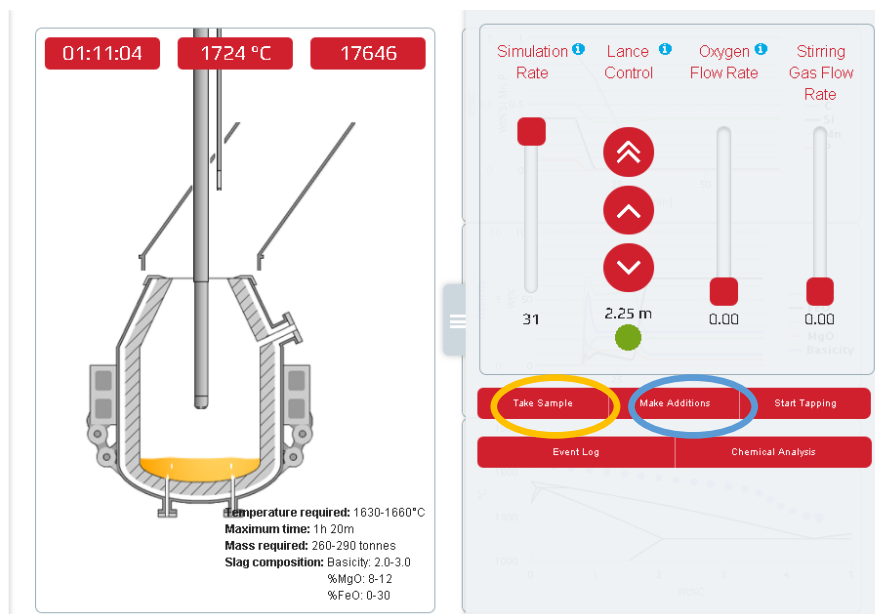
simulácií, pri procese sledovania priebehu oduhlčenia a zníženia jeho hodnoty k požadovanému obsahu, by sa mala znížiť rýchlosť simulácie, aby sa zlepšila možnosť kontrolovať proces.



Obrázok 8 Ovládanie kyslíkovej trysky

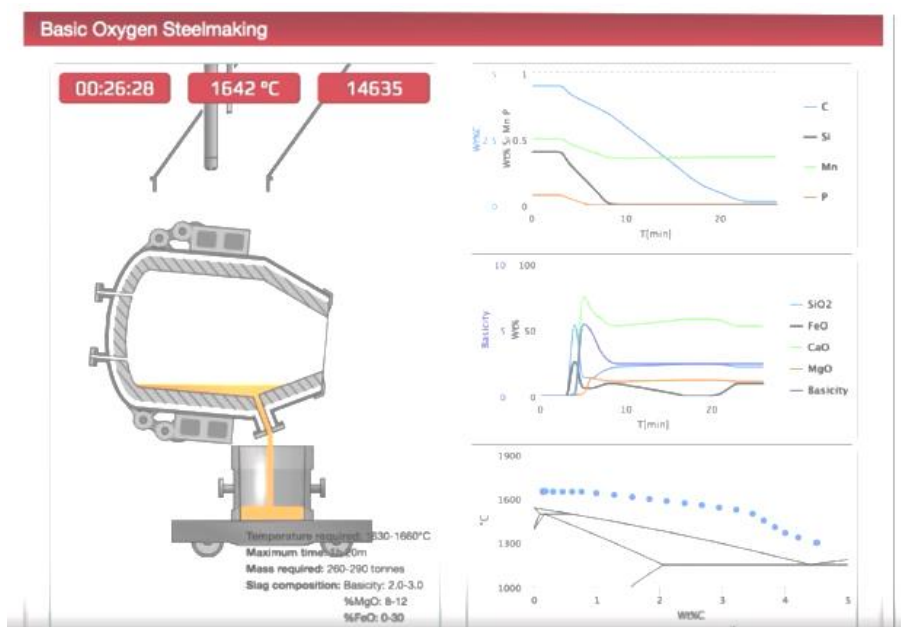
Ovládací panel obsahuje aj ďalšie tlačidlá, ktoré poskytujú cenné informácie o priebehu tavby (odobrať vzorku (**Take Sample**), chemická analýza (**Chemical Analysis**), záznam vedenia tavby (**Event Log**), odpich surovej ocele (**Start Tapping**)) a možnosť prídania prísad (**Make Additions**) (**Obrázok 9**). Úpravu chemického zloženia vyrábanej ocele je možné vykonať prídanim železnej rudy, vápna a dolomitu. Po nastavení kurzora na jednotlivé názvy prísad sa zobrazí chemické zloženie danej prísady.

Tlačidlo odobrať vzorku (**Take Sample**) (**Obrázok 9**) sa použije pre presnú kontrolu chemického zloženia ocele. Obsah uhlíka sa zobrazí okamžite, ale na celkové chemické zloženie je potrebné počkať asi 3 minúty, čo je dosť podobné tomu ako to vyzerá v praxi. Po uplynutí tohto času sa chemická analýza zobrazí na obrazovke.



Obrázok 9 Tlačidlá pre pridanie prísad na úpravu chemického zloženia vyrábanej ocele a odber vzorky

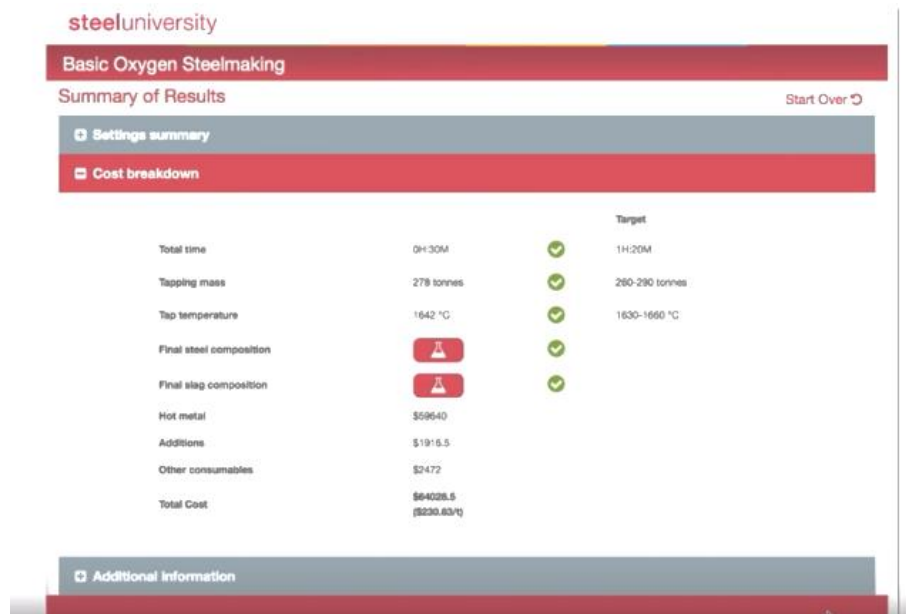
Keď chemické zloženie vyrobenej surovej ocele spĺňa požadované parametre dané akosťou vyrábanej ocele a kyslíková tryska je mimo kyslíkového konvertora, je možné začať odpich ocele tlačidlom **Start Tapping** (Obrázok 10).



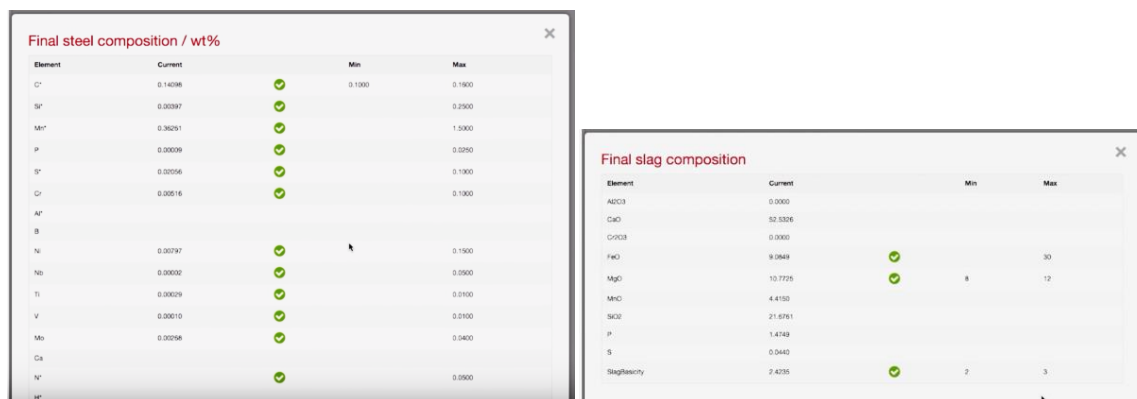
Obrázok 10 Odpich ocele

### 1.3.9. Zhrnutie výsledkov

Po ukončení simulácie sa zobrazí obrazovka, na ktorej sú uvedené hlavné požadované parametre pre úspešné ukončenie tavby a zároveň výsledky splnenia alebo nespĺnenia jednotlivých parametrov. Na obrazovke sa zobrazí aj rozpis nákladov, vrátane celkových nákladov a nákladov na tonu vyrobenej ocele (**Obrázok 11**). Okrem toho je možné skontrolovať finálne chemické zloženie vyrobenej ocele a trosky (**Obrázok 12**).



Obrázok 11 Ukážka výsledkov simulácie



Obrázok 12 Ukážka výsledkov chemického zloženia ocele a trosky.

Ďalej zhrnutie výsledkov poskytuje aj ďalšie informácie o priebehu chemického zloženia vyrábanej ocele (**Obrázok 13**) a súhrn navolených hodnôt na začiatku simulácie.





Obrázok 13 Priebeh chemického zloženia ocele počas celého procesu.

## 2. Simulácia mimopecného spracovania ocele

### Secondary Steelmaking



Procesy mimopecného spracovania ocele (ďalej len MPO) začínajú už v priebehu odpichu ocele z kyslíkového konvertora. Popri prebiehajúcej dezoxidácii, legovaní a odsírení dochádza čiastočne aj k nežiaducim javom, napríklad 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.

Medzi úlohy sekundárnej metalurgie obvykle patrí:

- ohrev, prípadne ochladzovanie kovu,
- privádzanie inertných plynov,
- prívod rôznych rafinačných médií v pevnom alebo kvapalnom stave s cieľom upraviť chemické zloženie a regulovať teplotu,
- zvýšenie mikročistoty, zabezpečenie chemickej a tepelnej homogenity ocele tak, aby spĺňala požiadavky pre odlievajúce ZPO a požiadavky na vyrábanú akosť ocele

Rozdelenie postupov sekundárnej metalurgie podľa miesta a pracovného tlaku:

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 dno LP pri odpichu tavby z KK.
- Fúkanie inertného plynu (Ar, N<sub>2</sub>) do taveniny tryskou zhora, alebo póreznou tvárniciou 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 homogezácii, 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<sub>2</sub>).
- Odsírenie, odfosforenie, stabilizácia teploty.

## 2.1. Postup pri simulácií mimopecného spracovania ocele [4]

Cieľom simulácie (**Secondary Steelmaking**) je upraviť odpichnutú surovú oceľ z kyslíkového konvertora (ďalej len KK) do liacej panvy a premiestniť ju do určeného zariadenia tak, aby upravená oceľ mala požadované chemické zloženie, teplotou a obsah inklúzií v predpísanom čase.

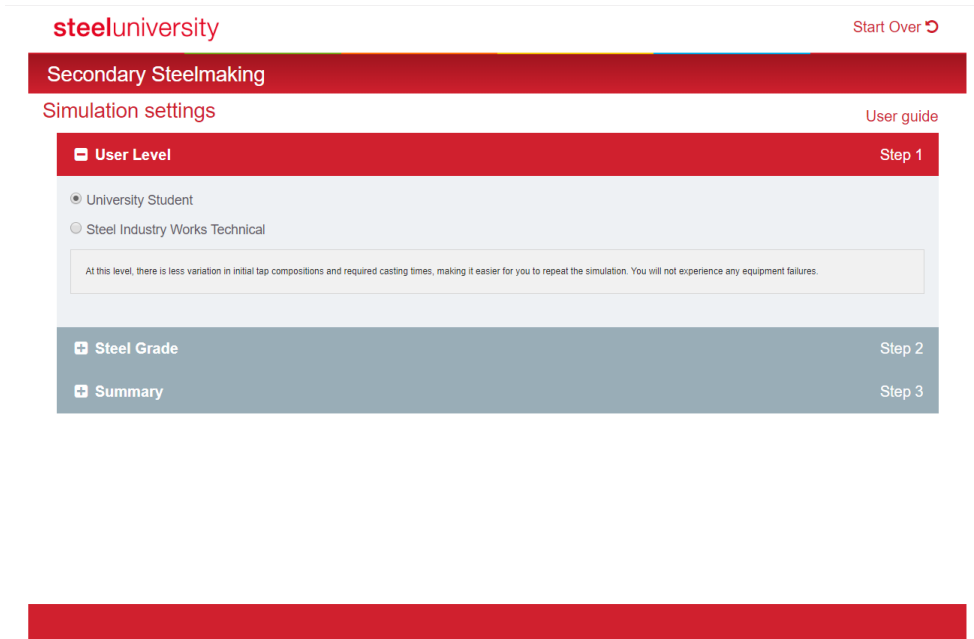
Ďalej je potrebné minimalizovať náklady na mimopecné spracovanie.

## 2.1.1. Možnosti simulácie

### 2.1.1.1. Pre koho je simulácia určená

Simulácia je vyvinutá pre 2 skupiny: pre vysoké školy (**University Student**) a pre oceliarsky priemysel (**Steel Industry Works Technical**) (**Obrázok 14**).

**V tomto návode je popísaná simulácia pre študentov**



Obrázok 14 Ukážka výberu užívateľskej úrovne

### 2.1.1.2. Rýchlosť simulácie

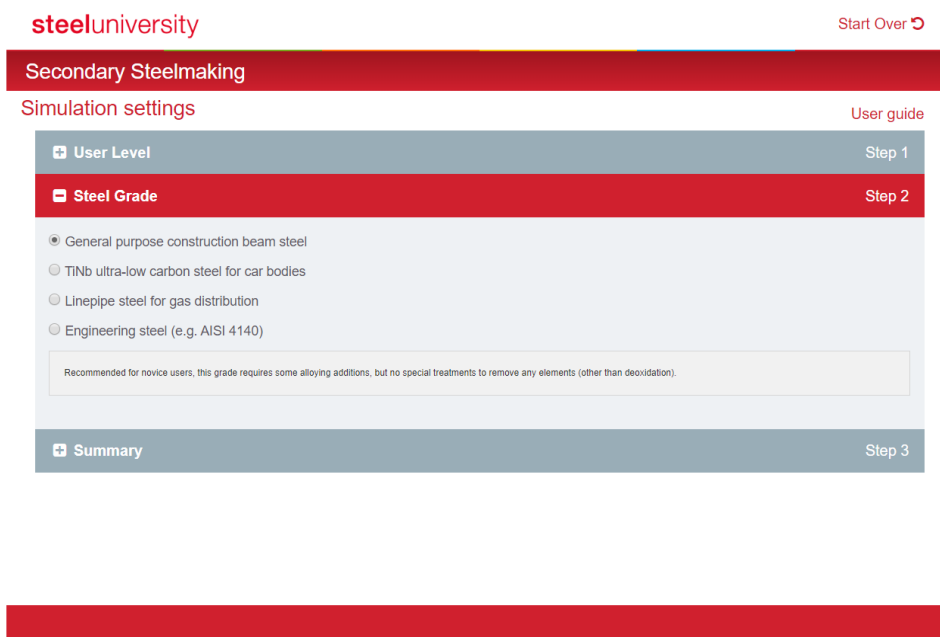
Simulácia môže prebiehať pri rôznych rýchlostiach 1x – 32x (**Simulation rate**). Je možné ju meniť kedykoľvek v priebehu simulácie okrem prípadu, ak sa uskutočňuje naklápanie kyslíkového konvertora, pohyb žeriavu a panvy.

### 2.1.1.3. Požadovaná akosť ocele

V simulácii je možný výber 4 akostí ocele (**Obrázok 15**), pre využitie rôznych spôsobov spracovania.

- **Konštrukčná oceľ (Construction steel)** – nenáročná na spracovanie, pre začínajúcich užívateľov. Hlavnou úlohou je voľba správneho typu a množstva legujúcich prísad.

- **Nízko-uhlíková oceľ (TiNb ULC steel)** – pre automobilový priemysel s obsahom C pod 0,0035 %. Hlavnou úlohou je správny výber jednotky pre mimopecné spracovanie ocele za účelom efektívneho zníženia prebytočného uhlíka.
- **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 je pre skúsených užívateľov.
- Posledná oceľ označovaná ako **Engineering steel** má výraznejší obsah Cr a Mo a taktiež vyžaduje nízky obsah H.



Obrázok 15 Ukážka výberu akosti ocele

Na **Obrázok 16** sú uvedené chemické zloženia (**Element**) ocelí dostupných v simulácii.

Element	General purpose Construction beam 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

Obrázok 16 Chemické zloženie ocelí [%] dostupných v simulácii

#### 2.1.1.4. Plánovanie

Prvá vec, ktorú je nutné urobiť, je porovnanie zloženia ocele a teploty po odpichnutí z kyslíkového konvertora s cieľovými hodnotami požadovanými pre odlievanie ocele (**Obrázok 17**).

steeluniversity Start Over

Secondary Steelmaking

Simulation settings User guide

User Level Step 1

Steel Grade Step 2

**Summary** Step 3

**Chosen grade**  
General purpose construction beam steel  
**Ladle steel bath mass:**  
~ 100000kg  
**Required inclusion level:**  
Moderate  
**The ladle is required at**  
Bloom Caster

**User Level**  
University Student  
**Time until ladle required at caster**  
1 hr 5 mins ±5 mins.  
**Tap temperature:**  
~ 1650°C  
**Aim temperature at caster:**  
1530-1540°C

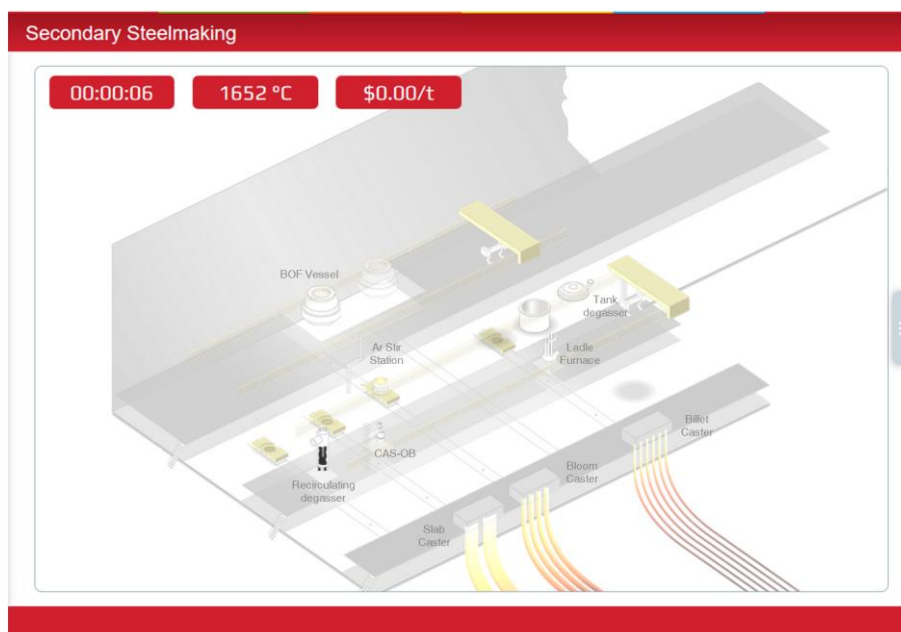
	Tap	Aim		Min	Max
C	~0.0500	0.1450	✘	0.1300	0.1600
Si	~0.0000	0.2000	✘	0.1500	0.2500
Mn	~0.1200	1.4000	✘	1.3000	1.5000
P	~0.0170	-	✔	-	0.0250
S	~0.0150	-	✔	-	0.0200
Cr	~0.0100	-	✔	-	0.1000
Al	~0.0000	0.0350	✘	0.0250	0.0450
B	~0.0001	-	✔	-	0.0005
Ni	~0.0100	-	✔	-	0.1500
Nb	~0.0000	0.0420	✘	0.0350	0.0500
Ti	~0.0000	-	✔	-	0.0100
V	~0.0000	-	✔	-	0.0100
Mo	~0.0020	-	✔	-	0.0400
Ca	~0.0000	-	✔	-	-
N	~0.0030	-	✔	-	0.0050
H	~0.0003	-	✔	-	0.0005
O	~0.0400	-	✘	-	0.0010

**START SIMULATION**

Obrázok 17 Príklad vstupného a požadovaného chemického zloženia ocele. Obsah uhlíka, mangánu, kremíka a hliníka sa musí zvýšiť, zatiaľ čo kyslík sa musí odstrániť.

#### 2.1.1.5. Usporiadanie závodu a jeho popis:

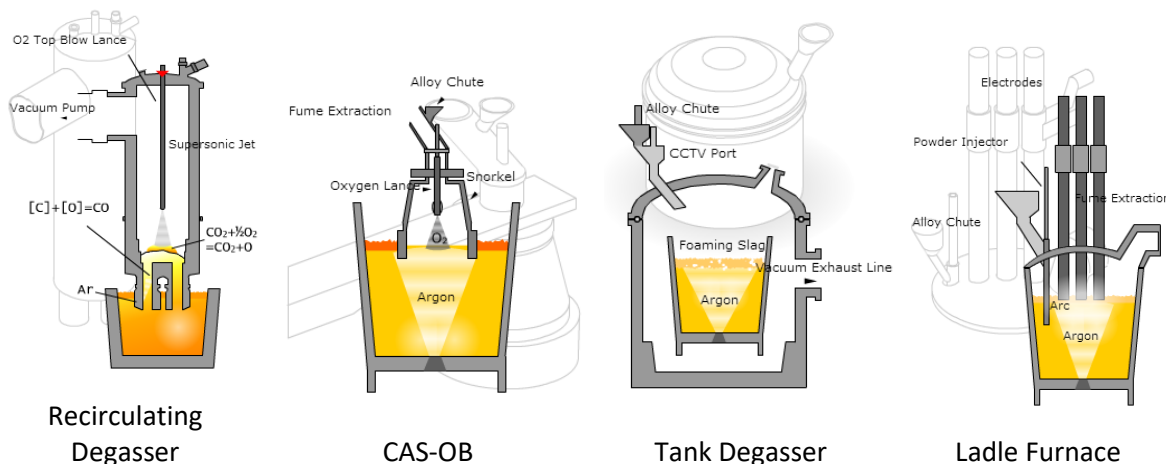
Na **Obrázok 18** je usporiadanie závodu mimopecného spracovania ocele.



Obrázok 18 Usporiadanie závodu MPO

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

Zariadenia pre mimopecné spracovanie (**Obrázok 19**) sú: argonovacia stanica (**Ar Stir Station**), prebublávacia stanica (**CSA-OB**), vákuové zariadenie RH (**Recirculating Degasser**), panvová pec (**Ladle Furnace**), vákuové odplynenie (**Tank Degasser**). V **Tabuľka 1** sa nachádza popis možností spracovania ocele na jednotlivých zariadeniach mimopecného spracovania.



Obrázok 19 Zariadenia mimopecného spracovania ocele

Tabuľka 1 Zariadenia mimopecného spracovania s možnosťami spracovania ocele

Zariadenie (Process)	Odplynenie (Degassing)	Príhrev (Reheating)	Rafinácia (Refining)
<b>RH degasser</b>	Odstránenie C, O, H (plus N ak je nízky obsah O a S)	pomocou Al + fúkanie O <sub>2</sub>	
<b>Tank Degasser</b>	Odstránenie C, O, H (plus N ak je nízky obsah O a S)		
<b>CSA-OB</b>		pomocou Al + fúkanie O <sub>2</sub>	Pridaním legujúcich prísad v inertnej atmosfére argónu
<b>Ladle Arc Furnace</b>		elektrický	



## 2.1.2. Ovládanie simulácie

Po odpichnutí ocele z kyslíkového konvertora je možnosť vybrať si zariadenie na mimopecné spracovanie ocele (**Go to**) a zvoliť si množstvo prísad (**Make additions**) pri každom spôsobe spracovania.

### 2.1.2.1. Pridávanie prísad

- Do panvy môžu byť pridané rôzne prísady v závislosti od požadovaného chemického zloženia ocele (**Make additions**).
- Množstvo každej prísady je prvotne nastavené na nulu. Pri zvolení množstva sa zobrazia náklady na použitie prísady.
- Prísady sa delia na "hlavné" a "mikro" prísady (**Obrázok 20**). Hlavné prísady sú feromangán a ferosilícium, 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.

Make Additions ✕

Alloying elements	Unit cost	Mass (kg)	Cost
Recarburizer	\$280/t	<input type="text" value="360"/>	\$101
High C Ferro-Manganese	\$490/t	<input type="text" value="70"/>	\$34
Low C Ferro-Manganese	\$840/t	<input type="text" value="280"/>	\$235
81.5% Mn @ ~67% recovery 0.65% C @ ~67% recovery 0.5% Si @ ~69% recovery 0.1% S @ ~68% recovery 0.25% P @ ~69% recovery 16.8% Fe @ ~70% recovery	\$1820/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Silicon 75	\$560/t	<input type="text" value="170"/>	\$95
Ferro-Silicon 75, high purity	\$770/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Silicon 45	\$840/t	<input type="text" value="220"/>	\$185
High C Ferro-Chrome	\$630/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Aluminum wire	\$1260/t	<input type="text" value="120"/>	\$151
Aluminum pebbles	\$2100/t	<input type="text" value="100"/>	\$210
Ferro-Boron	\$1400/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Molybdenum	\$3780/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Niobium	\$16800/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Vanadium	\$9800/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Ferro-Phosphorus	\$8400/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Nickel	\$630/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Titanium	\$7000/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Cs Si powder	\$2800/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Cs Si wire	\$1218/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Calcium beads (Injection)	\$1540/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Calcium beads (Injection)	\$5600/t	<input type="text" value="0"/>	\$0
Total			\$1012

Clear Order

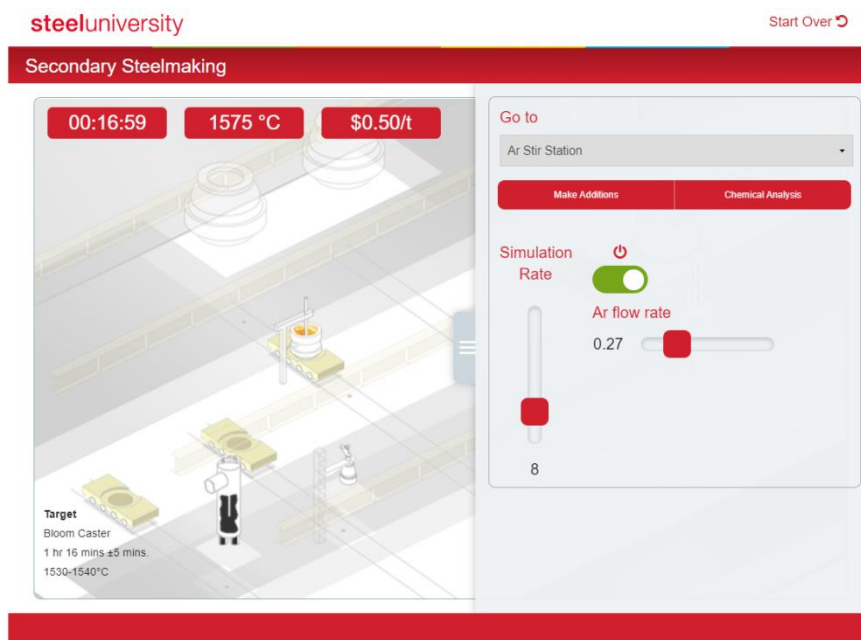
Obrázok 20 Dostupné prísady s chemickým zložením a cena za tonu prísady

### 2.1.2.2. Fúkanie argónu (Ar Stir Station)

Pred samotnou úpravou ocele v špeciálnych zariadenia sa odporúča oceľ prefúkavať inertným plynom, čím sa zvýši efektivita dezoxidácie, legovania, tepelnej a chemickej homogenizácie, odplynenia, odsírenia, odfosforenia, znižovania obsahu sprievodných prvkov a modifikácie vtrúsenín.

Keď sa panva dopraví do argónovacej stanice (**Ar Stir Station**), automaticky sa otvorí okno umožňujúce ovládať veľkosť prietoku Ar a zobrazia sa náklady na argónovanie (**Obrázok 21**). Spracovanie ocele na tejto stanici je možné ukončiť kedykoľvek, keď sa dosiahne požadované chemické zloženie.

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



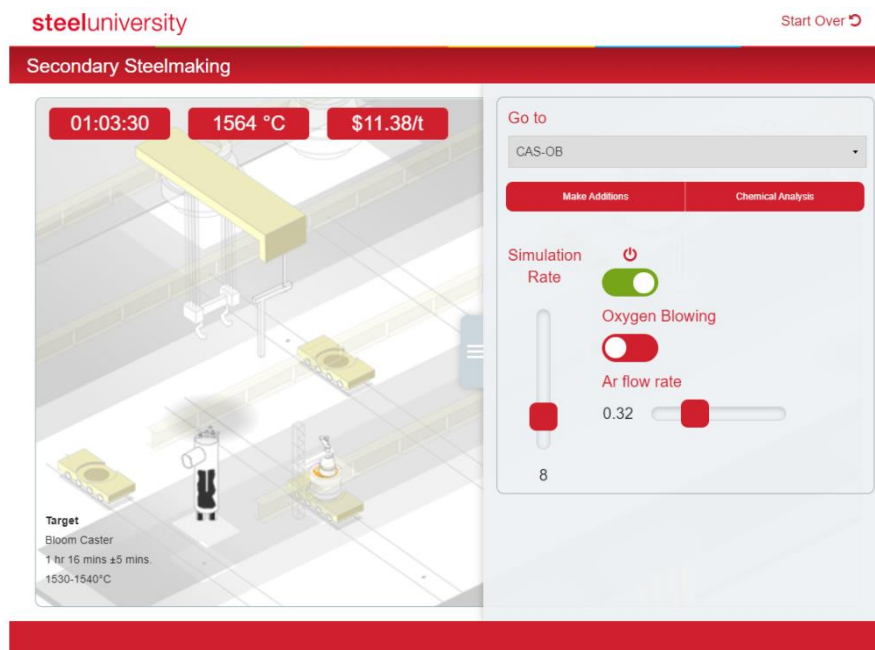
Obrázok 21 Argónovacia stanica (Ar Stir Station)

### 2.1.2.3. Fúkanie kyslíka (CAS-OB)

Keď sa panva dopraví na požadovanú stanicu (**CAS-OB**) (**Obrázok 22**), automaticky sa otvorí okno umožňujúce ovládať rýchlosť prietoku kyslíka a regulácie prietoku Ar pomocou posuvného ovládača. Náklady spojené so spracovaním na zariadení CAS-OB sú tieto:

- 30 dolárov za minútu za opotrebenie a iné spotrebné materiály,
- 0,60 dolára za  $\text{N.m}^3$  pre Ar. (t. j. 1 minúta pri  $1,0 \text{ N.m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  bude stáť 0,60 dolára).

Pri tomto spôsobe bude klesať teplota ocele až o  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ .



Obrázok 22 Prebublávacia stanica CAS-OB

#### 2.1.2.4. Vákuové zariadenie RH (Recirculating Degasser)

Pri výrobe nízko-uhlíkovej ocele je vhodné použiť vákuovacie zariadenie.

Ak už je panva na vákuovacom zariadení (**Recirculating Degasser**), je potrebné stlačiť tlačidlo napájania. Toto zariadenie umožňuje pomocou tlačidla zapnúť a vypnúť (počiatočné nastavenie - vypnuté) fúkanie kyslíka (**Oxygen Blowing**). Náklady na prevádzku zariadenia sú približne 7,75 dolárov za minútu a teplota ocele klesá až o približne  $1,0 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Opätovným kliknutím na zariadenie ukončíte proces.



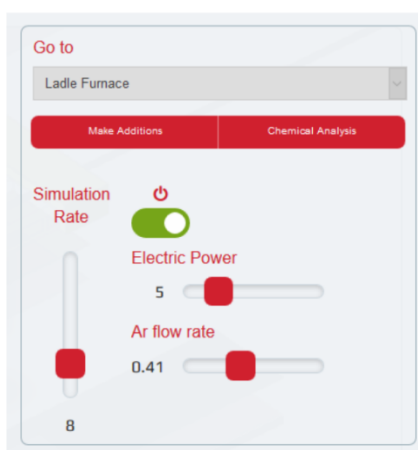
Obrázok 23 Ukážka kontrolného panela pre vákuové zariadenie RH

#### 2.1.2.5. Panvová pec (Ladle Furnace)

Ak sa panva nachádza na danom zariadení (**Ladle Furnace**), je potrebné stlačiť tlačidlo napájania. Na ovládacom paneli sa pomocou dvoch posuvných ovládačov prispôsobuje spotreba elektrickej energie a prietok Ar. Počas spracovania ocele v panvovej peci je možné zvýšiť teplotu cele.

Náklady spojené so spracovaním na tomto zariadení sú tieto:

- 16,60 dolárov za minútu za elektrinu pri maximálnom príkone 20 MW (pri nižšom nastavení výkonu sa náklady znižujú),
- 5,90 dolárov za minútu za opotrebenie elektródy pri maximálnom výkone (pri nižšom nastavení výkonu sa náklady znižujú),
- 0,60 dolára za  $\text{N.m}^3$  pre prietok Ar (t. j. 1 minúta pri  $1,0 \text{ N.m}^3.\text{min}^{-1}$  bude stáť 0,60 dolára).



Obrázok 24 Ukážka kontrolného panela pre panvovú pec

### 2.1.2.6. Vákuové odplynenie (Tank Degasser)

Na rozdiel od všetkých ostatných zariadení mimopecného spracovania, ku ktorým je panva dopravovaná, sa v tomto prípade musí panva spustiť žeriavom priamo do zariadenia (to sa robí automaticky).

Keď sa panva dopraví na požadovanú stanicu (**Tank Degasser**), automaticky sa otvorí okno umožňujúce ovládať rýchlosť prietoku Ar a požadovanú úroveň vákua pomocou posuvných ovládačov.

Náklady spojené so spracovaním sú tieto:

- 10 dolárov za minútu za spracovanie vo vákuu a opotrebenie žiaruvzdorných materiálov,
- 0,60 dolára za  $N.m^3$  pre prietok Ar (t. j. 1 minúta pri  $1,0 N.m^3.min^{-1}$  bude stáť 0,60 dolára).

Pri tomto spôsobe klesá teplota ocele o  $1,0\text{ }^{\circ}C.min^{-1}$ .



Obrázok 25 Ukážka kontrolného panela pre vákuové odplynenie

### 2.1.2.7. Chemická analýza

Chemickú analýzu pri každom spôsobe mimopecného spracovania ocele si je možné pozrieť kedykoľvek stlačením tlačidla (**Chemical Analysis**) (**Obrázok 26**). Chemická analýza ocele sa počas procesu mení, pre odobratie novej vzorky je potrebné stlačiť (**Take New Sample**). Cena za analýzu novej vzorky je 40 dolárov a výsledok sa zobrazí po 3 minútach simulácie.

**Chemical Analysis** ✕

Analysis time: 00:00:00 Ladle mass: 100532kg

	Current	Aim		Min	Max
C	0.0486	0.1450	✖	0.1300	0.1600
Si	0.0000	0.2000	✖	0.1500	0.2500
Mn	0.1236	1.4000	✖	1.3000	1.5000
P	0.0167	-	✔	-	0.0250
S	0.0149	-	✔	-	0.0200
Cr	0.0105	-	✔	-	0.1000
Al	0.0000	0.0350	✖	0.0250	0.0450
B	0.0001	-	✔	-	0.0005
Ni	0.0096	-	✔	-	0.1500
Nb	0.0000	0.0420	✖	0.0350	0.0500
Ti	0.0000	-	✔	-	0.0100
V	0.0000	-	✔	-	0.0100
Mo	0.0020	-	✔	-	0.0400
Ca	0.0000	-	✔	-	-
N	0.0030	-	✔	-	0.0050
H	0.0003	-	✔	-	0.0005

Obrázok 26 Chemická analýza

#### 2.1.2.8. Výsledky simulácie

Keď je panva dopravená na odlievacie zariadenie simulácia končí a zobrazia sa výsledky spolu s celkovými prevádzkovými nákladmi prepočítaných na tonu ocele a dodržanie požadovaných parametrov. (**Obrázok 27**).

Tiež je možné prezrieť si záznam udalostí, hlavných krokov spracovania, pridávania prísad a zásahov v simulácií (**Event Log**).

**steeluniversity**

**Secondary Steelmaking**

**Results**

**Summary of Results**

User Level		Target	
University Student			
Steel Grade			
General purpose construction beam steel			
<a href="#">Event Log</a>			
Time	01H:15M	✔	01H:14M +/-5M
Temperature	1535°C	✔	1530-1540°C
Inclusions	Very low	✔	Moderate
Caster	Bloom Caster	✔	Bloom Caster
Total Cost	19.99/t		

**Composition**

Obrázok 27 Výsledný protokol

### 2.1.3. Plánovanie programu

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

	Tap	Aim		Min	Max
C	-0.0500	0.1450	✘	0.1300	0.1600
Si	-0.0000	0.2000	✘	0.1500	0.2500
Mn	-0.1200	1.4000	✘	1.3000	1.5000
P	-0.0170	-	✔	-	0.0250
S	-0.0150	-	✔	-	0.0200
Cr	-0.0100	-	✔	-	0.1000
Al	-0.0000	0.0350	✘	0.0250	0.0450
B	-0.0001	-	✔	-	0.0005
Ni	-0.0100	-	✔	-	0.1500
Nb	-0.0000	0.0420	✘	0.0350	0.0500
Ti	-0.0000	-	✔	-	0.0100
V	-0.0000	-	✔	-	0.0100
Mo	-0.0020	-	✔	-	0.0400
Ca	-0.0000	-	✔	-	-
N	-0.0030	-	✔	-	0.0050
H	-0.0003	-	✔	-	0.0005
O	-0.0400	-	✘	-	0.0010

Obrázok 28 Príklad zloženia ocele pri odpichu a požadovaného zloženia ocele (hmot. %)

Z **Obrázok 28** 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.

#### Kľúčové otázky, na ktoré je potrebné odpovedať:

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

Chemické zloženia a ceny dostupných prísad sú znázornené na **Obrázok 20**.

Pri uvažovaní o odstraňovaní jednotlivých prvkov, je nutné zodpovedať aj na tieto otázky:

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

#### 2.1.4. Teplota

Na to, aby bola panva dopravená na ZPO so správnou teplotou, je dôležité počítať aj s účinkom rôznych procesov na teplotu ocele v panve.

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

##### 2.1.4.1. 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 [°C]:

Pre ocele s obsahom uhlíka  $C < 0.5\%$ :

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

Pre ocele s obsahom uhlíka  $C > 0.5\%$ :

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

## 2.2. Vzťahy potrebné na výpočet základných parametrov [5], [6]

### 2.2.1. Výpočet prísad potrebných pre dosiahnutie požadovaného zloženia

Prísady sa pridávajú do panvy za účelom:

- Úpravy konečného zloženia ocele.
- Dezoxidácie ocele.



- Modifikácie vtrúsenín.

### 2.2.1.1. Výpočet prísad – prvkov

Množstvo prvku, ktoré je potrebné pridať do panvy:

$$m_{additive} = \frac{\Delta \% X \times ladle\ mass}{100 \%} \quad (10)$$

kde:  $m_{additive}$  – množstvo prvku [kg],

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

Ladle mass – objem ocele v panve [kg].

### 2.2.1.2. Výpočet prísad - zliatin

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

$$m_{additive} = \frac{100 \times \Delta \% X \times ladle\ mass}{\% X\ in\ master\ alloy \times recovery\ rate\ of\ X} \quad (11)$$

kde:  $m_{additive}$  – množstvo prísady [kg],

Recovery rate of X – výťažnosť prvku X [%],

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

Ladle mass – objem ocele v panve [kg],

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

### 2.2.1.3. Odstraňovanie ďalších prvkov

Pri pridávaní hlavných prísad je dôležité mať na pamäti vplyv ďalších prvkov prísad na celkové zloženie ocele.

Množstvo odstránených prvkov sa dá určiť z nasledujúcej rovnice:

$$\Delta \% X = \frac{m_{additive} \times \% X\ in\ master\ alloy \times recovery\ rate\ of\ X}{100 \times ladle\ mass} \quad (12)$$

kde:  $m_{additive}$  – množstvo prísady [kg],

Recovery rate of X – výťažnosť prvku X [%],

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

Ladle mass – objem ocele v panve [kg],

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

#### 2.2.1.4. Čas miešania

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

- prísady, vo forme práškov, drôtov a jemných častíc, sa rozpúšťajú rýchlejšie ako hrubšie a väčšie častice, napr. tyče a pod.,
- premiešavanie ocele v panve, napr. argónom, urýchľuje proces rozpúšťania a je tiež nevyhnutné pre homogenizáciu tekutej ocele,
- prísady, pridané pri nižšej teplote bez miešania, sa budú rozpúšťať dlhšie, čo má za následok nedostatočne homogenizovanú oceľ.

#### 2.2.2. Dezoxidácia

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



Rovnovážna konštanta reakcie:

$$K_{\text{Al-O}} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{O}}^3 \cdot a_{\text{Al}}^2} \quad (14)$$

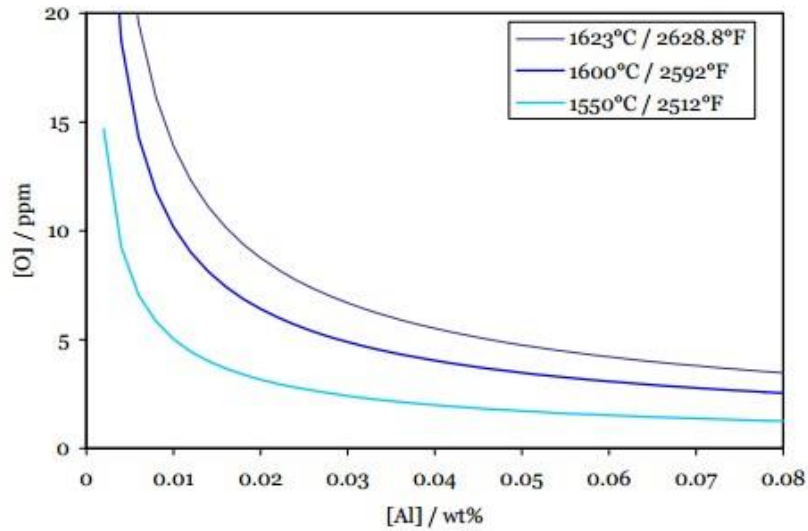
Kde:

$$\log K_{\text{Al-O}} = \frac{62.780}{T[\text{K}]} - 20.5 \quad (15)$$

Aktivita kyslíka :

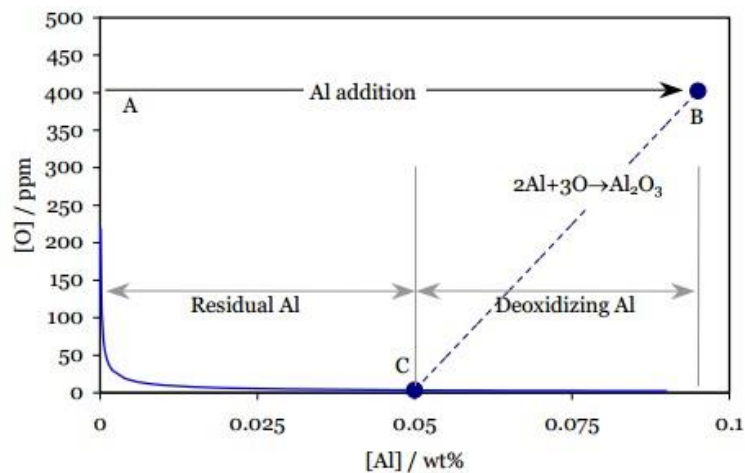
$$a_{\text{O}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 \cdot K_{\text{Al-O}}}} \quad (16)$$

Vzťah medzi  $a_{\text{O}}$  a  $a_{\text{Al}}$  je znázornený pre tri rôzne teploty na **Obrázok 29**. Z **Obrázok 29** vyplýva, že dezoxidácia hliníkom je účinnejšia pri nižších teplotách.



Obrázok 29 Al - O rovnovážne krivky pri troch rôznych teplotách

### 2.2.2.1. Výpočet celkového potrebného množstva Al



Obrázok 30 Výpočet prísady Al pri začiatočnej aktivite O

Bod A v diagrame – 400 ppm kyslíka bez prítomnosti Al

Bod B – prídavok 0,095 % Al

Keďže tieto body sa nachádzajú vysoko nad rovnovážnou krivkou Al – O, Al a O reagujú za vzniku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

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

Hmotnostné % Al potrebného na dezoxidáciu:

$$\%Al_{deox} \approx \frac{54}{48} [\%O]_{initial} \quad (17)$$

Po výpočte celkového množstva potrebného 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 dezoxidovaná pri odpichu. Stupeň výťažnosti Al 60 %, potrebný Al 0,040 %, celkové množstvo Al v prísade 98 %.

Postup:

- Al pre dezoxidáciu zo vzťahu (8) –  $(54/48) \times 0,045 \% = \mathbf{0,051 \%}$
- Prísada Al –  $\mathbf{0,040 \%}$
- Celkové množstvo potrebného Al =  $0,051 + 0,040 = \mathbf{0,091 \%}$
- Po dosadení do vzťahu (2)

$$m_{additive} = \frac{100 \times 0.091\% \times 250\,000\,kg}{98\% \times 60\%} = 386\,kg$$

### 2.2.3. Oduhličenie

#### 2.2.3.1. Termodynamika oduhličenia

Oduhličenie prebieha podľa reakcie



Rovnovážna konštanta reakcie:

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C a_O} \quad (19)$$

#### 2.2.3.2. Kinetika oduhličenia

Stupeň oduhličenia sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{equ}}{[\%C]_i - [\%C]_{equ}} \right\} = -k_C t \quad (20)$$

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 ( $\text{min}^{-1}$ ).

Po úprave vzťahu (20) dostávame finálnu koncentráciu C:

$$[\%C]_f = [\%C]_{equ} + ([\%C]_i - [\%C]_{equ}) \exp(-k_c t) \quad (21)$$

Rovnovážna konštanta pre proces RH:

$$k_c = \frac{Q}{V_b \rho} \frac{q}{\rho + q} \quad (22)$$

kde:  $Q$  – stupeň cirkulácie ( $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  
 $V_b$  – množstvo ocel. kúpeľa v panve ( $\text{m}^3$ ),  
 $\rho$  – merná hmotnosť tekutej ocele  $7200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  
 $q$  – koeficient oduhličenia ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ).

#### 2.2.4. Odsírenie

Odsírenie prebieha podľa reakcie:



**V praxi je možné odsírenie dosiahnuť:**

- pridaním syntetickej trosky obsahujúcej prevažne množstvo CaO,
- znížením aktivity kyslíka v oceli napríklad pridaním Al
- prebublávaním za účelom intenzifikácie reakcií na medzifázovom rozhraní kov – troska
- vákuovaním ocele za prítomnosti CaO

##### 2.2.4.1. Odsírenie syntetickou troskou

Na začiatku simulácie je možnosť pridanía 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Trosky s vyššou koncentráciou CaO majú vyšší rozdeľovací koeficient síry L<sub>S</sub> a sú preto účinnejšie pri odstránení S.

Teoreticky je rovnovážna koncentrácia S pre danú trosku určená vzťahom:

$$[\%S]_{equ} = [\%S]_0 \frac{\left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_S}\right)}{1 + \left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_S}\right)} \quad (24)$$

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

L<sub>S</sub> - rozdeľovací koeficient S,

W<sub>S</sub> - hmotnosť trosky (kg),

W<sub>m</sub> - hmotnosť kovu (kg).

Rovnica (24) môže byť upravená podľa potrebného množstva trosky na dosiahnutie špecifickej koncentrácie S :

$$W_S = \left(\frac{W_m}{L_S}\right) \left(\frac{[\%S]_0 - [\%S]_{aim}}{[\%S]_{aim}}\right) \quad (25)$$

## 2.2.5. Odstránenie H

### 2.2.5.1. Termodynamika

Odstránenie H z ocele prebieha podľa reakcie:



kde:

$$\log \frac{[ppm H]}{(p_{H_2})^{\frac{1}{2}}} = -\frac{1,900}{T} + 2,423 \quad (27)$$

Tabuľka 2 Vzťah medzi rovnovážnou koncentráciou rozpusteného H a parciálnym tlakom H pri 1600 °C

p <sub>H2</sub>	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.10
0.01	2.56
0.001	0.81

V praxi môžu moderné vákuovacie zariadenia dosahovať podtlak až okolo 0,001 atm., takže za optimálnych prevádzkových podmienok je možné vyrábať ocele pod 1 ppm obsahu vodíka.

### 2.2.6. Kinetika odstránenia H

Kinetika odstránenia H je vyjadrená vzťahom:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f - [H]_{equ}}{[H]_i - [H]_{equ}} \right\} = -k_H t \quad (28)$$

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 ( $\text{min}^{-1}$ ).

Finálna koncentrácia H vyjadrená zo vzťahu (28):

$$[H]_f = [H]_{equ} + ([H]_i - [H]_{equ}) \exp(-k_H t) \quad (29)$$

### 2.2.7. Elektrický ohrev

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

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (30)$$

kde: m - hmotnosť kúpeľa,

$C_p$  - merná tepelná kapacita pri konštantnom tlaku.

Teoretické zvýšenie teploty:

$$\Delta T_{th} = \frac{E}{m C_p} \quad (31)$$

Teoretická rýchlosť ohrevu:

$$\left( \frac{dT}{dt} \right)_{th} = \frac{dE}{dT} \frac{1}{m C_p} = \frac{P}{m C_p} \quad (32)$$

kde: P – výkon ohrevu.

Preto nárast teploty v čase  $\Delta t$  je daný vzťahom:

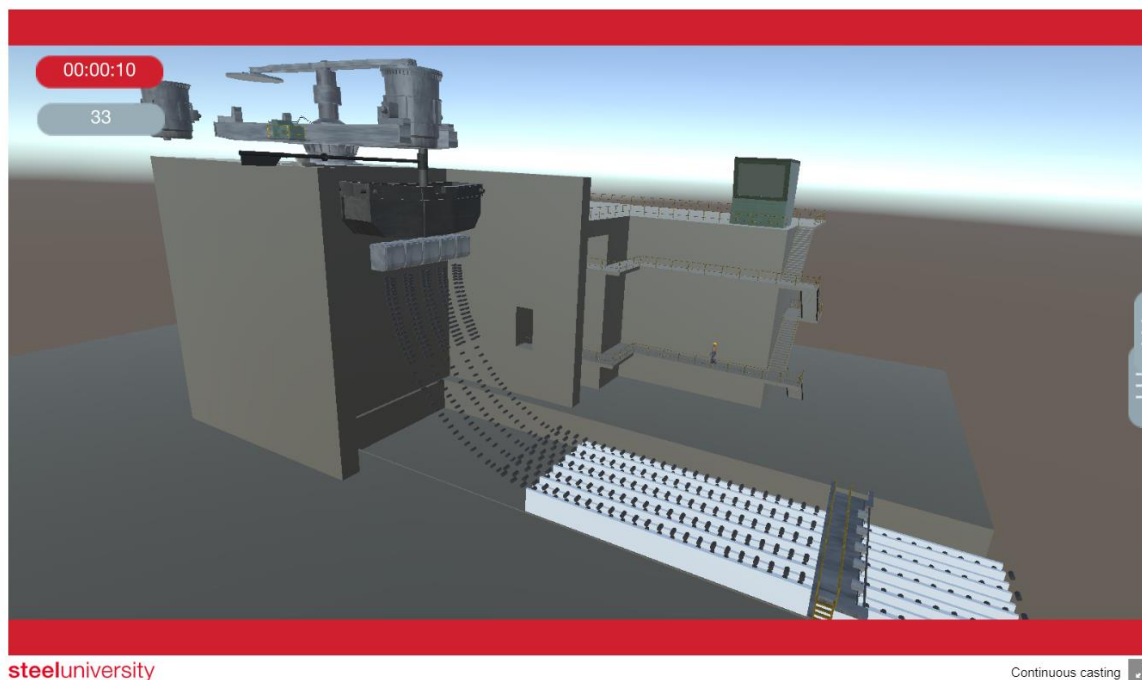
$$\Delta T_{th} = \frac{P\Delta t}{mC_p} \quad (33)$$

- ohrev ocele má menšiu účinnosť než 100%, pretože vznikajú straty tepla na elektródach, do atmosféry, v panve, cez žiaruvzdorné materiály atď.,
- $\eta$  účinnosť je definovaná ako pomer skutočného a teoretického ohrevu

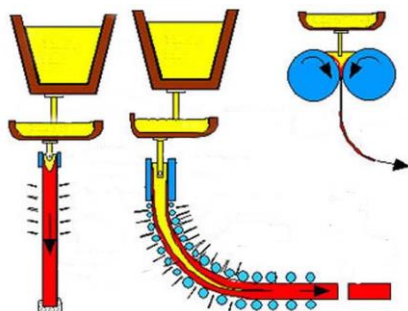
$$\eta = \frac{\Delta T_{act}}{\Delta T_{th}} \quad (34)$$



### 3. Simulácia plynulého odlievania ocele



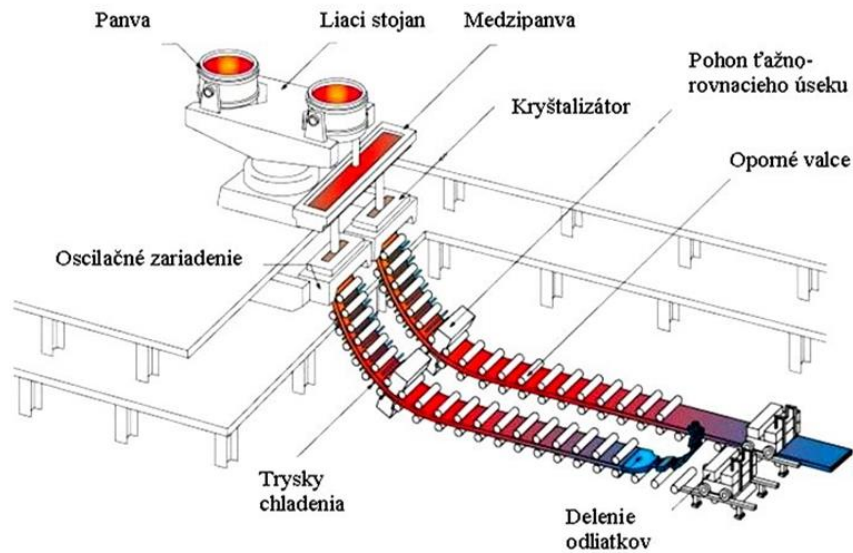
Plynulé odlievanie je jednou z najrozšírenejších revolučných oceliarských technológií, ktorá odstránila mnoho hrubých operácií s ingotmi, a tým umožnila rast ziskov oceliarní hlavne z dôvodu úspory energie a času výrobného procesu. Technológia plynulého odlievania ocele (ZPO) prešla v posledných desaťročiach značným vývojom. Vývoj bol zameraný na zvyšovanie odlievateľných objemov, komplexnosť a automatizáciu procesu, zvýšenie spoľahlivosti prevádzky, ale najmä na zvýšenie kvality odliatej ocele. Použitá technológia plynulého odlievania závisí od kvality a množstva odliavanej ocele. V súčasnosti rozoznávame tri základné spôsoby plynulého odlievania ocele – vertikálne, zakrivené a odlievanie tenkých odliatkov medzi rotujúce valce (**Obrázok 31**).



Obrázok 31 Spôsoby plynulého odlievania ocele

Hlavné časti zariadenia pre plynulé odlievanie (**Obrázok 32**) sú:

- Liaci stojan
- Liaca panva
- Medzipanva
- Kryštalizátor
- Sekundárne chladenie.



Obrázok 32 Hlavné časti dvojprúdového ZPO s kryštalizátormi bramového typu [7]

## Liaci stojan

Liaci stojan (**Obrázok 33**) má dve základné funkcie:

- umožniť rýchlu výmenu liacich panví tak, aby nedošlo k prerušeniu sekvencie vplyvom poklesu hladiny ocele v medzipanve pod určitú minimálnu hranicu,
- umožniť držanie liacej panvy nad medzipanvou počas liatia a tiež zabezpečiť prívod inertného plynu k poréznej tvárnici liacej panvy za účelom tepelnej a chemickej homogenizácie ocele počas liatia.



Obrázok 33 Liaci stojan s liacou panvou [8]

### Liaca panva

Liaca panva (**Obrázok 33**) je zariadenie používané v sekundárnej metalurgii, ako agregát na spracovanie surovej ocele, ale aj v terciálnej metalurgii ako zásobník na prepravu pre odliatie do potrebného polotovaru (bramy, sochora, bloku). Má tvar kónickej nádoby s oceľovým plášťom a žiaruvzdornou výmurovkou. Na dne je umiestnený odlievací otvor s posúvačovým uzáverom a porézna tvárnica pre prefúkavanie inertným plynom.

### Medzipanva

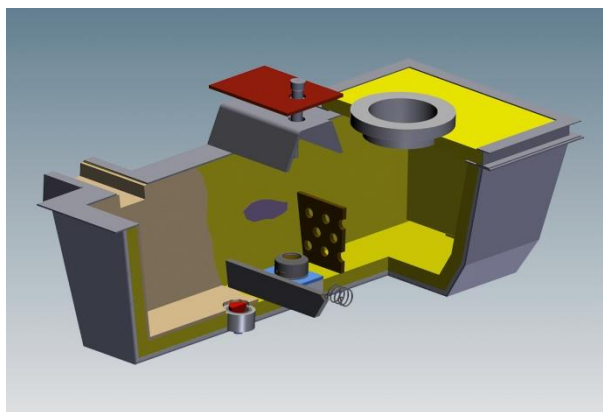
Medzipanva je jedným z kľúčových zariadení ZPO (**Obrázok 34**). Má za úlohu plniť komplex mnohých funkcií, pričom je posledným článkom výroby ocele, kde ešte je možné upraviť chemické zloženie odlievanej ocele, ktorá následne tečie do kryštalizátora.

Funkcie medzipanvy:

- transport tekutej ocele k jednotlivým liacim prúdom,
- zásobník tekutej ocele počas výmeny liacich panví,
- zníženie pôsobenia ferostatického tlaku kovu na hladinu v kryštalizátore,
- minimalizácia rozstreku liaceho prúdu (znižuje možnosť reoxidácie a naplynienia taveniny).

Úloha medzipanvy v súčasnosti už nespočíva len v základných uvedených funkciách, ale dáva i nové možnosti zvyšovania kvality vyrábaných ocelí:

- možnosť dezoxidácie, mikrolegovania a chemicko-teplotnej homogenizácie ocele,
- zvyšovanie čistoty ocele rafinačnými medzifázovými reakciami na rozhraní kov-troska.



Obrázok 34 Medzipanva [9]

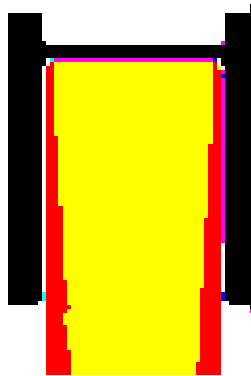
## Kryštalizátor

Kryštalizátor (**Obrázok 35**) je základnou súčasťou zariadenia plynulého odlievania. Jeho hlavnou funkciou je vytvorenie dostatočne hrubej a kvalitnej liacej kôry s tekutým jadrom pred vstupom do zóny sekundárneho chladenia. Kryštalizátor má tvar otvorenej nádoby, pričom jeho steny sú vyrobené z materiálu s vysokou tepelnou vodivosťou, napríklad z medi. Tieto steny sú intenzívne chladené vodou. Na hladinu ocele v kryštalizátore sa pridáva liaci prášok.

Funkciami liaceho prášku sú:

- ochrana hladiny ocele pred reoxidáciou,
- pohlcovanie vrúsenín,
- tepelná izolácia hladiny ocele,
- mazanie,
- rovnomerný prenos tepla medzi kovom a kryštalizátorom.

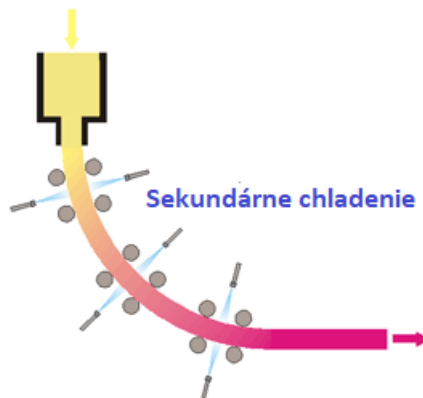
Kryštalizátor ovplyvňuje výkon a konečnú kvalitu produktov ZPO. Vhodne navrhnutým systémom chladenia stien kryštalizátora je možné dosiahnuť optimálnu hrúbku liacej kôry, teplotnú homogenitu liacej kôry a vysokú kvalitu povrchu kontodliatku. Na výkon kryštalizátora má najvýznamnejší vplyv rovnomerný odvod tepla z tuhnucej ocele.



Obrázok 35 Kryštalizátor [10]

### Sekundárne chladenie

Predliatok sa po výstupe z dna kryštalizátora dostáva do nultej sekcie sekundárneho chladenia. Nultú sekciu tvoria malé dýzy striekajúce vodu s určitým rozptylom na kontiodliatok, a tým zväčšujú hrúbku a pevnosť vytvorenej liacej kôry. Pod nultou sekciou sa nachádza prvá sekcia sekundárneho chladenia. S postupujúcou dĺžkou predliatku sa liaca kôra spevňuje a hrubne smerom do stredu. Voda vystupujúca z dýzy by nemala presahovať teplotu 40°C. Tlak chladiacej vody sa pohybuje od 5 – 7.10<sup>5</sup> Pa.



Obrázok 36 Sekundárne chladenie [11]

### Nekovové inklúzie

Prúd kovu medzi liacou panvou a medzipanvou má tendenciu rozpadáť sa vplyvom vnútorného prúdenia ocele. Tento rozpadnutý prúd intenzívne pohlcuje plyny, čo následne spôsobuje reoxidáciu ocele, najmä z dôvodu že odlievane ocele majú veľmi nízky obsah kyslíka a plynov. Na ochranu proti tomuto nežiaducemu javu sa používa ochranná trubica, ktorá je vyrobená zo

žiaruvzdorného materiálu. Medzi liacou panvou a medzipanvou sa nazýva tieniaca trubica a v uzle medzipanva - kryštalizátor ponorná výlevka.

Pri plynulom odlievaní ocele má čistota a kvalita odlievanej ocele dôležitý význam aj z hľadiska jej odlienateľnosti. Ak sa do ocele dostane kyslík, môže zreagovať s prítomnými legujúcimi prvkami za vzniku nekovových inklúzií. Tieto spôsobujú v ponornej výlevke zarastanie prilepujúcimi sa zlúčeninami najmä hlinitanmi, čo spôsobuje narušenie prúdenia kovu do kryštalizátora, jeho neusmernené prúdenie von z ponornej výlevky, a tiež možné odtrhnutie nárastu. Podľa pôvodu rozoznávame nekovové inklúzie exogénne a endogénne. Z chemického hľadiska rozoznávame inklúzie oxidické a sulfidické.

### 3.1. Nové smery v plynulom odlievaní ocele

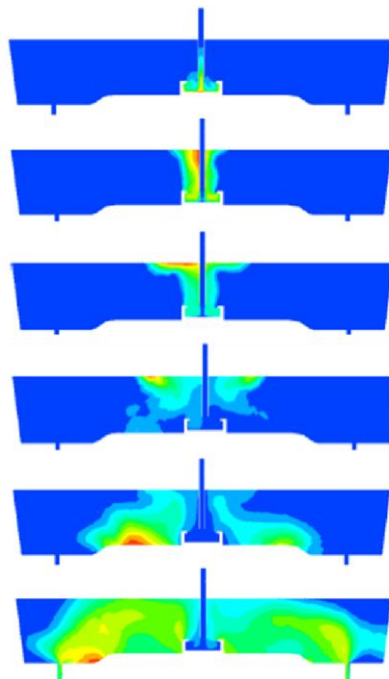
V dnešnej dobe sa vedecké výskumy sústreďujú na jednotlivé uzly ZPO a hľadajú sa nové možnosti zlepšenia kvality plynule odlievaných odliatkov znížením ich vád, vylepšením materiálov používaných na ZPO, spôsobov chladenia s ohľadom na enviromentálne vplyvy.

Nové techniky a smery v ZPO:

- vývoj rafinačných trosiek pre medzipanvu,
- vývoj liacich práškov pre kryštalizátor,
- nové materiály pre tieniace trubice a ponorné výlevky,
- plazmový ohrev v medzipanve,
- fyzikálne modelovanie procesov prúdenia ocele v laboratóriách (**Obrázok 37**),
- matematické modelovanie procesov prúdenia ocele (**Obrázok 38**).



Obrázok 37 Laboratórium simulácie procesov prúdenia [12]



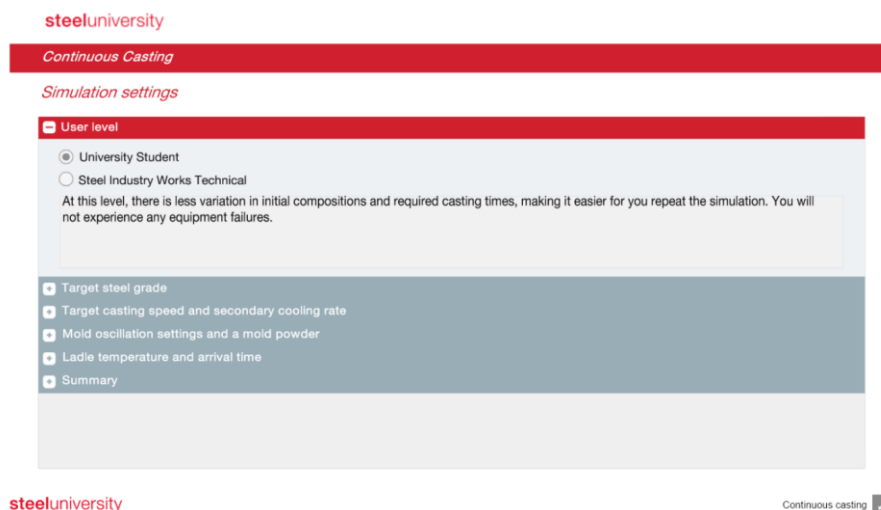
Obrázok 38 Numerické simulácie prúdenia ocele v medzipanve [13]

### 3.2. Postup pri simulácií plynulého odlievania ocele [14]

V tejto simulácii (**Continuous Casting**) je možnosť si vyskúšať úlohu metalurga závodu zodpovedného za operácie plynulého odlievania ocele. Cieľom simulácie je úspešne odliat tri liace panvy tak, aby kontodiatky spĺňali stanovené kritériá kvality povrchu, vnútornej kvality a obsahu inklúzií. Je potrebné sa zamerať aj na minimalizáciu nákladov na celú operáciu.

### 3.2.1. Nastavenie simulácie

V prvom kroku je potrebné určiť pre koho je simulácia určená (**Obrázok 39**).



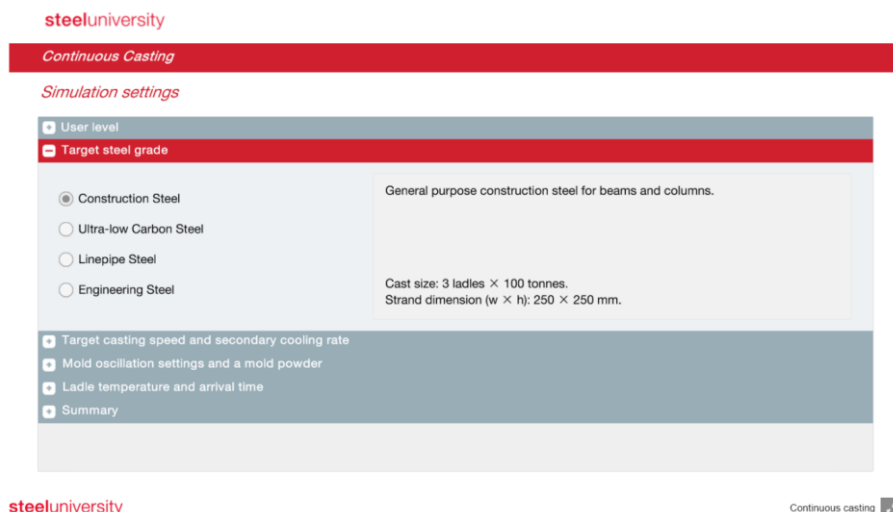
Obrázok 39 Ukážka nastavenia simulácie

V druhom kroku je potrebné si zvoliť požadovanú akosť ocele (**Obrázok 40**). Pri jednotlivých akostiach ocele je presne definované koľko panví s akou hmotnosťou sa bude odlievať a prierez odlievaného kontiodliatku.

V simulácii je možný výber 4 akostí ocele:

- **Konštrukčná oceľ** – na všeobecné použitie pre trámy a stĺpy. Odlievané množstvo 3 panvy po 100 ton. Rozmer kontiodliatku (šírka x výška): 250 x 250 mm.
- **TiNb** – nízko - uhlíková oceľ pre karosérie automobilov. Odlievané množstvo 3 panvy po 250 ton. Rozmer kontiodliatku (šírka x výška): 1200 x 230 mm.
- **Oceľ pre výrobu rúr (Linepipesteel)** - na distribúciu oleja a plynu, je veľmi náročná na úpravu, pretože vyžaduje nízky obsah nečistôt (S, P, H, O a N) a inklúzií. Odlievané množstvo 3 panvy po 250 ton. Rozmer kontiodliatku (šírka x výška): 1200 x 230 mm.
- Posledná oceľ označovaná ako **Engineering steel** má výraznejší obsah Cr a Mo a taktiež vyžaduje nízky obsah H. Odlievané množstvo 3 panvy po 100 ton. Rozmer kontiodliatku (šírka x výška): 130 x 130 mm.





Obrázok 40 Výber akosti ocele

### 3.2.2. Určenie rýchlosti odlievania a rýchlosti sekundárneho chladenia.

V treťom kroku na základe zvolenej akosti ocele je daná metalurgická dĺžka, minimálna rýchlosť odlievania a rýchlosť sekundárneho chladenia. **Tabuľka 3** obsahuje jednotlivé akosti ocele s rozsahmi hodnôt pre jednotlivé parametre. Pri zmene rýchlosti odlievania a rýchlosti sekundárneho chladenia sa zmení aj metalurgická dĺžka.

Tabuľka 3 Rôzne druhy akostí ocele a rozsahy hodnôt

Akosť ocele	Metalurgická dĺžka	Rýchlosť odlievania	Rýchlosť sekundárneho chladenia
Konštrukčná oceľ	22,48 m	1,2 – 1,8 m.min <sup>-1</sup>	0,3 – 0,6 m.s <sup>-1</sup>
Nízko uhlíková oceľ	19,03 m	1 – 2 m.min <sup>-1</sup>	0,4 – 0,8 m.s <sup>-1</sup>
Oceľ pre výrobu rúr	20,17 m	1 – 2 m.min <sup>-1</sup>	0,4 – 0,8 m.s <sup>-1</sup>
Strojárska oceľ	17,2 m	3 – 5 m.min <sup>-1</sup>	0,8 – 1,2 m.s <sup>-1</sup>

Ďalším dôležitým krokom je nastavenie oscilácie kryštalizátora a parametre liaceho prášku.

V tejto časti je potrebné nastaviť výšku zdvihu kryštalizátora, frekvenciu oscilácie kryštalizátora a druh liaceho prášku. Uvedené nastavenia ovplyvňujú ďalšie parametre, ako je viskozita liaceho prášku, negatívne stripovanie, spotreba liaceho prášku, hĺbka oscilácie a zrýchlenie kryštalizátora. Príklad nastavenia oscilácie kryštalizátora a liaceho prášku sú uvedené na **Obrázok 41**.

## Simulation settings

User level  
 Target steel grade  
 Target casting speed and secondary cooling rate  
 Mold oscillation settings and a mold powder

Stroke	3	Negative strip time	0.08 s
Frequency	210	Mold powder consumption	0.34 kg m <sup>3</sup>
Mold powder	A	Oscillation mark depth	0.15 mm
Powder viscosity	0.12 Pas	Mold acceleration	0.73 m s <sup>2</sup>

Soft reduction level  
 Ladle temperature and arrival time  
 Summary

Obrázok 41 Príklad nastavenia oscilácie kryštalizátora a liaceho prášku

Posledným krokom nastavenia je teplota ocele v liacich panvách (**Obrázok 42**) a čas príchodu jednotlivých panví na odlievanie. V tejto časti sa nastavuje počiatková teplota ocele pre jednotlivé panvy a čas príchodu druhej a tretej panvy na odlievanie.

## Simulation settings

User level  
 Target steel grade  
 Target casting speed and secondary cooling rate  
 Mold oscillation settings and a mold powder  
 Ladle temperature and arrival time

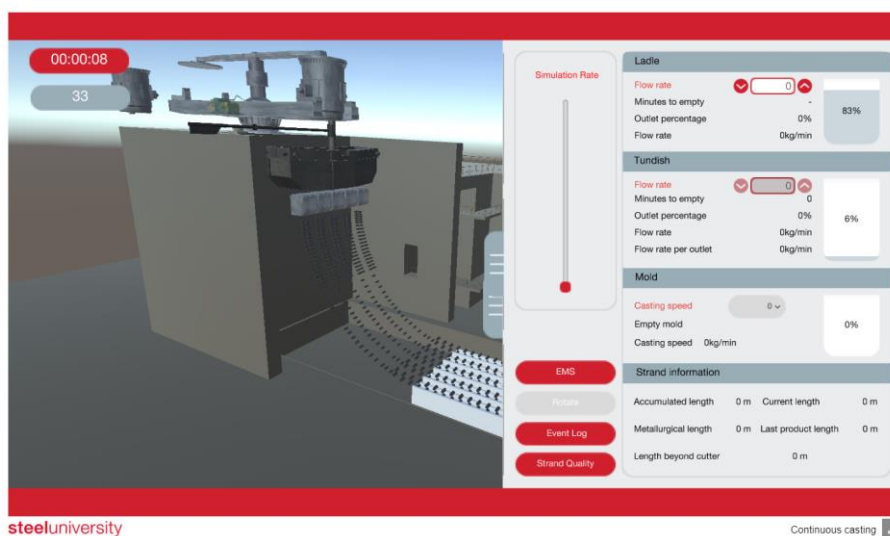
	Time of arrival (minutes)	Temperature (°C)
Ladle 1	0	1530
Ladle 2	33	1550
Ladle 3	53	1555

Summary

Obrázok 42 Ukážka nastavenia teplôt panví

Pred samotným štartom sa zobrazia všetky zadané parametre v podobe tabuľky a objaví sa tlačílo štart simulácie (**START SIMULATION**).

### 3.2.3. Pribeh simulácie



Obrázok 43 Úvodná obrazovka simulácie

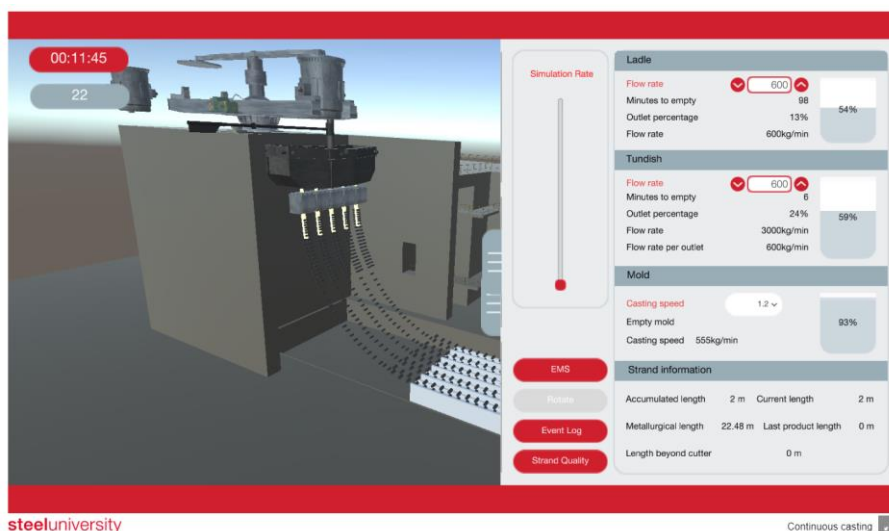
Prvým krokom po spustení simulácie (**Obrázok 43**) je nastavenie rýchlosti odlievania ocele z panvy (**Ladle**). Na riadiacom paneli je možnosť nastaviť rozsah rýchlosti odlievania od 0-5000 kg.min<sup>-1</sup>. Ďalšou informáciou v tejto časti je čas, za ktorý bude panva prázdna a percento otvorenia odtoku panvy.

V druhej časti je možné nastaviť parametre medzipanvy (**Tundish**), rýchlosť odtoku ocele do kryštalizátora, ktorý je aktívny až po dosiahnutí určitej hladiny ocele medzipanvy. Samozrejme aj v tejto časti je možné sledovať čas, za ktorý bude medzipanva prázdna a percento otvorenia odtoku medzipanvy.

Po aktivovaní tretej časti je možné nastaviť rýchlosť odlievania v kryštalizátore (**Mold**) v rozsahu rýchlosti podľa odlievanej akosti ocele v m.min<sup>-1</sup>. V tejto časti sa ešte nachádza informácia o rýchlosti odlievania v kg.min<sup>-1</sup>.

V spodnej časti riadiaceho panelu sa nachádzajú informácie (**Strand Information**) o aktuálnej odliatej dĺžke kontiodliatku, metalurgickej dĺžke a dĺžke po odrezaní.

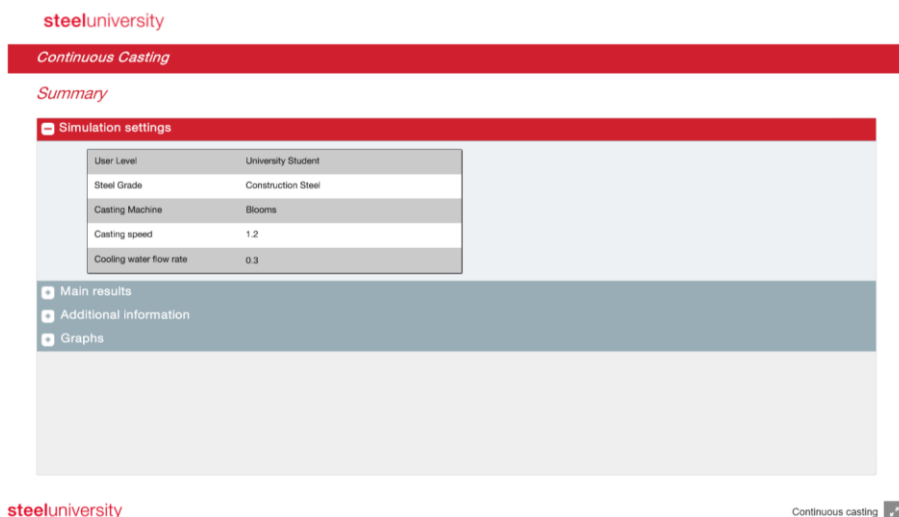
Na ľavej strane riadiaceho panelu je možné meniť rýchlosť simulácie, ale tiež je možné prezrieť si záznam udalostí a zásahov v simulácii (**Event Log**), informácie o kvalite práve odlievaného kontiodliatku (**Strand Quality**) a spustiť zariadenie elektromagnetického miešania (**EMS**) pre zlepšenie kvality štruktúry kontiodliatku (**Obrázok 44**).



Obrázok 44 Priebek simulácie

### 3.2.4. Vyhodnotenie simulácie

V tejto časti (**Simulation settings**) sú uvedené vstupné parametre, ako sú výber osoby, pre ktorú je simulácia určená, akosť odlievanej ocele, typ odlievaného kontodliatku, rýchlosť odlievania a rýchlosť sekundárneho chladenia (**Obrázok 45**).

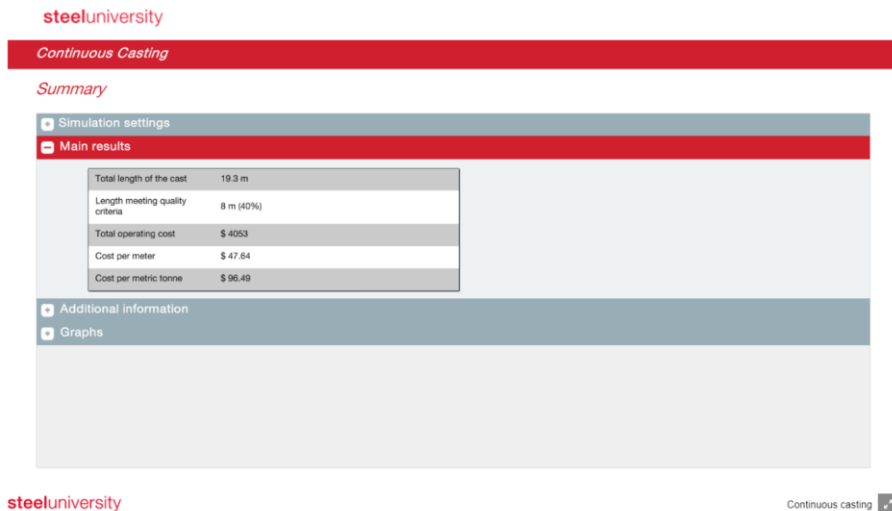


Obrázok 45 Súhrn nastavení simulácie

V časti hlavné výsledky (**Main results**) sú zhrnuté tieto parametre:

- celková odliata dĺžka,
- celková odliata dĺžka splňujúca kritéria kvality,

- celková cena,
- cena za meter odliatej ocele,
- cena za tonu odliatej ocele.

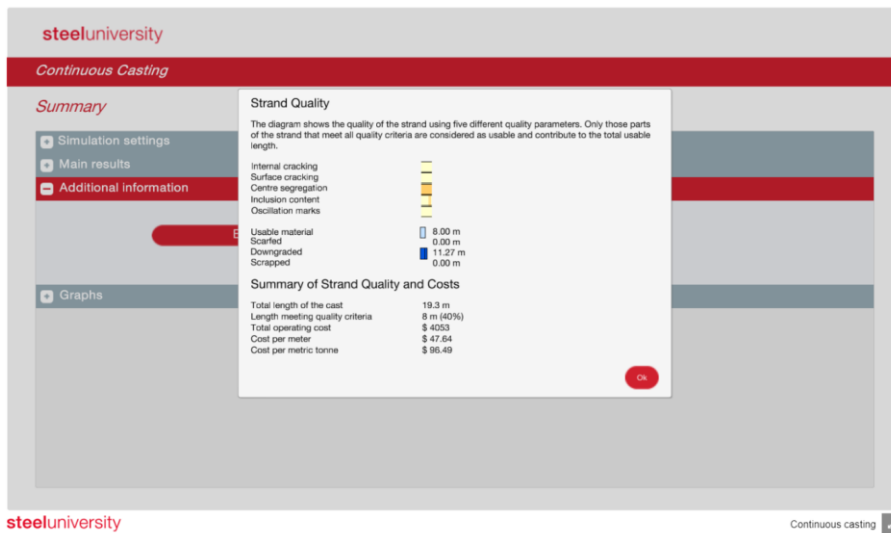


Obrázok 46 Hlavné výsledky nastavenia

V ďalšej časti je možné si pozrieť informácie o priebehu celej simulácie (**Obrázok 47**) a kvalite kontodliatku (**Obrázok 48**).

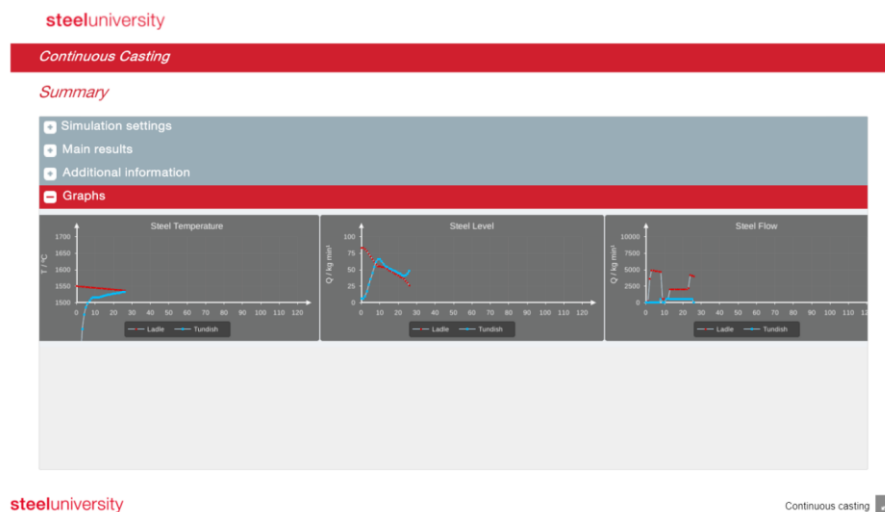


Obrázok 47 Záznam informácií o simulácii



Obrázok 48 Záznam o kvalite kontiodliatku

Pre zobrazenie priebehov teploty ocele, hladiny ocele a prúdenia ocele počas celej simulácie sú k dispozícii aj grafy (Obrázok 49).



Obrázok 49 Grafické zobrazenia rôznych parametrov simulácie

## Zoznam použitej literatúry

- [1]. Steeluniversity [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://steeluniversity.org>
- [2]. Peter Demeter, Výroba ocele v kyslíkovom konvertore, 2004 [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <http://www.vyrobaoccele.szm.com/>
- [3]. Steeluniversity, Basic Oxygen Steelmaking Simulation, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://steeluniversity.org/product/basic-oxygen-steelmaking-simulation/>
- [4]. Steeluniversity, Secondary Steelmaking Simulation, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://steeluniversity.org/product/secondary-steelmaking-simulation/>
- [5]. Steeluniversity, Secondary steelmaking simulation, User Guide, Version 2. [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: [https://s18489.pcdn.co/wp-content/uploads/2017/11/SSM\\_User\\_Guide\\_EN\\_v02.pdf](https://s18489.pcdn.co/wp-content/uploads/2017/11/SSM_User_Guide_EN_v02.pdf)
- [6]. Branislav Buľko, Jozef Kijac, Peter Demeter: Návody na cvičenia z predmetu OCELIARSTVO, 2014, s. 90
- [7]. Continuos casting, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <http://www.geocities.ws/ahmsatech/ColCont.html>
- [8]. Continuous Casting Machinery Equipment,[online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <http://rerollingmillccm.com/index.php/product/index/g/e/id/4.html>
- [9]. Continuous casting tundish, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <http://www.purmetall.de/en/Aggregate/Stranggiessverteiler>
- [10].SERT METAL, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://www.sert-metal.com/content/solutions-continuous-casting>
- [11].Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <http://heatlab.fme.vutbr.cz/continuouscasting.htm>
- [12].Branislav Buľko, Peter Demeter: Laboratory of simulation of flow processes, 2018 [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://ohaz.umet.fmmr.tuke.sk/lsp/index.html>
- [13].Peter Demeter, Branislav Buľko: Laboratory of numerical simulations of metallurgical processes, 2018 [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://ohaz.umet.fmmr.tuke.sk/lsp/index.html#treti>
- [14].Steeluniversity, Continuous Casting Simulation, [online], [2019.22.06], Dostupné na internete: <https://steeluniversity.org/product/continuous-casting-simulation/>

**NÁZOV:** Online simulácie výroby, spracovania a odlievania ocele na platforme Steeluniversity.org  
(Návody na cvičenia)

**AUTORI:** Demeter Peter, Buľko Branislav, Demeterová Petra

**VYDAVATEĽ:** Technická univerzita v Košiciach

**ROK:** 2019

**VYDANIE:** prvé

**NÁKLAD:** 50 ks

**ROZSAH:** 63 strán

**ISBN:** 978-80-553-3384-7