



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NEKONVENČNÍ METALURGICKÉ POCHODY A TAVICÍ AGREGÁTY

UNCONVENTIONAL METALLURGICAL PROCESSES AND MELTING EQUIPMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Dvořák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Dvořák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Nekonvenční metalurgické pochody a tavicí agregáty**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Při výrobě oceli a speciálních slitin se často využívají nekonvenční způsoby tavení a rafinace kovu umožňující dosažení vyšších užitečných vlastností vyráběného materiálu. Jejich použití je spojeno s vyššími náklady, a proto jsou uplatňovány jen v případech, ve kterých není možné běžnými metalurgickými pochody zajistit požadované vlastnosti materiálu a finálního produktu.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je provést popis jednotlivých nekonvenčních způsobů metalurgického zpracování oceli a speciálních slitin.

### **Seznam literatury:**

Šenberger, J., Záděra, A., aj. (2008): Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 311 s. ISBN: 978-80-214-3632-9.

Martínek, L., Šenberger, J., aj. (2006): Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárenství, roč. 54, č. 6, s. 218–221.

Minisandram, R.-S. (2007): Experimental Observations on the Effects of Stirring on pools during Vacuum Arc Remelting. In: Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Nancy – France, p. 19-24.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je odbornou rešerší, popisující nekonvenční metalurgické pochody a tavicí agregáty. Je vysvětlen princip každého pochodu a jeho případné možnosti a použití.

## **Klíčová slova**

Vakuum, přetavování, rafinace, krystalizátor, kelímek, struska, ingot

## **Abstract**

Bachelor's thesis is a technical summary describing the unconventional metallurgical processes and melting equipment.

## **Key words**

Vacuum, remelting, refining, crystallizer, crucible, slag, ingot

## **Bibliografická citace práce**

DVOŘÁK, J. *Nekonvenční metalurgické pochody a tavicí agregáty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma nekonveční metalurgické pochody a tavicí agregáty vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. 5. 2016

.....  
Jan Dvořák

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a své rodině za vytrvalou podporu při studiu.

## Obsah:

Abstrakt .....	10
Bibliografická citace práce .....	11
Prohlášení .....	12
Poděkování .....	13
Úvod .....	10
1 Vakuová technika .....	11
1.1 Transportní vývěvy .....	11
1.1.1 Mechanické vývěvy .....	11
1.1.2 Vývěvy na základě přenosu impulsu .....	13
1.2 Sorpční vývěvy .....	13
1.3 Měření vakua .....	14
2 Vakuové indukční pece .....	16
2.1 Princip a použití .....	16
2.2 Konstrukce .....	16
2.2.1 Jednokomorové pece .....	18
2.2.2 Dvoukomorové pece .....	19
2.2.3 Vakuové indukční pece s vodou chlazeným měděným kelímkem .....	19
2.3 Výrobci indukčních pecí .....	20
2.4 Postup tavby indukční pece hutního typu .....	21
2.5 Postup práce indukční pece slévárenského typu .....	21
3 Elektrostruskové přetavování .....	22
3.1 Princip a použití .....	22
3.2 Konstrukce pece a krystalizátoru .....	23
3.2.1 Přetavování pod zvýšeným tlakem .....	25
3.2.2 Přetavování pod ochrannou atmosférou .....	26
3.2.3 Přetavování za sníženého tlaku .....	27
3.3 Výrobci elektrostruskových pecí .....	27
3.4 Technologický postup elektrostruskového přetavování: .....	28
3.4.1 Příprava pece k tavně a zapálení pochodu .....	29
3.4.2 Odtavování elektrody a tvorba ingotu .....	30
4 Vakuové obloukové pece .....	31
4.1 Princip a použití .....	31



4.2	Konstrukce.....	32
4.2.1	Vakuové obloukové pece hutní.....	32
4.2.2	Vakuové obloukové pece slévárenské.....	32
4.2.3	Vakuové obloukové pece s vodou chlazeným měděným kelímkem.....	32
4.3	Výrobci vakuových obloukových pecí.....	33
5	Vakuové elektronové pece.....	35
5.1	Princip a použití.....	35
5.2	Konstrukce.....	36
5.3	Výrobci vakuových elektronových pecí.....	37
	Závěr.....	38
	Seznam použité literatury:.....	39

## Úvod

Metalurgie je pojem, který zahrnuje celou řadu procesů od získávání kovů, po jejich oddělování až po jejich rafinaci. Tedy čištění a odstraňování nežádoucích prvků. Pokud se zaměříme na výrobu ocelí a slitin, můžeme agregáty pro jejich výrobu rozdělit na klasické agregáty a nekonvenční agregáty a pochody. [5]

Mezi klasické agregáty patří indukční pec a elektrická oblouková pec. Indukční pec pracuje na principu elektromagnetické indukce. K indukčnímu ohřevu dochází působením magnetického pole, které vzniká v indukční cívce průchodem střídavého proudu. Jestliže se v magnetickém poli nachází elektricky vodivý materiál, indukuje se v něm elektrické napětí. Indukované napětí ve vodiči vyvolá vířivé proudy, které těleso ohřívají.

V elektrické obloukové peci se vsázka taví elektrickým obloukem, který hoří mezi elektrodami nebo oblouk hoří mezi elektrodou a vsázkou. Elektrická oblouková pec i indukční pec slouží převážně k výrobě ocelí.

Ale protože existují slitiny, které obsahují prvky s vysokou afinitou ke kyslíku, např. niklové slitiny, tak se na vzduchu pomocí klasických agregátů tavit nemohou.

Proto není jiná možnost než slitiny snadno reagující s kyslíkem tavit ve vakuu nebo v ochranné atmosféře inertního plynu. Z toho plyne potřeba nových, nekonvenčních agregátů pro získání těchto slitin nebo ocelí vyšší jakosti.

Vakuová indukční pec pracuje na podobném principu jako ta klasická, ale za použití vakua. Vakuová indukční pec se používá pro výrobu vysokolegované žáruvzdorné a korozivzdorné oceli. A slouží pro výrobu odlitků ze slitin niklu.

Vakuová elektrická oblouková pec pracuje také na principu elektrického oblouku ale za použití vakua nebo ochranné atmosféry. Vakuová elektrická pec se používá pro výrobu vysoce legované oceli, slitiny titanu a zirkonia.

Mezi nekonvenční pochody se řadí také elektrostruskové přetavování. Princip je založen na odtavování elektrody přehřátou struskou. Vysoce jakostní materiál z elektrostruskového přetavování se používá pro výrobu odlitků užívaných v letectví a v jaderném průmyslu.

V neposlední řadě se dnes používá i vakuové elektronové tavení, které je založeno na roztavení vsázky elektronovým paprskem. Vakuová elektronová pec odstraňuje problém, který spočívá ve styku taveniny s vyzdívkou.

Existují i jiné pochody, třeba tavení plazmou, ale výše uvedené nekonvenční agregáty a pochody převládají.

# 1 Vakuová technika

Vakuum je označení stavu, ve kterém jsou plyny nebo páry pod tlakem menším než je tlak atmosférický. Vakuový systém se musí nepřetržitě čerpat, aby se v něm udržel požadovaný nízký tlak. Obtíž při získávání vakua je zamezení pronikání molekul okolní atmosféry do vakuového systému. V praxi se vakuum získává pomocí systému vývěv. [1]

Hlavní parametry charakterizující vývěvy:

- čerpací rychlost-udává objem plynu čerpaný za určitou dobu
  - mezní tlak-nejnižší tlak, kterého lze danou vývěvou dosáhnout v čerpaném objemu
- Při mezním tlaku většiny vývěv je čerpací rychlost nulová. [2]

Podle principu se vývěvy dělí:

- transportní vývěvy-mají vstup a výstup, proto odvádějí plyn z čerpaného prostoru
- sorpční vývěvy-mají pouze vstup, plyn vážou uvnitř vývěvy, nepřenáší jej ven

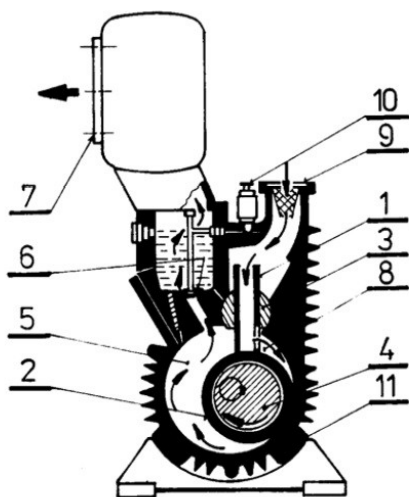
Metalurgická zařízení využívají ve velké míře jen transportní vývěvy. [1]

## 1.1 Transportní vývěvy

- mechanické-snížení tlaku se dosahuje zvětšením objemu plynu, který je vytlačován pohybujícím tělesem
- na základě přenosu impulsu-molekulám plynu se udílí rychlost ve směru čerpání
- adsorpčně transportní-ve vakuové metalurgii se nepoužívají
- akomodačně efúzní- ve vakuové metalurgii se také nepoužívají

### 1.1.1 Mechanické vývěvy

- rotační olejová-princip činnosti rotačních vývěv je založen na opakovaném mechanickém zvětšování a zmenšování pracovního prostoru vývěvy rotujícím tělesem. Aby se utěsnily malé mezery mezi pevnými a pohyblivými částmi vývěvy, ponoří se zařízení do oleje. Olej slouží zároveň jako mazadlo. Mezní tlak rotačních olejových vývěv bývá v rozsahu  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  Pa [2, 3]

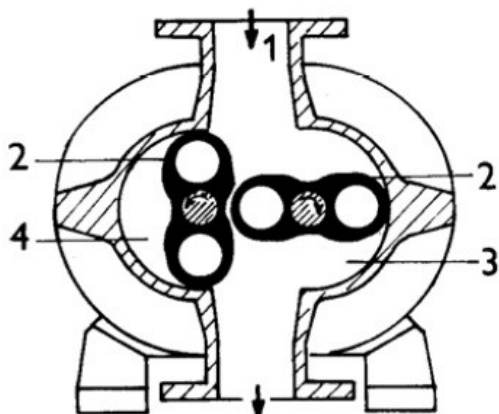


**Obr. 1:** Schéma rotační olejové vývěvy s kolujícím rotorem [1]

Schéma rotační olejové vývěvy je na **obr. 1**-šoupátko (1) je pevně spojeno s dutým válcem rotoru (2) a klouže v kloubu (3). Ten se může natáčet v rozmezí malého úhlu vzhledem ke statoru. Válec rotoru se uvádí do pohybu excentrem (4). Při otáčení excentru vytlačuje rotor plyn z části komory (5) přes výfukový ventil (6) do výstupu (7). Současně s tím se naplňuje postupně se zvětšující komora (8) plynem ze vstupu (9). Dutý válec je při pohybu v tělese těsněn a zároveň mazán olejem. Zvláštním ventilem (10) se přivádí vzduch, aby se zabránilo kondenzaci par. Pohyb pístu je nahrazen rotačním pohybem [1]

- trochoidní olejová-jednostupňová vývěva, která je těsněná olejem a pracuje na principu motoru s rotujícím pístem

Rotační olejové vývěvy jsou určeny pro zahájení čerpání vakuového systému při atmosférickém tlaku. U vícestupňových systémů vývěv tvoří 1. stupeň. Jejich úkolem je vytvoření vakua nezbytného pro činnost dalších typů vývěv. Nevýhodou je vniknutí oleje do čerpaného prostoru. [3]



**Obr. 2:** Řez Rootsovou vývěvou 1-sací hrdlo, 2-rotory, 3-stator, 4-čerpací prostor [1]

- suchá rotační vývěva Rootsova-řez tohoto typu vývěvy je na **obr. 2**-vývěva má dva rotory (2). Mezi rotory a stator (3) jsou malé mezery, proto nepotřebují mazání. Pro práci těchto vývěv je nutné vytvořit vakuum v řádu stovek Pa [1, 3]

Vývěvy se řadí do několika stupňů, protože každý typ vývěvy potřebuje pro svou činnost tlak o jiné hodnotě. V prvním stupni je rotační olejová vývěva, která se z atmosférického tlaku dostane na cca 1000 Pa. Až ve druhém stupni sepne Rootsova vývěva, která jede do cca desítek Pa. Teprve posledním stupněm je vývěva difúzní, která je schopna vytvořit vakuum v jednotkách Pa. [1, 2]

### 1.1.2 Vývěvy na základě přenosu impulsu

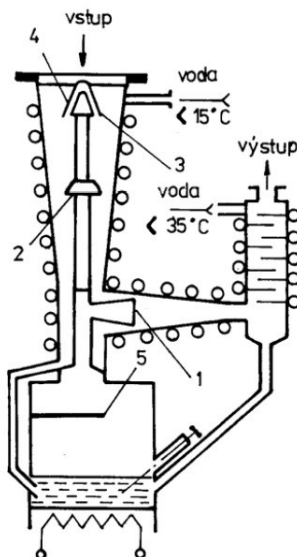
- parní ejektorové-zpravidla dvoustupňové a pracují s vodní párou
- olejové ejektorové-pracují s parami oleje a používají se při použití vysokého vakua
- difúzní

Ejektorové vývěvy pracují ve spojení s difúzní vývěvou. Ve vícestupňovém systému se ejektorové vývěvy řadí mezi rotační a difúzní. [2]

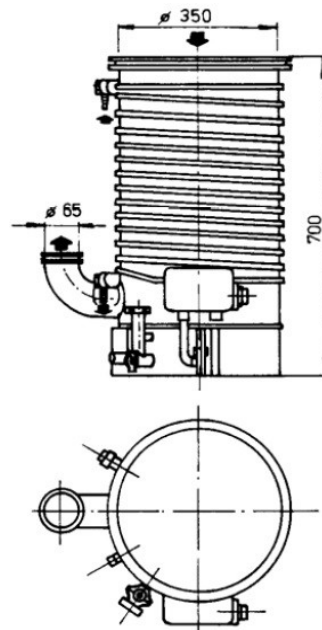
### Difúzní vývěvy

Difúzní vývěvy pracují na principu difúze vodní páry nebo par oleje. Molekuly čerpaného plynu dopadají na povrch proudu par a difundují do něj. Tlak na výstupu této vývěvy musí být v jednotkách až desítkách Pa. [1]

V metalurgii se používají hlavně olejové difúzní vývěvy, viz **obr. 3, 4**.



**Obr. 3:** Řez difúzní olejovou vývěvou s ejektorovým stupněm  
1-ejektorová tryska, 2,3-difúzní trysky, 4-lapač olejových par  
[1]



**Obr. 4:** Difúzní vývěva DI 6000 firmy LEYBOLD [1]

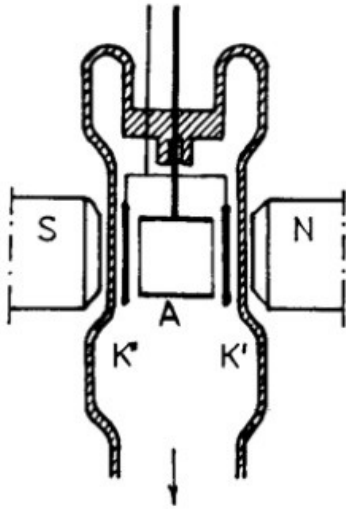
## 1.2 Sorpční vývěvy

Plyn z čerpaného prostoru neodvádějí, ale vážou jej různým způsobem uvnitř vývěvy. [1]

- kryogenní-vývěvy, které využívají fyzikální adsorpci (využívají procesy, které probíhají za velmi nízkých teplot)
- vývěvy, které využívají chemické vazby plynů s povrchem pevných částic [3]



## Ionizační vakuometry



Obr. 7: Princip měření ionizačním vakuometrem [1]

Celkový tlak plynu je měřen nepřímou metodou, která je založená na ionizaci plynů. Molekuly plynů získávají elektrický náboj a měří se procházející proud, viz **obr. 7**. Vakuometr je tvořen anodou A a katodami K' a K'' na tvaru kruhových terčů. Magnetické pole permanentního magnetu působí kolmo na osu systému elektrod. Systém elektrod působí vznik kmitavého pohybu elektronů. Elektrony dopadají na anodu a díky prodloužené dráze umožňují udržet výboj tlaků  $10^{-6}$  Pa. Ionizační vakuometry se používají pro měření vysokého vakua v rozsahu  $5 \cdot 10^{-1}$  Pa až  $5 \cdot 10^{-6}$  Pa. [1, 2]

Dnes nestačí znát pouze celkové tlaky, je potřeba znát i složení plynů a tlaky složek (tzv. parciální tlaky). Složení plynů udává tzv. čárové spektrum tlaků. K tomu se používají hmotnostní spektrometry. [1, 3]

## 2 Vakuové indukční pece

### 2.1 Princip a použití

Pece pracují na principu elektromagnetické indukce. K indukčnímu ohřevu dochází působením magnetického pole, které vzniká v indukční cívce průchodem střídavého proudu. Jestliže se v magnetickém poli nachází elektricky vodivý materiál, indukuje se v něm elektrické napětí. Indukované napětí ve vodiči vyvolá vířivé proudy, které těleso ohřívají. [5]

Je několik konstrukčních typů, které se dělí podle různých hledisek. Existují pece, které taví ve vakuu, ale i pece, které ve vakuu taví i odlévají. Všechny spojuje společný princip činnosti, využívají indukční způsob tavení. [4, 5]

Používají se pro tavení některých typů ocelí, zejména pro vysokolegované žáruvzdorné a korozivzdorné oceli. Slouží pro výrobu odlitků ze slitin niklu. Jsou používány také pro titanové slitiny, kde se používají i jiné typy pecí s jiným typem kelímku. [6]

Dnešní použití vakuových indukčních pecí:

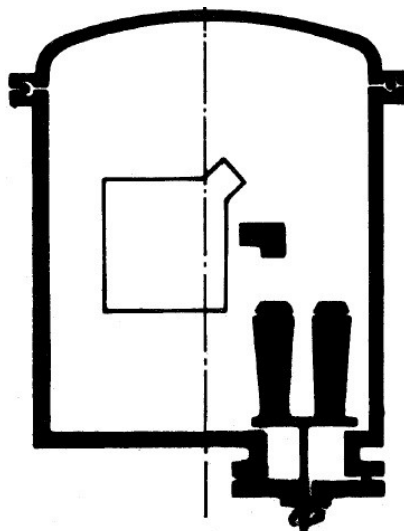
- odlévání ingotů pro další zpracování tvářením
- odlévání odlitků metodou přesného lití vytavitelným modelem
- odlévání ingotů pro další použití jako vsázka pro přetavení ve vakuových obloukových pecích indukčních, elektronových nebo pro elektrostruskové přetavení

### 2.2 Konstrukce

Vakuové indukční pece se z hlediska technologie tavení dělí na:

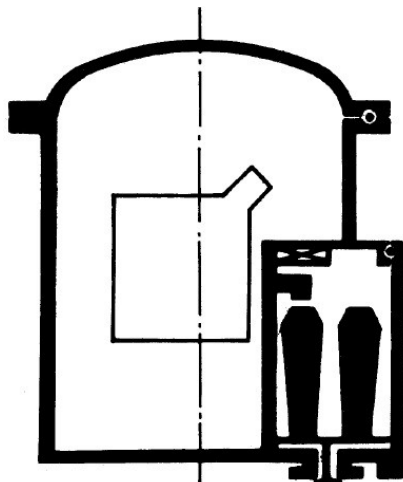
- **hutní**
- **slévárenské**

Hutní pece jsou určeny k tavení primárních slitin, které mohou být použity pro výrobu odlitků nebo ingotů. Ale v některých případech materiál slouží jako vsázka pro další způsoby zpracování. Probíhá zde metalurgický proces. S využitím uhlíkové reakce se zvyšuje čistota taveniny (snižuje se množství vměstků). Pece hutní mohou být různé konstrukce. Vyrábí se jednokomorové, schéma jednokomorové pece je na **obr. 8**, dvoukomorové, schéma dvoukomorové pece je **obr. 9** i vícekomorové. Pece hutního typu mají obsah kelímku 250 kg až několik tun. [4, 7]



**Obr. 8: Jednokomorová vakuová indukční pec hutního typu [3]**





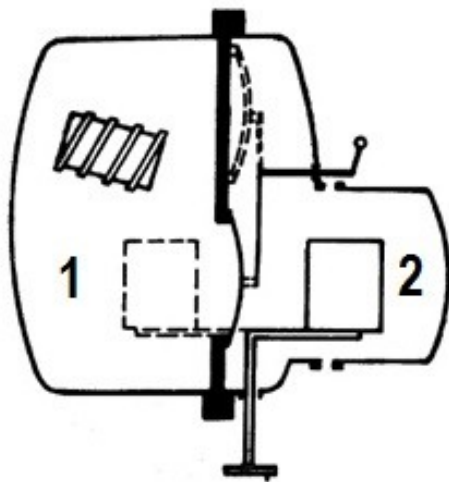
Obr. 9: Dvoukomorová vakuová indukční pec hutního typu [3]

Slévárenské pece slouží jen k přetavení vsázky. Pece jsou konstruovány tak, aby měly vysoký výkon, aby fáze tavení byla co nejkratší. Neprobíhají zde žádné metalurgické operace, ty proběhly při výrobě primární vsázky. [8]

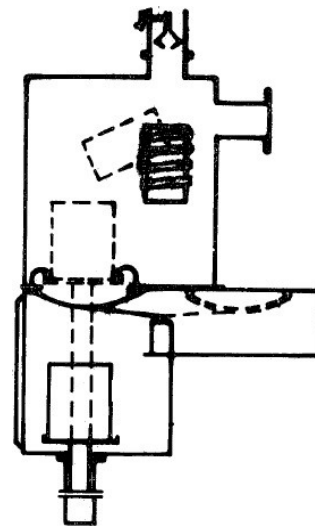
Konstrukce slévárenské pece musí zajistit vsazení do kelímku pod vakuem a přísun forem ke kelímku k lití v tavicí komoře. Generátor pece má vysoký výkon (4-10 kW/kg). Pro pece s obsahem 20 kg má generátor výkon až 200 kW. Rychlost tavení je vysoká, 1,2-2,8 kg/min a používané vakuum je řádově  $1 \cdot 10^{-2}$  Pa. [4, 8]

Používají se dva typy slévárenských pecí. První typ je na obr. 10, má dvě horizontální komory. Tavicí komora 1 s kelímkem je pevná a má vakuový uzávěr. Kokilová komora 2 má dveře pro vkládání forem a otočný stůl pro jejich dopravu k lití. [4]

Druhý typ slévárenské pece je na obr. 11, má také dvě komory, ale tentokrát jsou uspořádány vertikálně. Plnou čarou je znázorněno umístění formy při zakládání. Čerchovanou čarou je stav při odlévání. Forma vyjede nahoru, otevře se tlakový uzávěr a provede se lití. Tavicí komora je od kokilové oddělena vakuovým uzávěrem. Obě komory mají dveře a forma se k lití dopravuje hydraulicky. [8]



Obr. 10: Dvoukomorová vakuová indukční pec slévárenského typu s horizontálním uspořádáním komor [4]



Obr. 11: Dvoukomorová vakuová indukční pec slévárenského typu s vertikálním uspořádáním komor [4]

Vakuové indukční pece se z technologického hlediska dělí na:

- jednokomorové-pece pracující periodicky
- dvoukomorové-pece pracující nepřetržitě

U pece pracující periodicky je po každé tavbě provedeno zavzdušnění vakuové komory, ta je otevřena a je z ní vyjmuta odlitá forma nebo kokila.

U pece pracující nepřetržitě je tavba prováděna bez zavzdušňování tavící komory. [4, 10]

### 2.2.1 Jednokomorové pece

Odlévání a tavení se děje v jednom společném prostoru, ve vakuové komoře. Otevře se víko pece, nasadí se vsázka, vyjmou se formy, popřípadě kokily. Víko pece se uzavře, vakuuje se prostor komory a provede se natavení. Po roztavení se kov odlíje do formy, která je v komoře připravená. Po každé tavbě je provedeno zavzdušnění vakuové komory, následuje otevření a vyjmutí odlité kokily nebo formy. Jednokomorové pece různého typu jsou na **obr. 12, 13**. [4, 8]



**Obr. 12:** Jednokomorová horizontální vakuová indukční pec hutního typu firmy Consarc [8]



**Obr. 13:** Jednokomorová vertikální vakuová indukční pec hutního typu firmy Consarc [8]

### 2.2.2 Dvoukomorové pece

Pro průmyslové použití jsou preferovány dvoukomorové pece. Schéma dvoukomorové pece je na **obr. 9**, viz výše. Pec se nemusí zavzdušňovat při vkládání, protože má oddělené vakuové prostory. Jsou to pece, které mají induktor a licí zařízení v jednom prostoru. Vsázka se plní přes vsázeční zařízení pomocí vakuového uzávěru. Tavba probíhá ve vakuu tavící komory, zatímco v kokilové komoře se provádí výměna kokil nebo forem. Pece nebo kokily se umísťují přes vakuový uzávěr z kokilové komory do tavící komory. Pomocí vývěv se provede odsátí přídatné komory na vakuum. Po vyrovnání tlaků se otevře vakuový uzávěr, vloží se vsázka nebo se odlije kov do připravené kokily. [4]

Dvoukomorové mají vyšší produktivitu, protože se víko pece nemusí otvírat před každou tavbou a tím netrpí vyzdívka kelímku. Materiály této tavby mají nižší obsah kyslíku. [4, 10]

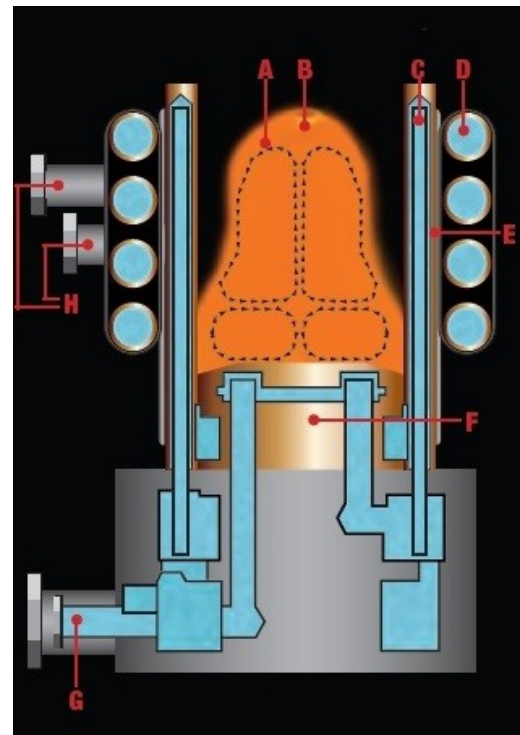
### 2.2.3 Vakuové indukční pece s vodou chlazeným měděným kelímkem

Jedná se o slévárenský typ pece. Jsou určeny pouze pro roztavení a odlévání. Použitím vodou chlazeného měděného kelímku se zvyšují tepelné ztráty a proto mají pece instalován vyšší příkon než agregáty pro tavení niklových slitin. Konstrukce pece je na **obr. 14** a příklad pece na **obr. 15**.

Měděný kelímek je tvořen segmenty, které jsou chlazeny vodou. Cívka generuje magnetické pole, které při průchodu kelímkem indukuje teplo v kovové vsázce. Tím se vsázka taví. Magnetické pole také intenzivně míchá vsázku. Proto existují pece, které mají 2 cívky. Druhá cívka slouží jen k míchání, má nízký výkon a používá nízké frekvence. [8, 11]



**Obr. 15: Jednokomorová vakuová indukční pec s vodou chlazeným měděným kelímkem firmy Consarc [8]**



**Obr. 14: Konstrukce pece s vodou chlazeným měděným kelímkem, A-výřivé proudy, B-titanová lázeň, C-segment kelímku, D-cívka, E-měděný plášť, F-měděná základní deska, G-přívod chladicí vody, H-chlazení cívky [8]**

## 2.3 Výrobci indukčních pecí

V současnosti se indukčním tavením ve vakuu zabývá několik podniků z celého světa, jsou to především Consarc a ALD.

Firma Consarc vyvinula vakuové indukční pece pro ocel s kapacitou od 2 kg do 100 kg, které jsou určeny pro malovýrobu a výzkumné účely. Navrhla a postavila mnoho hutních pecí s kapacitou 3-30 tun. [5] Pece společnosti Consarc jsou využívány hlavně pro výrobu slévárenskou. Firma Consarc vyrábí systémy s jednou horizontální komorou s víkem zepředu, ta je na **obr. 12**, viz výše. Nebo s jednou vertikální komorou s víkem shora, ta je na **obr. 13**, viz výše. Dále vyrábí pece s dvojicemi komor i vícekomorové systémy. [8]

Firma Consarc vyrábí pece s vodou chlazeným měděným kelímkem jako jednokomorové, ta je na **obr. 15**, viz výše nebo dvoukomorové. Ty mají komory uspořádané horizontálně nebo vertikálně. Pec s vertikálním uspořádáním komor je na **obr. 16**. Pece mají kapacitu 5 kg až 100 kg i více. [9]



**Obr. 16:** Dvoukomorová vakuová indukční pec s vodou chlazeným měděným kelímkem s vertikálním uspořádáním komor firmy Consarc [8]



**Obr. 17:** Dvoukomorová vakuová indukční pec s vertikálním uspořádáním komor slévárenského typu firmy ALD [7]

Firma ALD nabízí pece s kapacitou od 1 kg do 30 tun. Na **obr. 17** je dvoukomorová pec s vertikálním uspořádáním komor. Záleží jen na tom, jakým způsobem je pec využívána. Tedy také hutní a slévárenské pece. [10]

Indukční tavení v chlazeném měděném kelímku přináší možnost tavení prvků snadno reagujících s kyslíkem (titan, zirkonium). Prvky mohou reagovat s keramickým materiálem tavicího kelímku. [7]

Při správném návrhu kelímku, cívky, frekvence a výkonu je roztavený kov magnetickým polem odtlačován od stěn kelímku směrem dovnitř. Tím jsou omezeny také teplotní ztráty. [10]

## 2.4 Postup tavby indukční pece hutního typu

Vsázka je závislá na druhu tavené slitiny. Pro niklové, chromniklové nebo kobaltové slitiny se používá elektrolytický nikl, chrom, kobalt, molybden, vanad nebo titan. Dále se používá vratný materiál (vtokové a nálitkové soustavy).

Základní vsázka je tvořena kovy, které mají nízkou afinitu ke kyslíku (Fe, Ni, Co, Cr). Ta se zakládá do kelímku a prosypává se uhlíkem na dezoxidaci. [4]

U jednokomorových pecí proběhne odsátí na pracovní vakuum, u dvoukomorových pecí se provádí pouze jednou a to na začátku. Během natavování probíhá bouřlivá uhlíková reakce a odplynění. Celá vsázka se roztaví a pec se znovu odsaje. Po roztavení základní vsázky probíhá dezoxidace taveniny uhlíkem až do uklidnění lázně. [10]

Po roztavení základní vsázky pokračuje dezoxidace taveniny uhlíkem. Větší pec musí mít delší údobí rafinace, protože je zde poměr povrchu rozhraní kov-atmosféra k objemu taveniny mnohem menší než u malých pecí. Rafinace probíhá rychleji za vysoké teploty kovu, při použití vyšších teplot může docházet k většímu opotřebení vyzdívky a kontaminaci taveniny oxidickými vměstkami. Naopak při použití nižších teplot nebude tavenina kontaminována vyzdívkou kelímku a v tavenině bude nižší obsah kyslíku. Aby probíhala rafinace taveniny je nutné její míchání. Požívá se dmýchání argonu přes porézní tvárnici nebo se využívá míchání pomocí cívky. [4]

Po skončení rafinace se provádí dolegování tavby. Po rafinaci je vsázen vanad, titan a uhlík. Mikrolegury se přidávají až na konci tavby (bor, zirkonium, cer). Na závěr tavby se provede legování uhlíkem. Po ochlazení tavby na lící teplotu je odlita do kokil. [4]

Lití je prováděno ve vakuu nebo pod tlakem neutrálního plynu přímo nebo pomocí mezipánve (velké pece). Kokily jsou studené nebo předehřáté. [4, 6, 7]

## 2.5 Postup práce indukční pece slévárenského typu

Do kelímku je pod vakuem vsazena vsázka, ta je natavena. Po roztavení vsázky je teplota zvýšena na lící teplotu. Do kokilové komory je vložena keramická forma, která je umístěna pod kelímkem. A provede se odlití. Kokilová forma je zavzdušněna a po vyrovnání tlaků je otevřen vakuový uzávěr. Forma je dopravena k lití a odlita. Odlitá forma je dopravena zpět do kokilové komory a je opět uzavřen vakuový uzávěr. Kokilová komora je zavzdušněna a do vsázecího zařízení je vložena nová vsázka. Vsázecí zařízení je vakováno. [3]

Nejsou prováděny žádné metalurgické operace. Vysoké čistoty, nízkého množství plynů a nekovových vměstků je dosaženo použitím vakua i vysoce čisté vsázky. Ta je vyrobena právě na slévárenské peci nebo dalšími speciálními pochody. [6]

Vakuové pece jsou obecně používány zejména pro slitiny, které se dají obtížně tavit na vzduchu. Nebo se mohou tavit na vzduchu, ale za použití vakua se dosáhne vyšší jakosti. Tavením vysokolegovaných ocelí ve vakuu se získá lepší kvalita (menší počet vměstků a koncentrace plynů) v porovnání s konvenčním způsobem výroby.

Provedení pece může být jednokomorové, dvoukomorové, které mohou být dle uspořádání komor vertikální nebo horizontální.

Výhodou tavení ve vakuových indukčních pecích je hluboké odplynění, dokonalá dezoxidace a tavení slitin libovolného chemického složení. U některých slitin může být nevýhodou kontakt taveniny s grafitovým materiálem pece (Ti slitiny). Během tavení uhlík reaguje s titanem a vznikají karbidy titanu. Titan silně reaguje s kyslíkem, dusíkem a uhlíkem za vzniku oxidů a karbidů. To je řešeno použitím vakuových indukčních pecí s vodou chlazeným měděným kelímkem. Tím se vyloučí kontaminace taveniny uhlíkem. [6]

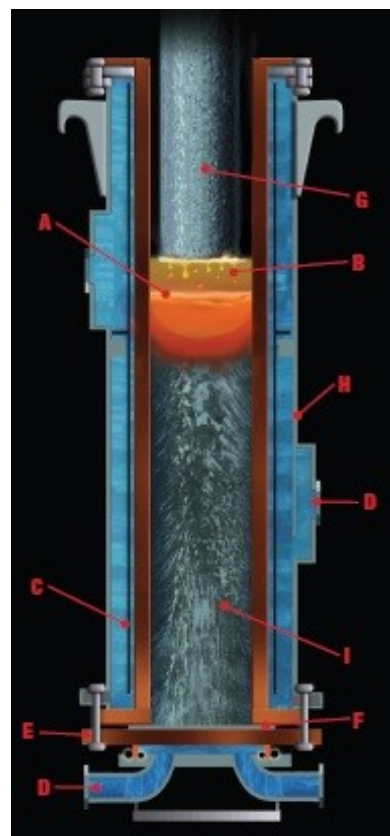
Dle experimentu [6] byly zjištěny následující hodnoty prvků. Při první tavně bylo docíleno 1800 ppm uhlíku v ingotu, ve druhé tavně 700 ppm. Při první tavně je vysoké číslo důsledkem reakce mezi roztaveným titanem a grafitovým kelímkem. Obsah kyslíku u všech taveb byl stanoven v rozmezí 400 ppm. Z toho plyne, že obsah kyslíku závisí na výběru výchozích surovin. [6, 7]

### 3 Elektrostruskové přetavování

#### 3.1 Princip a použití

Funkce pece je založena na přetavování elektrody. Tavení probíhá v měděné formě-krystalizátoru, který je chlazený vodou. Elektroda se postupně odtavuje ve struskové lázni krystalizátoru. Vlastní elektroda je vyrobena z vysoce čistého materiálu tvářením nebo litím. Konstrukce pece je na **obr. 18**. [14, 18]

Struska je elektricky vodivá a při průchodu elektrického proudu mezi elektrodou a základní kovovou deskou se zahřívá na vysokou teplotu, která taví elektrodu. Kapky kovu prochází struskou a shromažďují se v krystalizátoru nebo ve formě, kde tuhnou. Kapky vytváří ingot nebo odlitek. Elektroda je pomocí posuvného mechanismu udržována ve struskové lázni. Strusková lázeň elektrodu pomalu odtavuje. Při průchodu kovových kapek struskou za vysokých teplot dochází k rafinaci kovu. Jsou vytvořeny vhodné podmínky pro vyplouvání sulfidických vměstků



**Obr. 18: Konstrukce pece pro elektrostruskové přetavování, A-kovová lázeň, B-roztavená struska, C-průdíčí voda, D-přívod chladící vody, E-dno, F-startovací blok, G-elektroda, H-vodou chlazený plášť, I-ingot [14]**

a odplynění kovu do strusky. Vysoký stupeň odsíření a rafinace je dán velkým objemem kovu, který je rozptýlený v drobných kapkách. [13, 14]

Během přetavování zůstává mezi tuhoucím kovem a povrchem krystalizátoru tenká vrstva strusky, která vyhlazuje povrch tuhoucího kovu.

Tato technologie se používá pro výrobu malých ingotů nástrojových ocelí, legovaných litin atd. Současně se elektrostruskové přetavování používá i pro těžké ingoty o hmotnosti až několik stovek tun a vysoce legované materiály. Vysoce jakostní materiál z elektrostruskového přetavování se používá pro výrobu odlitků užívaných v letectví a v jaderném průmyslu. A nebo pro výrobu těžkých ingotů. Tato technologie odstraňuje problémy spojené s litím a plněním formy. [17, 19]

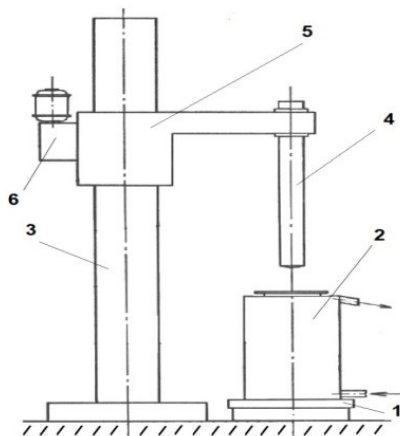
### 3.2 Konstrukce pece a krystalizátoru

Vhodnost konstrukčního řešení některých částí pece přímo určuje technologický výsledek a často i úspěch elektrostruskového pochodu. Velký význam má způsob chlazení a volba krystalizátoru. [17]

Hlavní konstrukční části pece jsou-nosná část (kostra), mechanismus pro upínání elektrody a její posuv do roztavené strusky, krystalizátor, transformátor, pomocná zařízení pro chlazení, ofukování, odsávání a manipulace s krystalizátorem. Krystalizátor je obvykle chlazený vodou, jehož dno je také chlazeno a nebývá pevně spojeno s pláštěm krystalizátoru. [13]

Kostra pece musí být pevná a dostatečně tuhá, aby chvění konstrukce nepůsobilo mechanicky na krystalizaci přetaveného kovu. Tvar kostry se volí podle způsobu vedení elektrody. Pec se zavěšenou elektrodou má kostru typu věžového nebo jehlanového. Elektroda držaná v ramenu nebo podávaná vyžaduje sloup nebo stojan. Schéma takové pece je na **obr. 19**. [13]

Dále je volba konstrukce určena způsobem, jakým se krystalizátor dopravuje do pracovní polohy. Využívají se výměnné vozíky, z nichž každý slouží k manipulaci s jediným



**Obr. 19: Jednofázová pec se sloupem a ramenem nesoucí elektrodu, 1-dno s přívodem proudu, 2-krystalizátor, 3-sloup, 4-elektroda, 5-rameno, 6-posuvový mechanismus ramene [13]**

krystalizátorem. Obdobou je ponorný nebo pojízdný stůl se dvěma krystalizátory. Jiným řešením je pevné dno, na něž je krystalizátor umístěn jeřábem. [13]

Krystalizátor tvoří prostor, v němž probíhá celý elektrostruskový proces včetně krystalizace ingotu a odvádí velké množství tepla. Vyžaduje se, aby krystalizátor měl velkou životnost. Průřez ingotu měl původně kruhový tvar pro rovnoměrný odvod tepla z celého průřezu ingotu. Je možno libovolně měnit tvar průřezu, ale musí být k tomu přizpůsobeny tvar elektrody a ostatní technologické podmínky. Krystalizátory mají úkos stěny od svislé osy od 1 do 2 %, aby se usnadnilo snímání krystalizátoru z

ingotu. Krystalizátor má i úlohu chladicí, z krystalizátoru musí chladicí voda odvádět veškeré teplo. Tepelné a mechanické namáhání krystalizátorů vyžaduje, aby jejich materiál byl dobře tepelně vodivý, aby nenastalo přehřátí. Většinou se volí měděný krystalizátor. [13, 19]

Podle způsobu chlazení lze krystalizátory rozdělit do tří skupin:

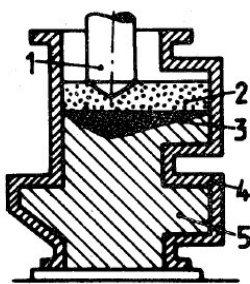
- dvouplášťové
- jednoplášťové
- odparné-nejvýhodnější

Dna krystalizátorů musí být mechanicky pevná a elektricky dobře vodivá, protože zprostředkovávají vedení elektrického proudu do ingotu a musí dobře odvádět teplo. [17]

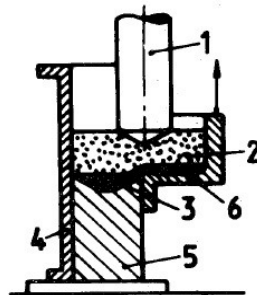
Změnou tvaru krystalizátoru se vyrábí zalomené hřídele dieselových motorů nebo tlakové nádoby (kotle, reaktory). Při elektrostruskovém odlévání se používá slévárenská forma s krystalizátorem, který je vodou chlazený. Krystalizátory s přeléváním se skládají minimálně ze dvou částí. První část je nepohyblivá, tu tvoří vlastní krystalizátor. Druhá je pohyblivá, kde probíhá samotné tavení. Elektrostruskové odlévání je technologie lití, kde nejsou potřeba nálitky a vtokové soustavy. Během procesu je možné ovlivnit obsah i chemické složení nekovových vměstků. Povrch odlitých součástí je velmi hladký, zlepšuje životnost a spolehlivost vyráběného sortimentu. [17]

Při elektrostruskovém odlévání odlitků se používají tři způsoby:

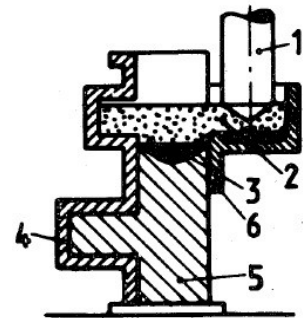
- tavení přímo ve formě-kov se taví a krystalizuje v kovové formě (**obr. 20**)
- s částečným přeléváním (**obr. 21**)
- s úplným přeléváním (**obr. 22**)



Obr. 20: Tavení přímo ve formě [17]



Obr. 21: S částečným přeléváním [17]



Obr. 22: S úplným přeléváním [17]

Zařízení lze členit podle použitého proudu:

- střídavý proud-při použití střídavého proudu je proces jednodušší, rafinace i odsíření je účinnější
- stejnosměrný proud-naopak při stejnosměrném je lepší odstranění plynů [19]



Zařízení lze členit i podle počtu použitých elektrod:

- Jednofázové zapojení s jednou elektrodou o kmitočtu 50 Hz
- Třífázové zapojení se 3 elektrodami. A to buď v jednom krystalizátoru nebo každá elektroda ve vlastním [13, 19]

Existují tři typy pecí:

- přetavování pod zvýšeným tlakem
- přetavování pod ochrannou atmosférou
- přetavování za sníženého tlaku

### 3.2.1 Přetavování pod zvýšeným tlakem

Při elektrostruskovém přetavování nebo vakuovém zpracování dochází ke snížení obsahu plynů jako je vodík a dusík. V některých vysokolegovaných chromniklových slitinách je dusík jako legující prvek v koncentracích cca 0,3 %. Tyto technologie vedou k dokonalému odplynění. Ale problém bude při výrobě slitiny s požadovaným obsahem toho prvku. Tak pro tento účel jsou používány pece, které pracují právě za zvýšeného tlaku. To umožní udržet v tavenině vyšší obsah požadovaného prvku (dusíku). Pro výrobu těchto materiálů je potřeba vysoké množství dusíku nad mezí rozpustnosti za normálního tlaku. Snížení dusíku v tavenině je zabráněno tím, že tavení i odlití probíhá za zvýšeného tlaku plynu (dusíku), až 42 bar. Vysoký tlak v systému slouží hlavně k udržení dusíku v oceli. Úroveň tlaku je závislá na požadovaném složení slitiny a požadovaném množství dusíku v přetavovaném materiálu. [16]

Pec pro elektrostruskové přetavování pod zvýšeným tlakem je na **obr. 23**.



**Obr. 23:** Pec pro elektrostruskové tavení (16 tun, max. tlak 16 bar) [16]

### 3.2.2 Přetavování pod ochrannou atmosférou

V případě zvýšeného požadavku na obsah plynů je používána ochranná atmosféra. Ta vede ke snížení nebo udržení nízkého obsahu plynů v tavenině nebo v konečném výrobku (zabrání oxidaci). Je doporučeno vést celý proces v plně uzavřené atmosféře inertního plynu při atmosférickém tlaku. Pro nízký obsah vodíku je výhodné přetavovat v bezkyslíkaté atmosféře.

Pec pro elektrostruskové přetavování pod ochrannou atmosférou je na **obr. 24**. [16]

Výhody:

- zabránění oxidaci strusky a elektrody
- lepší čistota kovu proti běžnému na vzduchu odlévanému materiálu
- při použití argonu jako inertního plynu se zvýší obsah dusíku a to vede ke snížení obsahu vodíku

Nevýhoda:

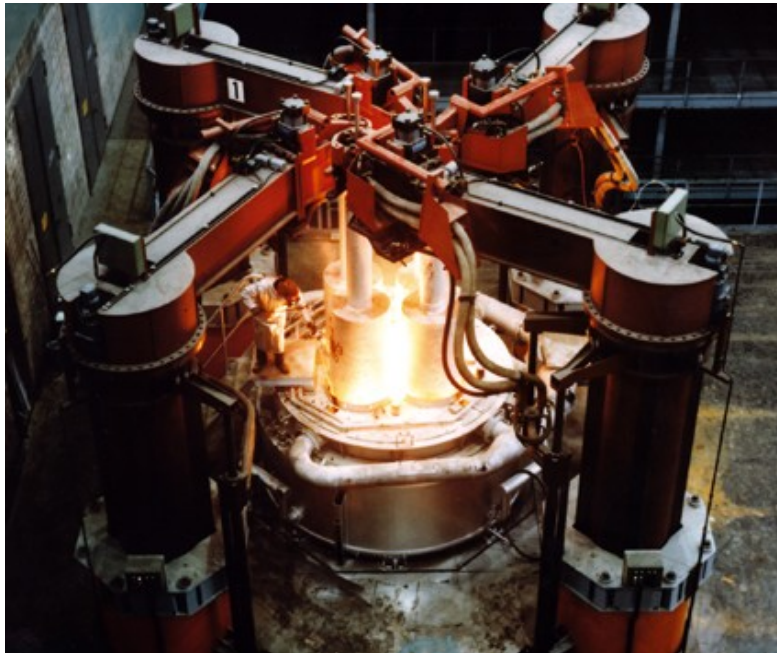
- nepřítomnost kyslíku v atmosféře pece má za následek špatnou schopnost odsíření



**Obr. 24: Pec pro elektrostruskové tavení pod ochrannou atmosférou (20 tun) [16]**

### 3.2.3 Přetavování za sníženého tlaku

Nově vyvinutý proces. Provádí se za sníženého tlaku, za použití strusky. Jedná se o spojení technologie elektrostruskového přetavování a vakuového obloukového tavení, viz. kapitola 4. Tato technologie umožňuje s výhodou tavit titanové slitiny. Pec pro elektrostruskové přetavování za sníženého tlaku je na **obr. 25**. [16]



Obr. 25: Pec pro elektrostruskové tavení pod sníženým tlakem (165 tun) [16]

### 3.3 Výrobci elektrostruskových pecí

V současné době firma Consarc přistoupila k elektrostruskovému přetavování rozdílně. Vynalezla souosé elektrostruskové pece, které se dosud používají v leteckém průmyslu. Zkombinovali elektrodu, jejíž průměr se blíží průměru kelímku se střídavou pecí. Na **obr. 26**, **27** jsou tyto typy pecí. [15, 19]



Obr. 26: Pec pro elektrostruskové tavení firmy Consarc (1000 mm) [14]



Obr. 27: Pec pro elektrostruskové tavení firmy Consarc (1200 mm) [14]

Dnes mají pece možnost dvou tavicích stanic. Consarc dodává i výměnné elektrody, což umožnilo flexibilní přetavování pomocí širokého množství elektrod. [14]

Pece firmy Consarc mohou používat studený start nebo horký, který využívá předtavenou strusku. Consarc je jediným dodavatelem pecí s měničem vlastní výroby a navíc poskytuje počítačem řízený podavač strusky. Velikosti vyráběných pecí firmy Consarc jsou v **tab.1**.

**Tab. 1: Velikosti vyráběných pecí firmy Consarc pro elektrostruskové přetavování [14]**

POPIS	500 mm	650 mm	760 mm	900 mm	1000 mm	1100 mm	1200 mm
maximální váha ingotu	4 t	6 t	10 t	15 t	20 t	30 t	35 t
maximální průměr kelímku	508 mm	650 mm	760 mm	914 mm	1016 mm	1117 mm	1219 mm
rozměr dna	825 mm	1016 mm	1016 mm	1219 mm	1372 mm	1372 mm	1473 mm
hodnota proudu	15 kA	20 kA	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA	40 kA

Další firmou, která vyrábí pece pro elektrostruskové přetavování je ALD. Pece jsou navrhovány pro výrobu ingotu kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Jako u jiných pecí je u ALD pecí dosahováno vysoké čistoty. Dále struktury bez vnitřních vad a potlačení makrosegregace. Vyrábí ingoty od 100 kg do 165 tun, používají střídavý proud od 3 kA do 92 kA, průměr ingotu od 170 mm do 2300 mm. [16]

Pec firmy ALD z roku 1970 umožňuje vyrábět ingoty o průměru 2300 mm, o délce 5000 mm a o hmotnosti přes 100 tun. Takový ingot je na **obr. 28**. [16]



**Obr. 28: Ingot (165 tun, průměr 2300 mm, délka 5000 mm) [16]**

### 3.4 Technologický postup elektrostruskového přetavování:

- příprava pece k tavně
- zapálení pochodu
- tavení elektrody
- tuhnutí kovu a strusky-tavenina tuhne při vypnutém proudu
- chladnutí krystalizátoru-děje se mimo pracovní polohu

### 3.4.1 Příprava pece k tavně a zapálení pochodu

Před každou tavnou se krystalizátor zkontroluje a prohlédne. Na dno se položí ocelová podložka, na kterou se dá zapalovací směs. Do této směsi se zavede čelo odtavné elektrody a zasype se určitým množstvím strusky. Nakonec se zkontrolují chladicí a elektrické obvody pece. [17]

Po přípravě následuje zapálení pochodu. Účelem zapálení je vytvořit základní množství roztavené strusky, aby mohla začít vlastní tavná. Tavná se může zapalovat několika způsoby. Prvním je elektrický oblouk. Po zapnutí elektrického proudu se mezi elektrodou a dnem vytvoří oblouk a vznikne první roztavená struska. Druhý způsob využívá zápalnou strusku. Tekutá struska je natavena v obloukové peci s grafitovou vyzdívkou a měděným dnem. Kombinuje-li se složení strusek a způsoby přetavení, může se vyrobit kov nejvyšší jakosti. První přetavení je třeba dělat pod struskou, která má nejvyšší odsiřovací schopnost. Druhé přetavení se má dělat pod struskou, která zaručuje malou rychlost natavení ingotu při osově krystalizaci. [13, 21]

Po natavení veškerého množství strusky se hodnota proudu musí zvýšit na nominální, jinak hrozí kolísání. Nepodaří-li se tavnou zapálit, musí se všechny přípravné operace opakovat. [10]

Při elektrostruskovém přetavování má základní význam chemické složení a fyzikální vlastnosti strusek. Struska musí mít vyšší teplotu tavení než použitá elektroda. Teplota tavení strusky by neměla být o moc vyšší než teplota tavení kovu. A měla by umožnit rychlé a snadné zahájení přetavovacího procesu. [17]

#### **Podle požadavků na chemické složení se používají strusky:**

- kyselé-účelem je odfosfoření kovu ( $\text{CaF}_2\text{-BaO}$ )
- zásadité-účelem je odsíření kovu ( $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ )

Nejčastěji používaná struska je 70 %  $\text{CaF}_2$  a 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která zaručuje nízkou spotřebu elektrické energie, dobře odsiřuje a rozpouští oxidické vměstky. [17]

Důležitou vlastností strusky je její elektrická vodivost. Stabilita procesu závisí na hodnotě tavního proudu a napětí. Při velmi vysoké vodivosti je možné, že struskou bude protékat elektrický proud, ale elektroda nebude odtavována. Při nízké vodivosti může dojít ke zvyšování napětí a následnému tavení obloukem. [21]

Přítomnost tekuté strusky vnáší zásadní změny do metalurgického pochodu při přetavování odtavných elektrod v kovovém, chlazeném krystalizátoru. U elektrostruskového pochodu se pro rafinaci kovu využívá i vysoce zásaditá a přehřátá struska. [13]

### 3.4.2 Odtavování elektrody a tvorba ingotu

Tavení elektrody probíhá po zapálení a ustálení pochodu klidně, je-li zajištěn správný posuv elektrody a jsou-li dodržovány potřebné hodnoty proudu. [17]

Zvětšuje-li se průřez odtavné elektrody, je elektrostruskový pochod stabilní při větší velikosti proudu. Zvětšení hloubky kovové lázně způsobené větší rychlostí posuvu elektrody má za následek i změnu způsobu krystalizace ingotu. Proto není správné zvyšovat produktivitu pochodu zvyšováním rychlosti posuvu elektrody, protože se zhoršuje kvalita ingotu. Zvětšení rychlosti posuvu elektrody může způsobit také pokles teploty strusky u stěny kokily a zhoršení povrchu ingotu. [13]

Zvyšování napětí způsobuje pokles velikosti proudu a způsobuje zmenšení hloubky kovové lázně. Při zvyšování napětí se dno stává méně vydutým a krystaly se snaží růst podélným směrem. Z toho plyne, že zvyšováním napětí lze získat hladký povrch a zvětšovat produktivitu elektrostruskového přetavování. Ale při nepřiměřeně zvýšeném napětí může nastat var strusky nebo její výhoz. [13]

Při třífázovém způsobu zapojení a při velké rozteči elektrod lze dosáhnout příznivějšího tvaru kovové lázně než při jednofázovém zapojení. [19]

Elektrody pro přetavování používáme nejčastěji tyče kruhového průřezu. Mohou být vyrobeny válcováním, kováním nebo i odléváním. Délka elektrody se volí tak, aby vystačila na přetavení jednoho ingotu s minimálním zbytkem. Průměr elektrody má být stálý v celé její délce. Elektroda musí být přímá, protože při velké křivosti by se elektroda mohla dotknout stěny krystalizátoru a nastal by zkrat. Je nutno povrch elektrody dobře očistit. [13]

Použití střídavého proudu má několik metalurgických výhod. Třífázový způsob zapojení dovoluje zapojit více než jednu elektrodu a tím možnost zvětšit průměr ingotu. Průchodem elektrického proudu se v lázni strusky vyvíjí teplo, to se vyvíjí nerovnoměrně. Při jednofázovém zapojení prochází hlavní část proudu struskovou lázní od čela elektrody k hladině kovové lázně. Při třífázovém zapojení tří elektrod, odtavovaných v jednom krystalizátoru, může proud procházet nejen od čel elektrod ke kovové lázni, ale také přímo mezi elektrodami. Teplo, které se při pochodu vyvíjí ve struskové lázni se spotřebuje hlavně na odtavování elektrody a na udržování struskové i kovové lázně v roztaveném stavu. [13]

Tavenina v krystalizátoru tuhne při vypnutém proudu a při zvednutém zbytku elektrody. Chlazení krystalizátoru je aktivní dokud kov úplně neztuhne. Chladnutí krystalizátoru i odlitku, popřípadě ingotu se děje mimo pracovní polohu. [17]

Praktická spotřeba tepla na vytavení 1 tuny uhlíkové oceli se pohybuje v rozmezí 1000-1500 kWh/t. [20]

Hlavním úkolem elektrostruskového přetavování je získat vysoce kvalitní kov bez nečistot zhoršující jeho vlastnosti. Využití elektrostruskového pochodu k výrobě vysoce kvalitních materiálů lze charakterizovat třemi směry. Výroba menších ingotů, pak výroba těžkých kovárenských ingotů a natavování odlitků a tvarových těles. [13]

Tento způsob výroby odlitků má mnoho výhod oproti konvenčnímu způsobu výroby. Při přetavování ocelí se zvyšuje homogenita s minimální segregací a snižují se velikosti nekovových vměstků. [20]

Přetavením materiálu tímto procesem lze dosáhnout snížení obsahu síry z 0,020 na 0,005% a obsah vodíku až o 30 %. U ložiskové oceli byl dosažen obsah kyslíku 0,0005 %. Pro realizaci elektrostruskového procesu není potřeba tavicích pecí a obejde se i bez vtokové soustavy. Dosahuje se větší homogenity s minimální segregací. To vede k větší životnosti vyráběných součástí. [13, 17, 21]

## 4 Vakuové obloukové pece

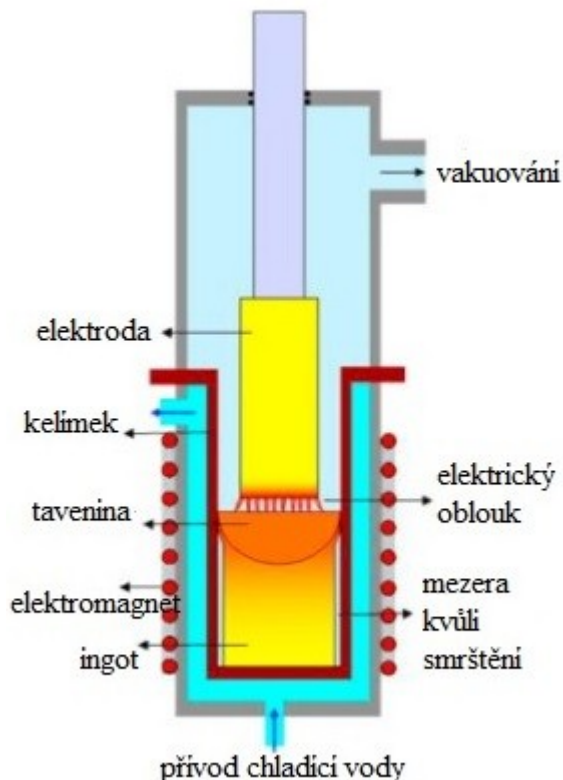
### 4.1 Princip a použití

Vysoce legované oceli, slitiny titanu a zirkonia jsou často použity v letectví, v energetickém průmyslu a v lékařství. Ale pro svou reaktivitu se musí zabránit kontaminaci taveniny s některými prvky, zejména s kyslíkem. Proto jsou taveny na vakuových obloukových pecích, které pracují na podobném principu jako klasická oblouková pec. Vsázka se taví elektrickým obloukem. [6]

Vakuové obloukové pece se skládají z vakuové komory, ve které je elektroda. Pro výrobu titanových odlitků je elektroda vyrobena přímo z požadované titanové slitiny. Elektroda je spouštěna do kelímku, který je chlazený vodou. Pomocí stejnosměrného proudu (5-40 kA) dojde

k hoření oblouku mezi elektrodou a vodou chlazeným kelímkem pod vakuem. [22]

Intenzivní teplo generované elektrickým obloukem taví hrot elektrody a nový ingot se tvoří ve vodou chlazeném, měděném kelímku. Princip vakuové obloukové pece je na **obr. 29**. Vysoké vakuum je udržováno po celou dobu procesu. V něm se vytvoří titanová vrstva, která brání přímému styku taveniny s kelímkem. Jakmile je kelímkem plný, dojde k jeho naklonění a liti taveniny do lící formy. Pro lepší plnění formy se forma předehřívá nebo dochází k její rotaci. Tento postup se používá pro výrobu reaktivních materiálů (titan, zirkonium), niklové slitiny a speciální oceli. [23, 24]



Obr. 29: Princip vakuové obloukové pece [26]

## 4.2 Konstrukce

Vakuové obloukové pece se z hlediska odlišnosti tavby dělí na:

- hutní
- slévárenské

### 4.2.1 Vakuové obloukové pece hutní

Používá se pro výrobu ingotů. V hutní peci se tavenina rafinuje, zvyšuje se čistota. S využitím uhlíkové reakce se zvyšuje čistota taveniny (snižuje se množství vměstků). Snižuje se velká část, ale snižuje se i obsah plynů. Hlavním úspěchem je kontrola atmosféry pece. Procesy probíhají pod nízkým tlakem (méně než 1 Pa). Ztráty pece by měly být okolo 0,01 Pa/s. Větší narušení atmosféry pece by vedlo k materiálu s vysokým obsahem kyslíku a dusíku. Celý proces se odvíjí od kvality elektrody. Materiál se přímo v peci nalije do ingotu. [27]

Pece hutní mohou být různé konstrukce. Vyrábí se jednokomorové nebo dvoukomorové.

### 4.2.2 Vakuové obloukové pece slévárenské

Slévárenské pece slouží jen k přetavení vsázky. Pece jsou konstruovány tak, aby měly vysoký výkon, aby fáze tavení byla co nejkratší. Neprobíhají zde žádné metalurgické operace, ty proběhly při výrobě primární vsázky. [28]

### 4.2.3 Vakuové obloukové pece s vodou chlazeným měděným kelímkem

Jedná se o slévárenský typ pece. Pece se skládají z vakuové komory, ve které je elektroda (často z titanu). Elektroda je spouštěna do vodou chlazeného měděného kelímku. Stejnoseměrné napětí poskytuje proud, který je potřebný k hoření oblouku mezi elektrodou a kelímkem. Protože je kelímkem chlazený vodou, ztuhlá titanová lázeň vytvoří na povrchu ochrannou vrstvu. Tím se zabrání přímému styku taveniny a kelímku. Jakmile je dosaženo plné kapacity kelímku, elektroda je zatažena a kelímkem je nakloněn k lití do připravené formy. Pro optimální plnění dutiny formy se mohou formy předehtřívát. [27, 28]

Vakuové obloukové pece s vodou chlazeným měděným kelímkem jsou používány pro titanové odlitky pro letecký průmysl, kosmonautiku, zdravotnictví a chemický průmysl. [28]



### 4.3 Výrobci vakuových obloukových pecí

V současnosti se obloukovým tavením ve vakuu zabývá několik podniků z celého světa. Některé z nich jsou Consarc a firma ALD.

Firma Consarc byla prvním výrobcem, který zavedl vážení elektrod pro lepší kontrolu procesu. Vyvinula souosý tvar pece, který umožňoval kontrolované míchání. Pec se souosým tvarem je na **obr. 30**.

Vyrábí dva typy pecí, první pro speciální oceli, druhý pro vysoce reaktivní materiály, např. slitiny titanu. Vyrábí se v různých velikostech o kapacitě až 30 000 kg na ingot.

Materiál určený k tavení je vložen do pece.

Speciální oceli využívají elektrodu odlitou na vzduchu nebo ve vakuu. Reaktivní materiály jsou předem vyrobeny v kompaktních řezech. Pece jsou složeny ze dvou částí, pevné a pohyblivé. Pevná část je určená pro tavení. Pec obsahuje odnímatelný měděný kelímek. Pohyblivá část umožňuje posuv elektrod pomocí hydraulických válců. Pohyblivá hlava pece s elektrodami je spuštěna do pevné části a je vytvořeno vakuum v prostoru kelímku. Na vytvoření oblouku se používá stejnosměrný proud, který protéká elektrodou (katoda) a ingotem (anoda). Tím se přetavuje požadovaný materiál předem navolenými parametry. [23, 24]

Velikosti vyráběných pecí firmy Consarc jsou v **tab.2**.

**Tab. 2: Velikosti vyráběných vakuových obloukových pecí firmy Consarc [23]**

POPIS	600 mm	700 mm	900 mm	1050 mm
maximální váha ingotu	6 t	9 t	16 t	27 t
maximální průměr kelímku	610 mm	711 mm	914 mm	1075 mm
průměr víka	914 mm	1118 mm	1257 mm	1524 mm
hodnota proudu	12 kA-15 kA	15 kA-20 kA	20 kA-25 kA	25 kA-30 kA

Firma ALD vyrábí pece různých velikostí. Pece používají stejnosměrný proud do 40 kA a pracují ve vakuu 1-0,1 Pa, ale někdy až 1000 Pa (záleží na typu pece). Pece jsou schopny přetavit ingoty o průměru až 1500 mm a o hmotnosti až 50 tun. Na **obr. 31** je vakuová oblouková pec hutního typu s kapacitou až 30 tun. Na **obr. 32** je vakuová oblouková pec hutního typu s kapacitou až 12 tun. [25]



**Obr. 30: Vakuová oblouková pec se souosým tvarem [24]**



**Obr. 31: Vakuová oblouková pec firmy ALD (30 tun) [25]**



**Obr. 32: Vakuová oblouková pec firmy ALD (12 tun) [25]**

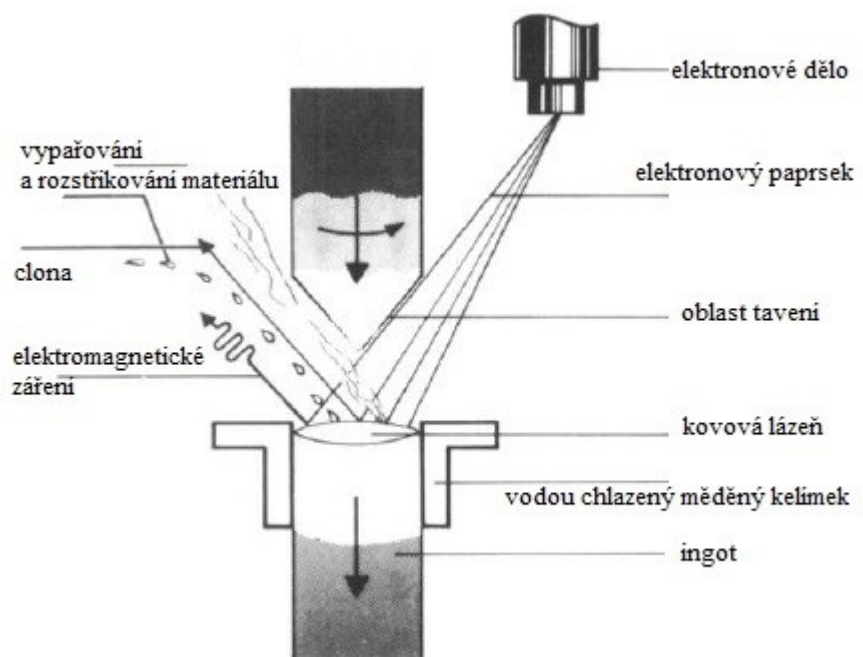
Vakuové obloukové pece zajišťují výrobu nejčistších slitin. Elektrostruskovým přetavením se dosáhne vysoké čistoty, sníží se množství vměstků. Ale pomocí vakuové obloukové pece se odstraní další prvky a materiál se také odplyní. Ale hlavně se sníží obsah plynů jako je vodík a dusík.

## 5 Vakuové elektronové pece

### 5.1 Princip a použití

Tavení probíhá ve vodou chlazeném měděném kelímku nebo v keramické a grafitové formě pomocí svazku elektronů. Princip spočívá v tom, že elektrony jsou urychlovány a při dopadu na povrch kovu se brzdí. Při dopadu se jejich kinetická energie mění v teplo, které je absorbováno kovem. [4]

Princip výroby elektronovým paprskem je na **obr. 33**.



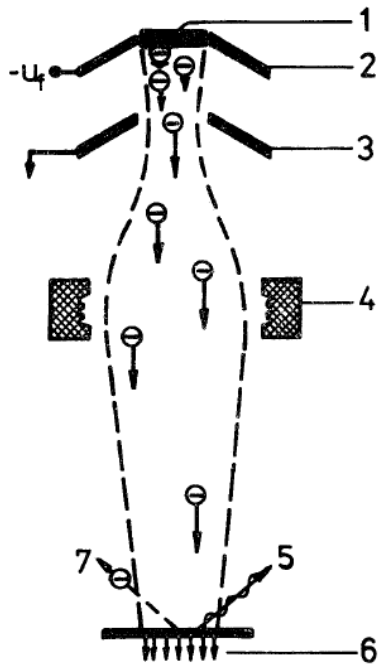
Obr. 33: Princip výroby elektronovým paprskem [28]

Používají se elektronová děla, která mají výkon 6-20 kW. Elektronové dělo je na **obr. 34**. Pohyb elektronů se děje ve vakuu  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  Pa. Některé pece pracují ve vakuu 10 Pa (chrom, mangan). [4, 28]

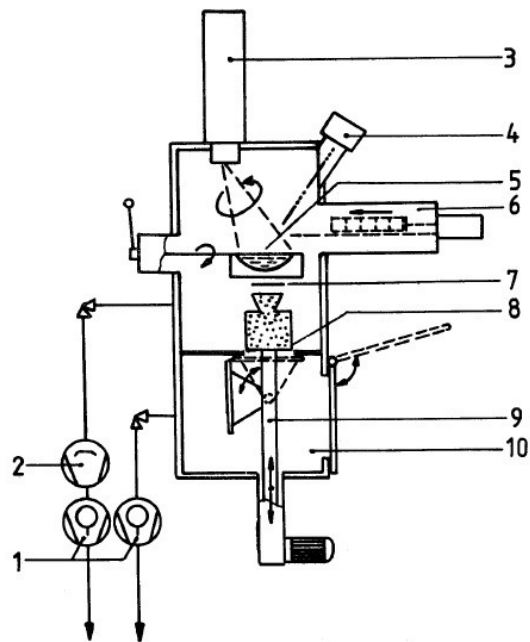
Elektronové dělo se umísťuje mimo svislou osu kelímku tak, aby osa elektronového děla nebyla totožná s osou kelímku. Toho se využívá při použití více elektronových děl v jedné peci pro zvýšení výkonu. Zvýšený výkon přispívá k rovnoměrnému ohřevu vsázky a taveniny. [4]

Elektronové tavení je využíváno pro výrobu ingotů z niobu a tantalu o hmotnosti až 2500 kg. Využívá se elektronových svazků 200 až 1500 kW. Další použití je pro výrobu ocelových ingotů o hmotnosti 3,6 až 20 tun za použití elektronových svazků až do 1200 kW. Pece 200 až 1200 kW jsou používány pro výrobu niklových super slitin. Kovy jako jsou třeba vanad jsou roztaveny a rafinovány v pecích 60 až 260 kW. Pece s elektronovým paprskem až 300 kW jsou používány k výrobě netradičních slitin mědi a urania. [28]

Tavení elektronovým paprskem se využívá při tavení reaktivních, žáruvzdorných ocelí. Při tavení niobu a tantalu se získá hladký povrch. Při tavení wolframu a molybdenu se získá vysoká čistota, ale ingoty jsou náchylné ke křehkosti. Dále se elektronovým paprskem vyrábí ingoty z vanadu, které se používají v jaderných reaktorech. [28]



Obr. 34: Princip tavení svazkem elektronů 1-žhavená katoda, 2-fokuzální elektroda, 3-urýchlovací anoda, 4-elektromagnetická elektronová čočka, 5-elektromagnetické záření, 6-primární proud vniku, 7-rozpřtýlené a sekundární elektrony [4]



Obr. 35: Schematické uspořádání dvoukomorové vakuové elektronové pece 1-olejová rotační vývěva, 2-difúzní olejová vývěva, 3-axiální elektronové dělo, 4-dvoubarevný optický pyrometr, 5-měděný kelímek chlazený vodou, 6-kusová vsázka, 7-clona, 8-keramická forma, 9-zdvihový mechanismus, 10-komora pro přísun forem [4]

## 5.2 Konstrukce

Dvoukomorová vakuová elektronová pec ES 1/3/60 firmy LEYBOLD-HERAEUS je na **obr. 35** a dovoluje odlít odlitku o maximální hmotnosti 2,5 kg. Používá elektronové dělo o výkonu 150 kW. Firma dále vyrábí pec typu ESG 2/30/120 pro hromadnou výrobu odlitků metodou přesného lití vytavitelným modelem. Maximální hmotnost odlitku je 2,5 kg. Pec pracuje s tyčovou vsázkou a používají se dvě elektronová děla o výkonu 120 kW. Proces pece je plně automatizován. [4]

Vakuová elektronová pec odstraňuje problém, který spočívá ve styku taveniny s vyzdívkou kelímku. Tento způsob tavení umožňuje použít vakuum pod  $10^{-2}$  Pa a přehřátí na vysoké teploty. A výhodou je, že je zde snížený obsah nekovových vměstků a stopových prvků. [28]

Ve vakuové elektronové peci se taví kusová vsázka nebo tyče kruhového průřezu. Chlazení kelímku způsobí ztuhnutí části kovu na stěnách. Ztuhlý kov tvoří skořápku, která dovoluje provádět sérii taveb o stejném chemickém složení. [4, 28]

### 5.3 Výrobci vakuových elektronových pecí

V současnosti se výrobou vakuových elektronových pecí zabývá hlavně firma ALD. Vyrábí pece různého konstrukčního řešení. Od pecí pro materiály jako jsou tantal a niob, přes pece, které jsou určeny pro reaktivní materiály jako jsou slitiny titanu. Pec pro výrobu slitin z reaktivních materiálů je na obr. 36. [29]



Obr. 36: Pec pro výrobu ingotů z reaktivních materiálů za použití elektronového svazku o síle až 4800 kW (hmotnost ingotu až 20 t) [29]

Vakuové elektronové pece se vyplatí jen při hromadné výrobě vysoce kvalitních odlitků. Dnes vakuové elektronové pece konkurují vakuovým indukčním pecím, mají vyšší produktivitu tavení a minimalizují vratný materiál a zmetky. [4]

Čistota a vlastnosti ocelí vyrobených elektronovým paprskem jsou lepší než ocelí vyrobené vakuovým obloukovým tavením nebo elektrostruskovým přetavováním. [28]

Kontaminace uhlíkem je 4 až 10 krát nižší při tavení elektronovým paprskem ve srovnání s vakuovou indukční pecí. Ingoty vykazují nejnižší obsah uhlíku v rozmezí od 70 do 150 ppm. To znamená, že nejvyšší hodnota 150 ppm je 3,5 krát nižší než nejnižší hodnota 520 ppm u ingotu vyrobeném vakuovou indukční pecí. Obsah kyslíku se pohyboval od 640 do 1055 ppm. Obsahu kyslíku v konečném produktu závisí na čistotě výchozích surovin. Ukázalo se, že výroba slitin niklu a titanu je vhodná k výrobě na elektronových pecích, protože u ingotů byl dosažen obsah uhlíku pod 70 ppm. [30]

## Závěr

Pro výrobu vysokolegovaných ocelí a speciálních slitin je nutností vytvořit vakuum nebo ochrannou atmosféru. Vakuum se získává pomocí speciálních vývěv a čerpadel.

Vakuové pece jsou používány zejména pro slitiny, které se dají obtížně tavit na vzduchu. Nebo se mohou tavit na vzduchu, ale za použití vakua se získá vyšší kvalita materiálu (menší počet vměstků) v porovnání s konvenčními agregáty.

Vysoce legované žáruvzdorné a korozivzdorné oceli se taví v elektrických indukčních pecích. Titanové slitiny se také taví ve vakuové indukční peci, ale za použití speciálního kelímku. Protože titan by mohl reagovat s keramickým materiálem kelímku. [6]

Tavením ve vakuových indukčních pecích se dosáhne hlubokého odplynění a dokonalé dezoxidace.

Vysoce legované oceli a slitiny titanu jsou často použity v letectví a jaderném průmyslu, proto je na jejich výrobu kladen velký důraz. Z toho důvodu se mohou vyrábět také ve vakuových obloukových pecích, kde je zabráněno kontaminaci taveniny kyslíkem. Ale hlavně se sníží obsah plynů jako je vodík a dusík. [23]

Odlišným pochodem je elektrostruskové přetavování. Při elektrostruskovém přetavování dochází ke snížení obsahu plynů jako je vodík a dusík. Tato technologie vede k dokonalému odplynění.

Tento způsob výroby odlitků má mnoho výhod oproti konvenčnímu způsobu výroby. Při elektrostruskovém přetavování ocelí se zvyšuje homogenita s minimální segregací a snižují se velikosti nekovových vměstků. [20]

Při hromadné výrobě vysoce legovaných materiálů je použita technologie vakuové elektronové pece. Vakuové elektronové pece jsou používány pro výrobu netradičních materiálů jako jsou slitiny mědi a urania. [28] A jsou používány i pro další oceli a ingoty z vanadu. Elektronovým paprskem se získá vysoká čistota materiálu. [4]

## Seznam použité literatury:

- [1] ZEMČÍK, Ladislav. *Vakuová technika*. Brno: VUT Brno, 1989, 20 s.
- [2] ZOBAČ, Ladislav. *Základy vakuové techniky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954, 313 s.
- [3] Oerlikon Leybold Vacuum. *tevak* [online]. Praha: [vid. 2016-2-20]. Dostupný z: <http://www.tevak.cz/rubrika/13-Oerlikon-Leybold-Vacuum-Vyvevy/index.htm>
- [4] ZEMČÍK, Ladislav. *Žáropevné slitiny NI I*. Brno: VUT Brno, 1989, 43 s.
- [5] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metallurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008, 310 s. ISBN 9788021436329.
- [6] LI, B. H., Y. LIU, L. HE, H. CAO, S. J. GAO a J. LI. Fabrication of in situ TiB 2 reinforced steel matrix composite by vacuum induction melting and its microstructure and tensile properties. *International Journal of Cast Metals Research* [online]. 2010, **23**(4), 211-215 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1179/136404609X12580240348974. ISSN 13640461. Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921509307006521>
- [7] ZUEV, M., A. BABENKO, S. BURMASOV, et al. Set of Production and Engineering Solutions for Reducing Energy and Material Consumption of Semifinished Steel Melting in Contemporary Electric Arc Furnaces. *Metallurgist* [online]. Boston: Springer US, 1411, **58**(7), 582-587 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1007/s11015-014-9959-2. ISSN 00260894. Dostupné z: [http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/796/art%253A10.1007%252Fs11015-014-9959-2.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs11015-014-9959-2&token2=exp=1464120881~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F796%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11015-014-9959-2.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs11015-014-9959-2\\*~hmac=1274851be970ffe5628604ba7a9af17b3cf7865865808359b4ff6db48c6c3118](http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/796/art%253A10.1007%252Fs11015-014-9959-2.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs11015-014-9959-2&token2=exp=1464120881~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F796%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11015-014-9959-2.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs11015-014-9959-2*~hmac=1274851be970ffe5628604ba7a9af17b3cf7865865808359b4ff6db48c6c3118)
- [8] Consarc Corporation 100 Indel Ave. Resources. Vacuum Induction Melting Furnaces. *consarc* [online]. Rancocas: Consarc Corporation 100 Indel Ave [vid. 2016-3-10]. Dostupný z: <http://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/vim.pdf>
- [9] aceso PRAHA. Vakuové indukční tavení. *aceso* [online]. Praha: aceso PRAHA, ©1992–2016 [vid. 2016-2-10]. Dostupný z: <http://www.aceso.cz/vakuove-indukcni-taveni-vim>

- [10] ALD Vacuum Technologies. Vacuum Induction Melting and Casting. *ald-vt* [online]. Hanau: ALD Vacuum Technologies, ©2010–2013 [vid. 2016-2-23]. Dostupný z: <http://web.ald-vt.de/cms/vakuum-technologie/anlagen/vimvidp>
- [11] Consarc Corporation 100 Indel Ave. Resources. Induction Skull Melting Furnaces. *consarc* [online]. Rancocas: Consarc Corporation 100 Indel Ave [vid. 2016-3-10]. Dostupný z: <http://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/ism.pdf>
- [12] aceso PRAHA. Indukční tavení v chlazeném kelímku. *aceso* [online]. Praha: aceso PRAHA, ©1992–2016 [vid. 2016-2-10]. Dostupný z: <http://www.aceso.cz/indukcni-taveni-v-chlazenem-kelimku-ism>
- [13] PETRMAN, Ivo. *Teorie a praxe elektrostruskového přetavování ocelí a slitin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1966, 179 s.
- [14] Consarc Corporation 100 Indel Ave. Resources. Electroslag Remelting Furnaces. *consarc* [online]. Rancocas: Consarc Corporation 100 Indel Ave [vid. 2016-3-10]. Dostupný z <http://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/esr.pdf>
- [15] aceso PRAHA. Elektrostruskové přetavování. *aceso* [online]. Praha: aceso PRAHA, ©1992–2016 [vid. 2016-2-12]. Dostupný z: <http://www.aceso.cz/elektrostruskove-pretavovani-ers>
- [16] ALD Vacuum Technologies. Electroslag Remelting. *ald-vt* [online]. Hanau: ALD Vacuum Technologies, ©2010–2013 [vid. 2016-2-17]. Dostupný z: <http://www.ald-vt.com/cms/en/vacuum-technology/applications/esr>
- [17] ZEMČÍK, Ladislav. *Elektro-struskové odlévání*. Brno: VUT Brno, 1989, 14 s.
- [18] LI, Baokuan, Fang WANG a Fumitaka TSUKIHASHI. Current, Magnetic Field and Joule Heating in Electroslag Remelting Processes. *ISIJ International* [online]. The Iron and Steel Institute of Japan, 2012, **52**(7), 1289-1295 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.2355/isijinternational.52.1289. ISSN 09151559. Dostupné z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/52/7/52\\_1289/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/52/7/52_1289/_pdf)
- [19] PANCHENKO, A., L. MEDOVAR, S. KAZAKOV, I. LOGOZINSKII, S. DAVIDCHENKO, A. FED, A. STOVPCHENKO a V. LEBED. Reconstruction of electroslag-remelting furnaces. *Steel in Translation* [online]. Heidelberg: Allerton Press, Inc, 1210, **42**(10), 721-723 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.3103/S0967091212100105. ISSN 09670912. Dostupné z: [http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/568/art%253A10.3103%252FS0967091212100105.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.3103%2FS0967091212100105&token2=exp=1464243502~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F568%2Fart%25253A10.3103%25252FS0967091212100105.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.3103%252FS0967091212100105\\*~hmac=47a293a8b055eaa664b338cd0891bc0fe99e672fbdfea7d4261b14bb65c7ba8e](http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/568/art%253A10.3103%252FS0967091212100105.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.3103%2FS0967091212100105&token2=exp=1464243502~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F568%2Fart%25253A10.3103%25252FS0967091212100105.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.3103%252FS0967091212100105*~hmac=47a293a8b055eaa664b338cd0891bc0fe99e672fbdfea7d4261b14bb65c7ba8e)



- [20] DUB, V., L. LEVKOV, D. SHURYGIN, Yu. KRIGER, S. ORLOV, S. MARKOV a M. NAKHABINA. Experience of production of hollow tubular ingots by electroslag melting. *Russian Metallurgy (Metally)* [online]. Moscow: Pleiades Publishing, 1506, **2015**(6), 478-486 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1134/S0036029515060063. ISSN 00360295. Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1134/S0036029515060063>
- [21] CHANG, L. Z., X. F. SHI, J. Q. CONG a R. X. WANG. Effects of relative motion between consumable electrodes and mould on solidification structure of electroslag ingots during electroslag remelting process. *Ironmaking and Steelmaking* [online]. 1409, **41**(8), 611-617 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1179/1743281213Y.0000000177. ISSN 03019233. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=a0b9226a-171c-4990-bbd0-45091b85283a%40sessionmgr4003&vid=1&hid=4112>
- [22] VIGNES, Alain. *Extractive metallurgy. 3, Processing operations and routes*. London : Hoboken: ISTE ; Wiley, 2011, xvi, 352 s. : il. ISBN 9781848212923.
- [23] Consarc Corporation 100 Indel Ave. Resources. Vacuum Arc Remelting Furnaces. *consarc* [online]. Rancocas: Consarc Corporation 100 Indel Ave [vid. 2016-3-10]. Dostupný z <http://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/var.pdf>
- [24] aceso PRAHA. Vakuové obloukové přetavování. *aceso* [online]. Praha: aceso PRAHA, ©1992–2016 [vid. 2016-2-12]. Dostupný z: <http://www.aceso.cz/vakuove-obloukove-pretavovani>
- [25] ALD Vacuum Technologies. Vacuum Arc Remelting. *ald-vt* [online]. Hanau: ALD Vacuum Technologies, ©2010–2013 [vid. 2016-2-19]. Dostupný z: <http://web.ald-vt.de/cms/vakuuum-technologie/anlagen/vacuum-arc-remelting-var>
- [26] RISACHER, Aurore, Pierre CHAPELLE, Alain JARDY, Jessica ESCAFFRE a Henri POISSON. Electric current partition during vacuum arc remelting of steel: An experimental study. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1302, **213**(2), 291-299 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.003. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013612002671>
- [27] GERASIMOV, A., A. DEDNEV, V. ELIZAROV, M. KISSELMAN a S. NEKHAMIN. Vacuum arc furnace for the production of composite ingots. *Russian Metallurgy (Metally)* [online]. Moscow: Pleiades Publishing, 1412, **2014**(12), 940-944 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1134/S0036029514120039. ISSN 00360295. Dostupné z: [http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/442/art%253A10.1134%252FS0036029514120039.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1134%2FS0036029514120039&token2=exp=1464261318~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F442%2Fart%253A10.1134%25252FS0036029514120039.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1134%252FS0036029514120039\\*~hmac=6860a90c65c39a4c9833a3a19fc02f5231eb50a41a9a6b53f3e18cef4cbc8070](http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/442/art%253A10.1134%252FS0036029514120039.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1134%2FS0036029514120039&token2=exp=1464261318~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F442%2Fart%253A10.1134%25252FS0036029514120039.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1134%252FS0036029514120039*~hmac=6860a90c65c39a4c9833a3a19fc02f5231eb50a41a9a6b53f3e18cef4cbc8070)

- [28] ANIKEEV, V. Process of production and quality of semicontinuous consumable electrodes for VAR. *Russian Metallurgy (Metally)* [online]. Moscow: Pleiades Publishing, 1406, **2014**(6), 479-484 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1134/S0036029514060020. ISSN 00360295. Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1134/S0036029514060020>
- [29] ALD Vacuum Technologies. Electron Beam Melting. *ald-vt* [online]. Hanau: ALD Vacuum Technologies, ©2010–2013 [vid. 2016-4-17]. Dostupný z: <http://www.ald-vt.com/cms/fileadmin/pdf/prospekte/EB.pdf>
- [30] ZUEV, M., A. BABENKO, S. BURMASOV, et al. Set of Production and Engineering Solutions for Reducing Energy and Material Consumption of Semifinished Steel Melting in Contemporary Electric Arc Furnaces. *Metallurgist* [online]. Boston: Springer US, 1411, **58**(7), 582-587 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1007/s11015-014-9959-2. ISSN 00260894. Dostupné z: [http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/796/art%253A10.1007%252Fs11015-014-9959-2.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs11015-014-9959-2&token2=exp=1464120881~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F796%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11015-014-9959-2.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs11015-014-9959-2\\*~hmac=1274851be970ffe5628604ba7a9af17b3cf7865865808359b4ff6db48c6c3118](http://download.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/static/pdf/796/art%253A10.1007%252Fs11015-014-9959-2.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs11015-014-9959-2&token2=exp=1464120881~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F796%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11015-014-9959-2.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs11015-014-9959-2*~hmac=1274851be970ffe5628604ba7a9af17b3cf7865865808359b4ff6db48c6c3118)