

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Studijní zaměření: Materiálové zkušebnictví

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Výroba tvárné litiny v malé slévárně

Autor: **Ludmila Formanová**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Hála, CSc.**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ludmila FORMANOVÁ**  
Osobní číslo: **S15B0397P**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **Materiálové zkušebnictví**  
Název tématu: **Výroba tvárné litiny v malé slévárně**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Podmínky pro výrobu - způsoby výroby
3. Vlastnosti - normované
4. Suroviny a vsázky
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


- **Otáhal, V.: Tvárná litina. Monografie**
- **Mores, A.: Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice. Slévárenství, duben 2012**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Hála, CSc.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Šimeček**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **21. září 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. září 2015

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

**V Plzni dne:** .....

.....

**podpis autora**

## **Poděkování**

Z celého srdce bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavovi Hálovi, CSc. za jeho obrovskou trpělivost, ochotu a čas, které mi věnoval při psaní a tvorbě práce, za cenné rady, jež mi poskytl. Rovněž děkuji Ing. Jiřímu Šimečkovi a Ing. Marcelce Štěrbové za sdělené informace, bez nichž by tato práce nemohla být napsána. Poděkování patří i všem pracovníkům fakulty, kteří se podíleli na této práci.

Děkuji celé své rodině a především mamince za psychickou podporu v těžkých chvílích. V poslední řadě bych ráda poděkovala přátelům, kteří vždy podrží a pomohou.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Formanová	Jméno Ludmila	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B 2341- Strojírenství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulu) Ing. Hála, CSc.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVISTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<del>DIPLOMOVÁ</del>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Výroba tvárné litiny v malé slévárně		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	45	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	35	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>	V teoretické části této práce jsou blíže popsány metody výroby tvárné litiny, praktická doporučení týkající se tepelného zpracování, obsahové množství prvků, jež je nutné dodržovat. Struktury litin.
<b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	V praktické části je proveden výpočet vsázky pro daný druh litiny. Porovnání výsledných hodnot tvárné a syntetické šedé litiny z hlediska ceny.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Tvárná litina, druhy, výroba, tepelné zpracování, vliv prvků, výpočet vsázky, struktura, modifikace, modifikátory, očkovadla, stupeň eutektičnosti, vsázka.

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Formanová	Name Ludmila
<b>FIELD OF STUDY</b>	B 2341 - Engineering	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hála, CSc.	Name Miroslav
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> <span style="float: right;"><b>Delete when not applicable</b></span>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Produce ductile iron in the little foundry	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Material Science and Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	45	<b>TEXT PART</b>	35	<b>GRAPHICAL PART</b>	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>Theoretical part in this work includes closer description and closer look on methods of producing ductile iron, practical advice related to heat treatment, the number of chemical elements to include, that is necessary to comply. Structures of cast iron.</p> <p>Practical part of this work is made of calculation of batch for given grey and ductile iron. Comparison of results - between the ductile iron and synthetic grey cast iron</p>
<b>KEY WORDS</b>	Ductile iron, synthetic cast iron, heat treatment, influence, modification, the batch, types, production, modifier, carbon equivalent.

## Obsah

1	Úvod.....	15
1.1	Historie tvárné litiny [4].....	15
1.2	Oblast použití tvárné litiny [4].....	15
1.3	Tvary grafitu v litinách.....	16
1.4	Druhy tvárné litiny.....	16
1.4.1	Normované druhy.....	16
1.4.2	ADI litiny (bainitické).....	17
1.4.3	Austenitické tvárné litiny.....	17
1.5	Struktura tvárné litiny – litý stav.....	18
1.5.1	Feritická struktura.....	18
1.5.2	Perlitická struktura.....	18
1.5.3	Feriticko-perlitická struktura.....	19
1.5.4	Perliticko-feritická struktura.....	19
2	Vstupní suroviny a vsázky.....	20
2.1	surová železa lišící se obsahem C, Mn, Si, P a S a cenou.....	20
2.2	ocelový odpad,.....	21
2.3	vratný materiál.....	21
2.4	nauhličovadla.....	21
2.5	feroslitiny.....	22
2.6	litinový odpad,.....	22
2.7	očkovadla.....	22
3	Výpočet vsázky.....	23
3.1	Příklad výpočtu vsázky pro materiál ČSN 42 2305.....	24
3.2	Výpočet vsázky pro syntetickou šedou litinu ČSN 42 2420.....	26
4	Výroba tvárné litiny.....	28
4.1	Metody výroby.....	28
4.1.1	Otevřená pánve – polévací způsob.....	29
4.1.2	Sandwich metoda – metoda sendvič.....	29
4.1.3	Tundish cover zpracovací pánve.....	31
4.1.4	Čajníkové Tundish pánve.....	32
4.1.5	Ponorný způsob.....	32
4.1.6	Metoda plněných profilů.....	33



4.2	Způsoby modifikace .....	34
4.3	Prvky přítomné při zpracování .....	36
4.4	Modifikátory.....	36
4.4.1	Hořčík.....	36
4.5	Cer a prvky vzácných zemin [1].....	38
4.6	Vápník.....	39
5	Normované vlastnosti.....	40
5.1	Volba chemického složení - Hendersonův diagram.....	40
5.2	Volba chemického složení dle jakosti .....	40
6	Vliv prvků na strukturu a vlastnosti tvárné litiny .....	41
6.1	Volba uhlíku a křemíku.....	41
6.1.1	Stupeň eutektičnosti (uhlíkový ekvivalent).....	41
6.1.2	Vliv obsahu křemíku na rázovou houževnatost.....	42
6.2	Hořčík.....	42
6.3	Nikl.....	43
6.4	Měď.....	43
6.5	Hliník.....	44
6.6	Mangan.....	44
6.7	Fosfor .....	45
6.8	Vliv stabilizačních prvků [1].....	46
6.8.1	Chrom.....	46
6.8.2	Vanad.....	47
6.8.3	Cín.....	47
6.9	Vliv plynů [1].....	47
6.9.1	Kyslík .....	47
6.9.2	Vodík.....	47
6.9.3	Dusík .....	48
7	Tepelné zpracování tvárné litiny .....	49
7.1	ARA diagramy .....	49
7.2	Způsoby tepelného zpracování.....	50
7.2.1	Žihání za účelem snížení vnitřních pnutí.....	50
7.2.2	Grafitizace vázaného uhlíku – rozpad karbidické struktury.....	51
7.2.3	Feritizace perlitu.....	52
7.2.4	Homogenizace .....	54

7.2.5	Normalizace.....	54
7.2.6	Kalení .....	55
7.2.7	Povrchové kalení .....	57
	Závěr.....	59
	Literatura .....	60

## Seznam obrázků

Obrázek 1-1 -Tvary grafitu v litinách dle ČSN [5] .....	16
Obrázek 1-2 - Struktura tvárné litiny v litém stav a) feritická, b) perlitická, c) feriticko-perlitická, d)perliticko-feritická tvárná litina [1] .....	19
Obrázek 4-1 - Metody výroby tvárné litiny [1].....	28
Obrázek 4-2 - Polévací metoda v otevřené pánvi [1].....	29
Obrázek 4-3 - Sandwich metoda v otevřené pánvi [1].....	29
Obrázek 4-4- Sandwich metoda .....	30
Obrázek 4-5 - Tundish pánev s pevným víkem - a) původní konstrukce, b) nová konstrukce [1].....	31
Obrázek 4-6 Čajníková Tundish pánev v provedení.....	32
Obrázek 4-7 - Ponorný způsob výroby tvárné litiny [1] .....	33
Obrázek 4-8 - Zařízení na zavádění plněných profilů do taveniny pro nižší výkony [1] .....	34
Obrázek 4-9 Jednostupňová výroba LKG, odlévání z pánvi se spodním výpustným otvorem [2].....	34
Obrázek 4-10 Jednostupňová výroba LKG, odlévání z pánvi s horním odléváním [2].....	35
Obrázek 4-11 Dvoustupňová výroba LKG, modifikace ve zpracovací pánvi, odlévání z pánvi s horním odléváním [2].....	35
Obrázek 4-12 Základní modifikátory na bázi nikl-hořčík [1].....	37
Obrázek 4-13 Chemické složení skupin přísad prvků vzácných zemin [1].....	38
Obrázek 5-1 Hranice optimálního složení uhlíku [1].....	40
Obrázek 6-1 Vliv obsahu křemíku na rázovou houževnatost [1].....	42
Obrázek 6-2 Vliv manganu na vlastnosti tvárné stav litiny .....	44
Obrázek 6-3 Mechanické vlastnosti v závislosti na obsahu fosforu - litina ve stavu po odlití [1].....	45
Obrázek 6-4 Mechanické vlastnosti v závislosti na obsahu fosforu – žíhaná litina [1].....	46
Obrázek 7-1 Struktura získaná po ochlazování.....	49
Obrázek 7-2 ARA diagramy tvárné litiny, 1- feritická, 2 perlitická tvárná litina [1] .....	50
Obrázek 7-3 - Průběh tepelného zpracování tvárné litiny pro grafitizaci vázaného uhlíku (rozpad cementitu) [1].....	52
Obrázek 7-4 - Vliv teploty a doby žíhání na rozpad perlitu v tvárné litině (3,2% C; 2,9% Si; 0,47% Mn) [1].....	53
Obrázek 7-5 Vliv teploty popouštění na pevnost, mez průtažnosti 0,2 a tažnost [1].....	56
Obrázek 7-6 Vliv teploty popouštění na tvrdost a vrubovou houževnatost [1] .....	56
Obrázek 7-7 Závislost kalicí teploty a pevnostních hodnot izotermicky kalené tvárné litiny [1] .....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Zadané chemické složení výsledné taveniny .....	24
Tabulka 3-2 Suroviny pro výrobu litiny ČSN 42 2305 .....	25
Tabulka 3-3 Použitý poměr surovin pro ČSN 42 2305 .....	25
Tabulka 3-4 Výsledné chemické složení pro ČSN 42 2305.....	26
Tabulka 3-5 Použité suroviny při výrobě syntetické litiny ČSN 42 2420 .....	26
Tabulka 3-6 Výsledné chemické složení syntetické litiny .....	26
Tabulka 3-7 Použitý poměr surovin pro syntetickou litinu.....	27
Tabulka 3-8 Výsledné chemické složení synt. litiny.....	27
Tabulka 5-1 Volba chemického složení dle jakosti .....	40
Tabulka 7-1 - Vliv doby žíhání na výslednou tvrdost tvárné litiny [1].....	54
Tabulka 7-2 Přehled způsobů tepelného zpracování tvárné litiny [1].....	58

## Seznam zkratk a symbolů

° C – jednotka teploty, Celsiův stupeň  
A – austenit  
A5 – tažnost  
ADI (*Austempered Ductile Iron*) – bainitické litiny  
Al – hliník  
ARA – anizotermický rozpad austenitu  
As - arsen  
ASTM (*American Society for Testing and Materials*) - Americká společnost pro zkoušení a materiály  
at – atmosféra (at = 101 325 Pa), staré označení jednotky tlaku  
B – bor  
BCIRA (*British Cast Iron Research Association*)- Britská výzkumná asociace pro litinu  
Bi -bismut  
C – uhlík  
Ca - vápník  
Ce – cer  
CE – uhlíkový ekvivalent  
cm<sup>2</sup> – centimetr čtvereční  
Cr – chrom  
Cu – měď  
ČSN – Česká technická norma  
E [MPa] – modul pružnosti v tahu  
EN – Evropská norma  
F – feritická struktura, ferit  
F+P – feriticko-perlitická struktura  
Fe – železo  
FeCr – ferochrom  
FeMnHC – feromangan s vysokým % uhlíku  
FeP – ferofosfor  
FeSi –ferosilicium  
H – vodík  
HB – tvrdost dle Brinella  
HRC – tvrdost dle Rockwella  
INCO (*International Nickel Company*)- Mezinárodní společnost vyrábějící nikl  
J – Joule  
KC [J/cm<sup>2</sup>] – vrubová houževnatost  
kg – kilogram  
kW – kilowatt  
LKG – litina s kuličkovým grafitem (tvárná)  
LLG – litina s lupínkovým grafitem (šedá)  
m – metr  
MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) - Protokol pro automatizaci výroby  
M<sub>f</sub> – konec martenzitické přeměny  
Mn - mangan  
MnS – sulfid manganu

Mo – molybden  
MPa – megapascal  
 $M_s$  – začátek martenzitické přeměny  
Mt – megatuna  
N - dusík  
Ni – nikl  
O - kyslík  
P – fosfor  
P – perlitická struktura, perlit  
P+F – perliticko feritická struktura  
Pb – olovo  
ppm (*parts per million*) – jedna miliontina  
 $R_m$  [MPa] – mez pevnosti v tahu  
 $R_{p0,2}$  [MPa] – smluvní mez kluzu  
S - síra  
Sb – antimon  
SiC – karbid křemíku  
Sn - cín  
V - vanad  
 $\gamma$  – austenit  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – hustota, měrný objem

# 1 Úvod

## 1.1 Historie tvárné litiny [4]

První zprávy o použití tvárné litiny pocházejí z Číny. Zde byla tvárná litina používána na výrobu zemědělského nářadí před více než 2000 lety.

V moderní historii vyrobil první tvárnou litinu dr. Adey v roce 1937 (náhodný objev) ve Slévárenském Institutu na Technické universitě v Cáchách tavením ve vysoce bazickém kelímku. Na tomto problému pracovala ve stejné době také skupina metalurgů pod vedením Dr. Morrogha na BCIRA v Anglii a modifikovali taveninu cerem.

Teprve náhodné objevení možnosti modifikace litiny hořčíkem v předslitině s niklem (NiMg) v laboratořích INCO v USA v roce 1942 Keithem Millisem umožnilo ekonomickou průmyslovou výrobu tvárné litiny. S využitím této technologie v průmyslovém měřítku se započalo až v roce 1948 u Ford Motor Co (USA), kde byly vyráběny první zalomené hřídele pro automobilové motory. Rozšíření výroby bylo brzděno vysokými licenčními poplatky (INCO). Teprve vývoj předslitin na bázi ferosilicium-hořčík (FeSiMg) v Německu v polovině padesátých let umožnil konkurenceschopnou výrobu tvárné litiny.

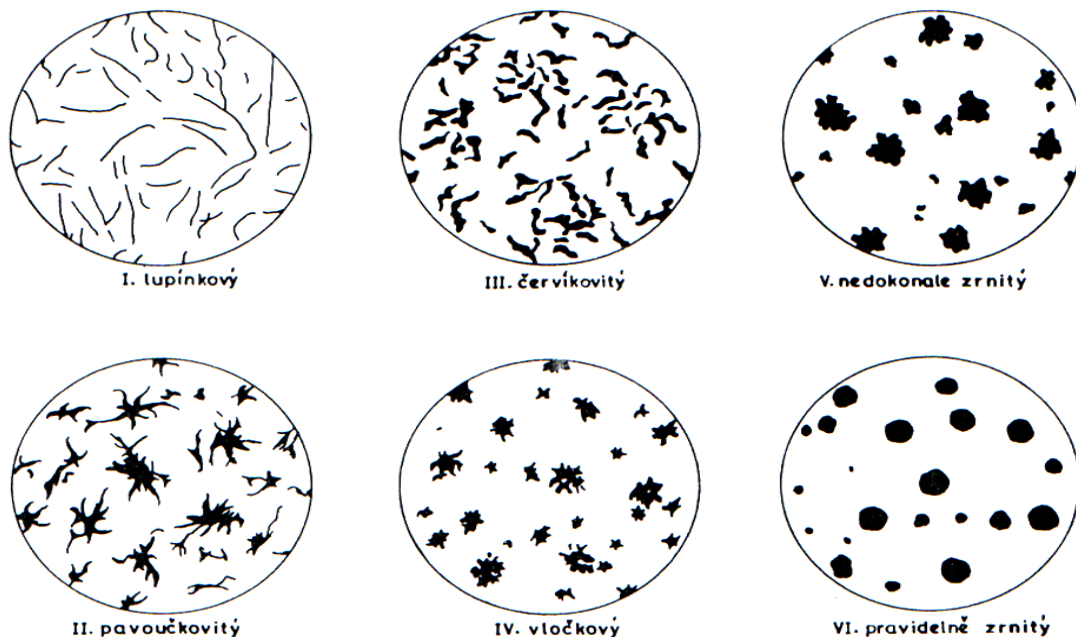
Vedle modifikace pomocí předslitin byly vyvinuty také modifikační technologie s použitím kovového hořčíku. To jsou například modifikace v tlakové pánvi (autoklávu), Fischerův konvertor atd. Odhaduje se, že přibližně 40 - 50 % světové produkce je v současné době modifikováno kovovým hořčíkem. V roce 2003 dosáhla tonáž světové výroby tvárné litiny 15 milionů tun.

## 1.2 Oblast použití tvárné litiny [4]

Mimořádně dobré mechanické vlastnosti, ekonomicky výhodná výroba a dobrá opracovatelnost jsou důvody velkého rozšíření použití tvárné litiny v průmyslu. Světová produkce tvárné litiny dosáhla v roce 2003 15 Mt (pro porovnání: šedá litina 37 Mt, litá ocel 6,3 Mt a temperovaná litina 0,9 Mt).

Přibližně 40–50 % světové výroby je využíváno v automobilovém průmyslu. Zde byly v posledních desetiletích postupně nahrazovány výrobně dražší kované, lisované a svařované součásti ekonomicky výhodnějšími odlitky. V současných automobilech jsou téměř veškeré bezpečnostní součástky jako závěsy kol, součásti řízení a dále motorové části jako klikové hřídele, ojnice, vačkové hřídele atd. vyráběny z tvárné litiny.

### 1.3 Tvary grafitu v litinách



Obrázek 1-1 -Tvary grafitu v litinách dle ČSN [5]

Tvar grafitu lze hodnotit dle normy ASTM nebo ČSN 42 0461. Tvárná litina je tvořena kuličkovým grafitem, znázorněna obrázkem V. a VI. dle normy.

### 1.4 Druhy tvárné litiny

rozlišujeme:

- 1) Běžné druhy tvárné litiny – normované
- 2) Tvárné litiny pro záporné teploty
- 3) Austenitické tvárné litiny
- 4) ADI litiny

#### 1.4.1 Normované druhy

Litiny jsou tříděny na základě jejich nejnižších hodnot pevnosti v tahu. Jakost LKG je definována pevností v tahu, mezí kluzu 0,2; tažností, tvrdostí podle Brinella a vrubovou houževnatostí.

**Jakost ČSN 42 2303** – LKG s feritickou základní hmotou. Zaručena vrubová houževnatost. Litina s největší tažností a houževnatostí. Náročný metalurgický postup při výrobě.

**Jakost ČSN 42 2304** – základní druh LKG se širokým použitím a výbornou obrobiteľností. Zaručená vrubová houževnatost.



**Jakost ČSN 42 2305** – obsah feritu se musí udržovat v určitém rozmezí. Tepelné zpracování klade velké nároky na rychlost chladnutí. Vyrábí se především odlitky s menší hmotností.

**Jakost ČSN 42 2306** – velmi výhodný druh při požadavcích na vyšší pevnost při současně dobré obrobitelnosti.

**Jakost ČSN 42 2307** – v případě požadavků na plnohodnotnou LKG s mezí kluzu 0,2 dostatečně vysokou nad min. hodnotu 420 MPa.

**Jakost ČSN 42 2308** – použitelnost omezena horší obrobitelností. Použití pro odlitky vyžadující dobrou odolnost proti otěru.

Pozn. Poslední dvojčíslí označení představuje minimální hodnotu pevnosti v tahu.  
např. ČSN 42 2304: Rm= 400 MPa

#### 1.4.2 ADI litiny (bainitické)

ADI litiny (z angl. Austempered Ductile Iron) jsou charakteristické svou výhodnou kombinací pevnosti, tažnosti a tvrdosti, která dosahuje, částečně i překračuje materiálové vlastnosti zušlechtěných ocelí. Bainitické litiny se získávají **izotermickým kalením** tvárné litiny. Ve srovnání s anizotermickým zušlechtěním má izotermické zušlechtěování řadu předností. Příkladem může být rychlejší průběh a lepší vlastnosti odlitků. U litin s vyšším obsahem Si je pro izotermické kalení doporučován rozsah teplot 300-350 °C. Tímto způsobem získaná litina má bainitickou matici s tvrdostí 300-400 HB. Přítomnost grafitu ve struktuře vede odolnosti vůči tření.

#### 1.4.3 Austenitické tvárné litiny

Řadí se mezi vysocelegované materiály, které vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi jejich typické vlastnosti patří vysoká odolnost proti korozi i ve velmi agresivních prostředích, dobrá žáruvzdornost a odolnost proti opalu, vysoká žárupevnost, vysoký koeficient tepelné roztažnosti, výhodné kluzné a otěruvzdorné vlastnosti, vysoká tažnost, nemagnetičnost.

Tyto litiny byly vyvinuty z původního materiálu Ni – Resist 1 (LLG – NiCuCr 15 6 2), tj. z austenitické litiny s lupínkovým grafitem získané legováním s 15 % Ni, 6 % Cu a 2 % Cr. Název Ni-Resist se často mezinárodně používá pro celou skupinu austenitických litin LLG i LKG.

Společným znakem těchto litin je stabilní austenitická kovová hmota (s malým množstvím karbidů). Pro její dosažení a stabilizaci je nutný obsah nejméně 20 % Ni, anebo odpovídající kombinace Ni, Cu, Mn a Cr.

#### Austenitické tvárné litiny se rozdělují dle DIN do 4 skupin:

**1. skupina** – typ s 13 % Ni a 7 % Mn se používá výhradně jako nemagnetický materiál s nízkou elektrickou vodivostí a výhodnými mechanickými vlastnostmi, je korozivzdorný.

**2. skupina** – zahrnuje litiny s 20 – 22 % Ni a má největší průmyslový význam.

**3. skupina** – litiny s 30% Ni jsou odolnější proti korozi než předcházející skupiny, nižší tepelná roztažnost.

**4. skupina** – litiny s 35 % Ni, minimální tepelná roztažnost a tím i nízké pnutí.

## 1.5 Struktura tvárné litiny – lity stav

Vhodným výběrem a kombinací jednotlivých prvků, s respektováním tloušťky stěny odlitku můžeme řídit strukturu i mechanické vlastnosti tvárné litiny.

Volba struktury, která má největší vliv na mechanické vlastnosti tvárné litiny, se řídí především podle toho, pro jaký účel se součásti z ní vyrobené budou používat. Maximálních hodnot pro daný účel lze dosáhnout jen pečlivým dodržováním vhodného chemického složení.

Podle obsahu jednotlivých prvků v tvárné litině můžeme získat po odlití feriticko-perlitickou strukturu s různým poměrem feritu a perlitu, nebo strukturu čistě feritickou, čistě perlitickou, martenzitickou (acikulární-jehlicovou) nebo austenitickou. Další přechodové struktury (bainitické) je možné získat tepelným zpracováním.

### 1.5.1 Feritická struktura

Čistě feritickou strukturu v tvárné litině je možné získat dvojím způsobem. Buď zvýšeným obsahem křemíku, nebo tepelným zpracováním. Feritická tvárná litina s vyšším obsahem křemíku má poněkud vyšší pevnost a tvrdost, než-li tvárná litina s nižším obsahem křemíku, získaná po feritizačním žíhání. Všeobecně lze říci, že má-li mít feritická tvárná litina maximální tažnost a tvárnost, musí obsahovat co nejméně manganu, fosforu a křemíku. Obvykle mají feritické tvárné litiny následující složení: 3,2 až 3,9% C, 1,8 až 3,0% Si, max. 0,3% Mn, max. 0,08% P a s minimálním množstvím perlit stabilizujících prvků. Dále pak vyžaduje kvalitní grafitizační očkování.

### 1.5.2 Perlitická struktura

V perlitické tvárné litině se obvykle kolem grafitových zrn vylučují feritické dvorce. Čím pomaleji tvárná litina chladne, tím jsou tyto dvorce větší. Při dostatečně rychlém ochlazení a určitém složení litiny (nízký Si, vyšší Mn), lze v tenčích průřezích odlitku získat čistě perlitickou strukturu. Všeobecně se však čistě perlitická struktura bez přísady některých prvků nedá v širším rozsahu tloušťek stěn odlitku prakticky získat. Snižuje-li se obsah křemíku a zvyšuje obsah manganu, k získání čistě perlitické struktury, je nebezpečí, že se v slabších stěnách odlitků současně vyloučí cementit.

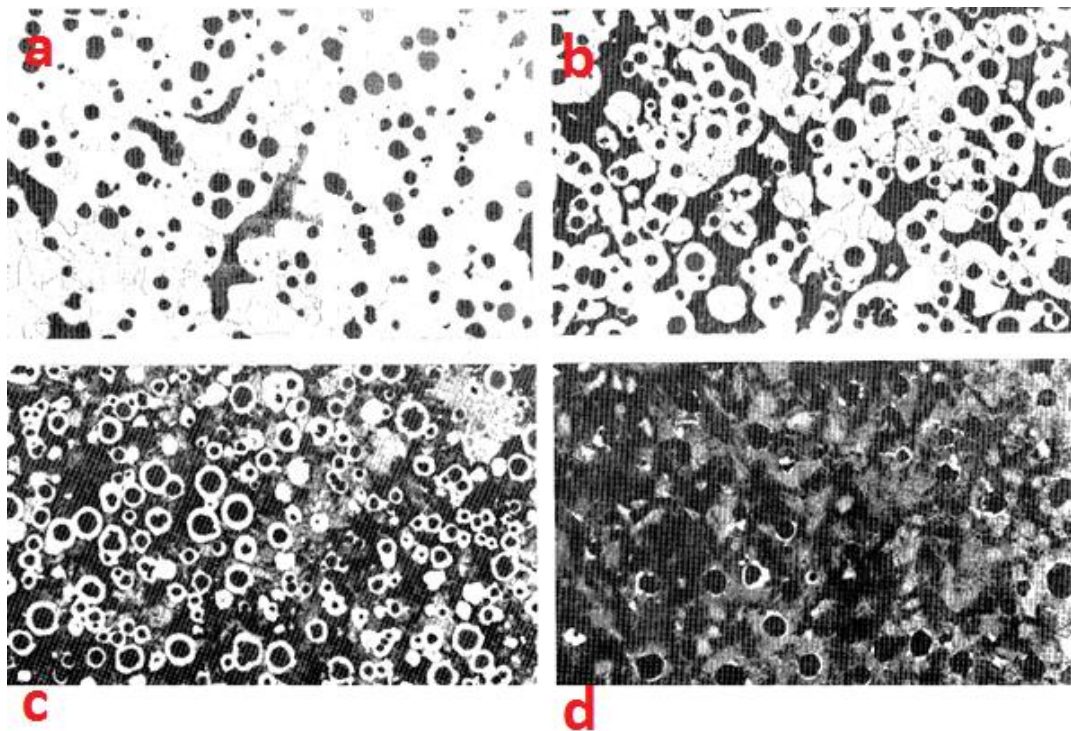
Čistě perlitickou strukturu bez volných karbidů lze však získat přísadou prvků jako jsou měď, cín a mangan. Tyto prvky brzdí přímou i nepřímou feritizaci.

### 1.5.3 Feriticko-perlitická struktura

**Feriticko-perlitická** struktura s různým poměrem feritu a perlitu. Je to nejobvyklejší struktura tvárné litiny a vzniká obvykle při tomto chemickém složení: 2,8 až 4,0% C, 1,8 až 3,0% Si, 0,2 až 0,8% Mn, max. 0,2% P, 0,01 až 0,007% S, a 0,04 až 0,12%. Struktura feriticko-perlitická s převážným obsahem feritu obsahuje více křemíku (2,6 až 3,2%) a méně manganu (0,5 až 0,2%). Vyznačuje se větší tažností a menší pevností. Zvyšuje-li se obsah křemíku i manganu, roste při zachování původní struktury poněkud pevnost, ale zmenšuje se tažnost a rázová houževnatost. Se snižujícím se obsahem křemíku a manganu se naopak mírně snižuje pevnost a zvyšuje tažnost a rázová houževnatost. Pro feriticko-perlitickou tvárnou litinu lze tedy doporučit obsah cca 2,8% křemíku a pod 0,3% manganu. Feriticko-perlitické tvárné litiny se mohou používat jak v litém stavu, tak i po feritizačním žíhání.

### 1.5.4 Perliticko-feritická struktura

**Perliticko-feritická** struktura s převážným obsahem perlitu obsahuje méně křemíku (1,8 až 2,6%) a více manganu (nad 0,4 až 0,8%). Tvárná litina tohoto složení má velmi dobré a vyrovnané mechanické vlastnosti. Zvyšuje-li se obsah křemíku i manganu tak, aby původní struktura zůstala zachována, roste poněkud pevnost litiny a tvrdost, ale snižuje se její tažnost a houževnatost. Snižuje-li se naopak mangan i křemík, pevnost nepatrně klesá, ale zvyšuje se tažnost a houževnatost. Pro perliticko-feritickou strukturu je tedy vhodný obsah kolem 2,4% křemíku a cca 0,6% manganu. Perliticko-feritická tvárná litina se velmi dobře uplatňuje jak v litém stavu, tak pro všechny druhy tepelného zpracování.



Obrázek 1-2 - Struktura tvárné litiny v litém stav a) feritická, b) perlitická, c) feriticko-perlitická, d) perliticko-feritická tvárná litina [1]

## 2 Vstupní suroviny a vsázky

Základním předpokladem je přesná specifikace všech vstupních materiálů s ohledem na požadovanou jakost odlitku a s požadavkem na certifikaci (složení, kusovost, balení). Veškeré materiály je potřeba před kontejnerizací vizuálně přezkontrolovat i s ohledem na velké znečištění (rez, nátěry, pokovování, zemina, organické látky-oleje, apod.), je potřeba též zohlednit podmínky certifikace. U materiálů u nichž není certifikace vhodná (nelze je přesně definovat) je nutno zajistit vlastní, např. chemické, případně i jiné zkoušky pro přejímku. Velmi pečlivou kontrolu je důležité věnovat ocelovému odpadu (druh, chemické složení, kusovost). Zejména pro výrobu tvárné litiny je nutno používat pouze přesně definované druhy. Ve slévárnách vyrábějících různé materiály, je nutné zajistit jejich důkladné oddělení. Jedná se především o vratný materiál, zmetky, vtoky a nálitky. Znečištění vratu z tvárné litiny šedou litinou může vést například k podstatnému zvýšení síry a fosforu ve vsázkových materiálech pro tvárnou litinu.

Vsázka je tvořena:

- - surovým železem lišícím se obsahem C, Mn, Si, P a S a cenou
- - ocelovým odpadem, který obsahuje např. 0,2 %C, 0,2 %Si a 0,4 %Mn
- - vratným materiálem
- - nauhličovadly či podsítným z koksu
- - feroslitinami
- - litinovým odpadem
- - modifikátory
- - očkovadly

### 2.1 surová železa lišící se obsahem C, Mn, Si, P a S a cenou

Dostupné jsou 2 druhy surových želez. Slévárenská a ocelárenská.

**Surová železa** - představují základní materiál kovové vsázky pro všechny typy litin dle ČSN EN 42 1221. Rozdělují se podle obsahu základních prvků na:

- slévárenská s obsahem Si nad 1,25% a C = 3,75 - 4,25%
- ocelárenská s obsahem Si do 1,25% a C = 4,20 - 4,7 %
- speciální na výrobu litin s kuličkovým grafitem s nízkým obsahem Mn, P, S.
- legovaná, která mají zvýšený obsah Mn, Cr, Cu, Ni, V, P

Slévárenská surová železa obsahují vyšší množství **křemíku**, a proto není již potřebné používat feroslitiny k dolegování materiálu na potřebný obsah Si. To platí i o obsahu **manganu**, který je potřeba k vyvážení obsahu síry dle vztahu:

$$\min \% \text{ Mn} = 1,76 \% \text{ S} + 0,3$$

Při výpočtu obsahu Mn, případně dalších karbidotvorných prvků je nutno brát v úvahu tloušťku stěny. Při nižší tloušťce stěny je nutno omezit i obsah Mn. Při výrobě tvárné litiny je nutné řídit obsah Mn v závislosti na jakosti tvárné litiny.

## 2.2 ocelový odpad,

který je vždy rozdílný především dle svého původu. Nebezpečný je vždy vrat nerezových ocelí, nástrojových ocelí a ocelí tříd 13, 14, 15, 16. Zejména jsou nebezpečné převodovky, motory, atd. pro značný výskyt legovaných ocelí i železných kovů, ložisek a olejů. Vždy je potřeba určit alespoň přibližné složení. Velice kvalitní odpad je hlubokotažný plech.

- Netříděný ocelový šrot obsahující např. 0,2 % C, 0,2 % Si a 0,4 % Mn. Je levnou surovinou s nejistým chemickým složením, může docházet k natavení nežádoucích prvků.
- Ocelový šrot rozdělený podle tříd chemického složení. Je dražší vsázkovou surovinou, ale má spolehlivější chemické složení.
- Lisované balíky odpadového plechu z výroby karoserií automobilů - jedná se o nejkvalitnější ocelový materiál. Jeho vlastnostmi jsou - zaručené chemické složení, nízký obsah S a P (vhodný pro výrobu tvárné litiny nauhličováním). Nevýhodou je nízký obsah Mn.

## 2.3 vratný materiál

z předchozích taveb, který má zhruba stejné složení jako připravovaná slitina. Jeho podíl ve vsázce bývá cca 20 - 50%. Největší část vratného materiálu tvoří nejčastěji vtoky, nálitky a zmetky. Podíl vratného materiálu nesmí být vysoký z důvodu kumulace nežádoucích plynů (N) a jiných prvků z důvodu neustálého hromadění prvků ve vsázce, které nelze v indukční peci odstranit.

## 2.4 nauhličovadla

jsou vysokouhlíkové materiály, (nejčastěji koks, antracit a grafit), které se používají v elektrických pecích pro zvýšení obsahu uhlíku. Jejich jakost je posuzována podle rychlosti nauhličování a využití uhlíku. Jejich kvalita závisí na nízkém obsahu síry, dusíku a popela. Popel způsobuje tvorbu strusky. V dnešní době se na trhu nachází mnoho druhů nauhličovadel, která se liší především v obsahu popela a síry. Dále jsou k dispozici nauhličovadla s minimálním obsahem síry, popela případně i dusíku (především pro tvárnou litinu s velkými průřezy, pro těžké odlitky). Využití uhlíku je zde i přes 95%. Podsítné z koksu má vysoký obsah síry i popela.

## 2.5 feroslitiny

Feroslitiny se používají pro zvyšování obsahu Si, Mn, Cr, Mo, Cu, Ni, V, a dalších prvků.

Všechny dodávky feroslitin musí mít dodavatelský rozbor, především pro obsah požadovaného prvku. Existují různé druhy feroslitin, lišící se dle obsahu hlavních i vedlejších legovacích prvků: FeSi 45 %, FeSi 65 % a FeSi 75 % o různé kusovosti – od 3 do 100 mm. Dalšími produkty jsou ferochromy FeCr s obsahem uhlíku od min. 0,03 % až po max. 0,50 % i další druhy FeCr s obsahy uhlíku 1,00; 2,00 až 9,00 %. Obsah Cr je u všech typů min. 60 % a kusovost 10–50 mm nebo 10–100 mm. Ferofosfory FeP 25 % o kusovosti 10–50 mm, feromangany FeMnHC s obsahy Mn min. 76 %, C max 6,5–7,5 % s kusovostí 10–50 mm a 10–100 mm. Na trhu jsou i komplexní typy feroslitin: FeSiMn – Mn min. 65 %, Si max. 16–20 %, C max 1,5 %.

## 2.6 litinový odpad,

nakupovaný. Jedná se často o netříděný a relativně levný materiál (ve srovnání se surovým železem). Obdobně jako u oceli je vždy rozdílné složení především dle svého původu. Litinový odpad často obsahuje vysoké množství síry a fosforu. Je třeba mít představu o jeho užití vzhledem ke konečnému produktu. Výše uvedená vsázková surovina se používá např. k odlití nenáročných odlitků nebo ke zlevnění vsázky z kvalitnějších surovin. Pro tvárnou litinu se velice zřídka používá.

## 2.7 očkovačla

Pro snadnou a levnou výrobu tvárné i šedé litiny je vhodné mít k dispozici karbid křemíku (SiC) pro vsázku a zlevnění její ceny. SiC se v peci rozkládá ze 70 % na volný Si a ze 30 % na volný C. Tyto složky se následně rozpouštějí v litině. Z tohoto poměru vyplývá, že 90 % karbid křemíku nahrazuje v poměru 1:1, 75 % FeSi. Touto náhradou lze dosáhnout úspory vstupních surovin při zvýšení kvality litiny. Výhodou použití SiC oproti FeSi je ta, že při rostoucí teplotě roste odkysličovací schopnost uhlíku. SiC se netaví, ale ve slitině se rozpouští pomalu. Působí jako přeočkovací přísada. Naproti tomu odkysličovací schopnost ferosilicia se vzrůstající teplotou klesá. V případě použití ferosilicia se zvyšuje kvalita litiny a je možné využít více vratného materiálu a zlomkové litiny. Ferosilicium ve formě tzv. briket zajišťuje, že SiC vyhořívá jen pomalu, k rozpadu briket dochází nad 1000 °C. Dodávají se i kombinované brikety SiC + C.

Po modifikaci a grafitizačním očkovaní by tvárná litina měla obsahovat kolem 2,4 – 2,8 % Si.

### 3 Výpočet vsázky

**Při výpočtu vsázky je nutno řešit několik problémů.** Je možné je ve stručnosti shrnout:

- požadavek na dosažení požadovaného chemického složení všech prvků v přijatelném rozmezí daného normou, nebo požadavkem odběratele

- důležité je dosáhnout co nejnižšího obsahu škodlivých prvků zejména síry a fosforu.

V budoucnosti bude nutné řešit problém zvyšujícího se obsahu mědi, niklu (tam kde to norma nepovoluje), cínu, olova, antimonu, kobaltu v běžných typech netříděného šrotu, které nelze běžným metalurgickým postupem snížit. Velké problémy s obsahy nežádoucích prvků lze očekávat s postupnou recyklací zboží pocházejícího z Dálného východu. Zde jsou notoricky známé případy chronického porušování předpisů pro vsázivání a taktéž dochází k problémům s recyklací, např. součástí jaderných zařízení bez odpovídajících opatření, což je zde v Evropě nepřijatelné

- ekonomické aspekty výpočtu vsázky, tj. používání co možno nejlevnějších surovin (ocelový šrot, zlomková litina, vysokouhlíkové feroslitiny) na úkor drahých čistých feroslitin a kovů. Využívání netradičních zdrojů surovin s ověřeným chemickým složením (např. zpětný odběr opotřebovaných součástí od odběratelů za zvýhodněnou cenu, apod.) Je důležité posuzovat i energetické nároky z hlediska ekonomického. Např. výroba litiny z oceli nauhličováním je výhodná z důvodu nízkého obsahu S a P ve vsázce a levnější vsázce z oceli, je však nutno mít na mysli vyšší energetické nároky (ocel má vyšší teplotu tavení).

- vzít v úvahu momentální dostupnost uvažovaných surovin

Nejčastějším případem pro výrobu tvárné litiny bude zřejmě využití elektrické indukční pece. Tato pec funguje jako pec čistě přetavovací, tj. bez významné změny chemického složení. U některých prvků je však nutno vzít v úvahu **propal** (tzn., dochází ke ztrátám) některých prvků:

- Mn, Cr – cca 2-4%
- Si – cca 5%
- Al - 35-40%

Využití uhlíku z nauhličovadel je zpravidla 0,6-0,8. Obsah C obsaženého v surovinách – surovém železe, ocelovém odpadu, feroslitinách se významně nemění. Pro doplnění obsahu C se v případě tavby oceli používají feroslitiny s vyšším obsahem C, které jsou většinou levnější, než nízkouhlíkové.

**Chemické složení** bývá zpravidla předepisováno s určitým rozmezím a nežádoucími prvky např:

C 3,5-3,8%, Si 2,4-2,6%, Mn <0,3%, S <0,05%, P <0,1%, Cr <0,1%

Z ekonomických důvodů se zpravidla počítá s dolní hranicí rozmezí, zejména u drahých prvků, jako je Mo, V, Ni, Co. U nežádoucích prvků je třeba kalkulovat s nutností mít k dispozici rezervu, jelikož nelze zkontrolovat celý objem vsázkového materiálu.

Nejjednodušší pro výpočet je vycházet z **bilančních rovnic pro materiál:**

Pro daný prvek je sestavena rovnice

$$vS_1X_1 + vS_2X_2 + \dots + vS_nX_n = S_{\text{prvku}}$$

kde  $v$  je využití prvku v surovině (1 – propal prvku),

$S_{1-n}$  - obsah prvku v surovině,

$X_{1-n}$  - podíl suroviny na budoucí vsázce.

Dalším problémem, který je třeba vzít v úvahu je **výpočet ceny vsázky**. Proto je třeba řešit další rovnice

$$X_1C_1 + X_2C_2 + X_nC_n = C_{\text{min}}$$

Kde  $X_{1-n}$  je podíl suroviny na vsázce a  $C_{1-n}$  cena suroviny. Je třeba pokud možno najít minimum, tak aby činnost dávala ekonomický smysl.

Při stejném počtu surovin jako je počet kontrolovaných prvků je možno předpokládat, že výpočet optimální vsázky má jedno netriviální řešení a lze jej řešit např. Gaussovou eliminací. Často je však počet surovin vyšší, než počet prvků a počet rovnic je vyšší, než počet proměnných. Počet možných řešení je tedy nekonečný. Pro výpočet je zpravidla nutno přistupovat dle zkušenosti, nebo použít optimalizační výpočty pomocí numerických metod, např. simplexní metody. S výhodou lze využít tyto funkce, které jsou obsaženy v programu Microsoft Excel. V praxi jsou využívány slévárenské softwary, které tyto výpočty provádějí automaticky, takéž jsou využívány jednodušší výpočty, kdy se nejprve učiní přibližný odhad, sestaví se předchozí rovnice a podle výsledků se poměr postupně upřesní. Ekonomický aspekt se posléze řeší až odděleně.

### 3.1 Příklad výpočtu vsázky pro materiál ČSN 42 2305

Je nutno vypočítat optimální poměr jednotlivých surovin. V následující tabulce jsou zobrazeny suroviny, které jsou k dispozici pro výrobu i jejich ceny. Ceny jsou orientační, jsou závislé na aktuální situaci na trhu se surovinami.

Obsah prvku	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu
<b>tvárná litina</b>							
<b>min</b>	3,45	2,65	0.45	0	0	0	0.55
<b>max</b>	3,55	2,8	0.55	0.09	0.05	0.1	0.6
<b>šedá litina</b>							
<b>min</b>	3,4	2	0.45	0	0	0	0
<b>max</b>	3,6	2,2	0.6	0.15	0.1	0.1	0.12

Tabulka 3-1 Zadané chemické složení výsledné taveniny



suroviny	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Cr	%Mg	cena/kg (Kč)
<b>očkavadlo</b>	0,15		65	0,03	0,01				40
<b>modifikátor</b>			45					6	50
<b>surové železo</b>	4	0,1	1	0,05	0,02	0	0,01		12
<b>ocel</b>	0,2	0,6	0,3	0,08	0,04	0,12	0,1		6
<b>vrat</b>	3,5	0,4	2,3	0,1	0,03	0,1	0,04		3
<b>nauhličovadlo</b>	80				1				50
<b>FeSi75</b>	7		75						40
<b>Cu</b>						100			130
<b>FeMn HC</b>	6	75	6	0,35	0,03				35
<b>hlubokotažné plechy</b>	0,08	0,25	0,2	0,025	0,025	0,04	0,01		15

Tabulka 3-2 Suroviny pro výrobu litiny ČSN 42 2305

### Vsázku je možno sestavit podle různých užitých surovin

Tvárnou litinu lze druhotně bud' pomocí surového železa, nebo lze vytvořit tzv. syntetickou litinu, nauhličením kvalitní ocelové vsázky. Vratný materiál bude omezen na 20%. Předpokládáme podíl 1,5% modifikátoru a 1% očkavadla.

### Výsledné složení při užití surového železa:

suroviny	vypočítaný podíl [%]
očkavadlo	1,5
modifikátor	1
surové železo	35,92
ocel	38,43
vrat	20
nauhličovadlo	2,07
FeSi75	0,45
Cu	0,48
FeMn HC	0,16
<b>hlubokotažné plechy</b>	<b>0</b>

Tabulka 3-3 Použitý poměr surovin pro ČSN 42 2305

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Cr
výsledek	3,45	0,45	2,65	0,07	0,05	0,55	0,05

Tabulka 3-4 Výsledné chemické složení pro ČSN 42 2305

Cena za 1 kg vsázky: 15,20 Kč

### 3.2 Výpočet vsázky pro syntetickou šedou litinu ČSN 42 2420

suroviny	vypočítaný podíl [%]
očkovadlo	0
modifikátor	0
surové železo	0
ocel	71,7
vrat	20
nauhličovadlo	4,4
FeSi75	0,97
Cu	0,43
FeMn HC	0
hlubokotažné plechy	0

Tabulka 3-5 Použité suroviny při výrobě syntetické litiny ČSN 42 2420

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Cr
výsledek	3,45	0,49	2,8	0,08	0,08	0,55	0,07

Tabulka 3-6 Výsledné chemické složení syntetické litiny

Cena za 1 kg vsázky: 9,15 Kč

V případě vsázky pro syntetickou šedou litinu byly vypočteny tyto hodnoty:

<b>suroviny</b>	<b>vypočítaný podíl [%]</b>
očkovaadlo	0,00
modifikátor	0,00
surové železo	0,00
ocel	73,99
vrat	20,00
nauhličovaadlo	4,22
FeSi75	1,79
Cu	0,00
FeMn HC	0,00
hlubokotažné plechy	0,00

**Tabulka 3-7 Použitý poměr surovin pro syntetickou litinu**

	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Cr</b>	<b>Sc</b>
<b>výsledek</b>	3,400	0,507	2,000	0,081	0,079	0,111	0,075	0,94

**Tabulka 3-8 Výsledné chemické složení synt. litiny**

**Cena za 1 kg vsázky: 7,90 Kč**

Při výrobě tvárné litiny je potřeba udržovat množství síry a fosforu na nižších hodnotách, než je tomu u litiny šedé, naopak množství křemíku i mědi je vyšší.

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že litina ČSN 42 2305 má oproti syntetické litině vyšší jednotkovou cenu. Tato skutečnost je ovlivněna rozdílným složením vsázkových surovin – vyšší množství surového železa, které je ve srovnání s ocelí či vratem drahé. Nejdražšími surovinami je pro svá vyčerpaná naleziště měď. Dalšími vysoce ceněnými položkami jsou očkovaadla, modifikátory a nauhličovaadla, jejichž kvalita je přímo úměrná ceně.

## 4 Výroba tvárné litiny

Výchozím polotovarem pro výrobu tvárné litiny je litina šedá, u níž je grafit vyloučen ve formě lupínků. Abychom docílili tvárné litiny (tj. litiny s kuličkovým grafitem), přidává se do taveniny tzv. modifikátor. Nejpoužívanějším prvkem se osvědčil hořčík. Prudkost reakce při použití hořčíku je možné snížit dvěma způsoby: použitím zvláštních zařízení (krytých pánví, kabin, přetlakových pánví a přetlakovými komorami nazývanými autoklávy). Druhým způsobem snížení prudkosti reakce hořčíku s taveninou spočívá ve snížení jeho obsahu v modifikační přísadě pomocí dalších prvků, např. Ni, Cu, Si. Hořčík je karbidotvorným prvkem, proto používáme grafitizačních očkovaadel – nejužívanější jsou na bázi FeSi.

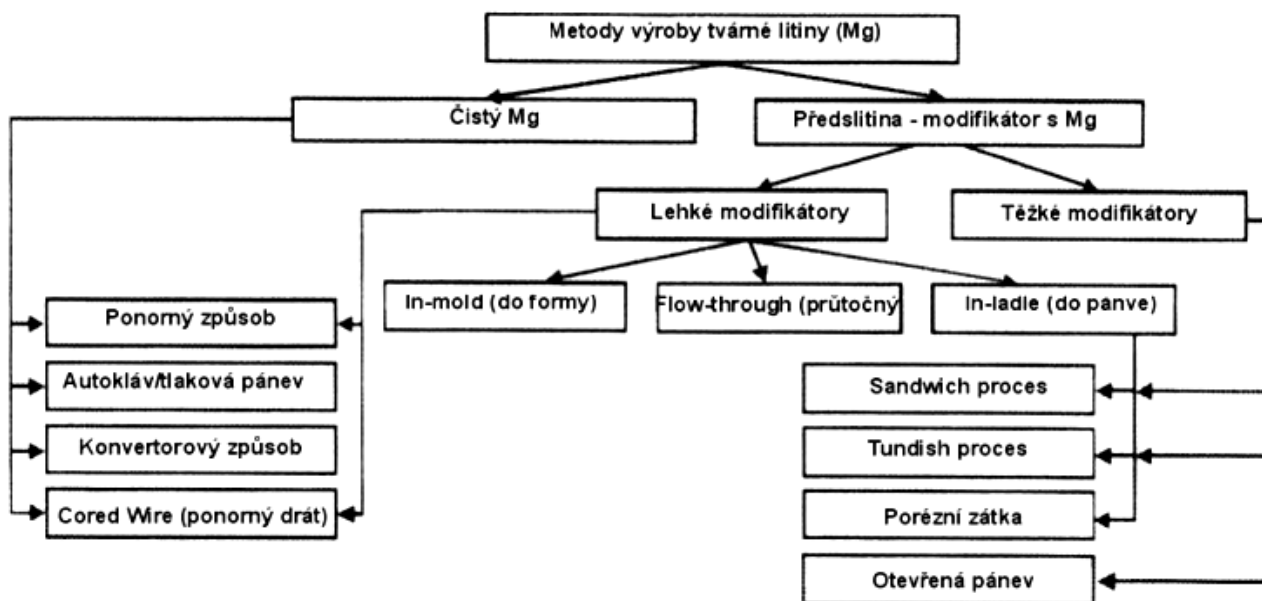
Pro vlastní proces modifikace lupínků grafitu existuje více teorií (Otáhal), ale vlastní modifikace je vždy prováděna prvky, které jsou v práci blíže popsány. Tedy prvky, které mají vysokou afinitu k síře a kyslíku.

### 4.1 Metody výroby

Tvárnou litinu je možné vyrábět přidáním čistého hořčíku nebo jeho předslitiny do taveniny.

**Čistý hořčík** se rovnoměrně dávkuje do taveniny, dochází ke snížení úniku hořčíku ze zpracovací pánve. Samotný hořčík je umístěn na dně pánve v reakční komoře. Např. u metody MAP se pro modifikaci používají hořčíkové polotovary - hranoly, profily, nebo destičky obalené žáruvzdorným materiálem s jednou obnaženou stranou. Žáruvzdorný obal brání přímému styku hořčíku s taveninou a tím tlumí bouřlivost reakce. Velice rozšířen je způsob modifikace pomocí drátu z hořčíku. **Předslitiny** obsahují mimo Mg i další prvky – např. Si, Ni, Fe, Al, Cu, Ca.

Na schématu jsou uvedeny různé **metody výroby tvárné litiny**. Podrobněji vysvětlíme jen ty metody, se kterými se ve výrobě setkáme nejčastěji.



Obrázek 4-1 - Metody výroby tvárné litiny [1]

#### 4.1.1 Otevřená pánev – polévací způsob

Tato výrobní technika je nejjednodušší a byla z počátku pro svou jednoduchost používána nejhojněji. U této metody, odměřené množství předslitiny modifikátoru bylo uloženo na dno otevřené, předehřáté zpracovací pánve, a bezprostředně se pánev zaplnila odměřeným množstvím taveniny.

Pánev měla z počátku rovné dno, ale výhodnější je skloněné, vytvářející jakousi „kapsu“, což dává vyšší využití Mg. Pánev má být štíhlá, s výškou min. 2,5 až 3 násobek průměru, aby styk hořčkových par s taveninou byl co nejdelší. Rychlost plnění pánve taveninou má být co nejkratší, minimálně 1 tona taveniny za 15 vteřin. Hladina taveniny v pánvi má být min. 300 mm pod okrajem pánve, aby byl eliminován rozstřík kovu z pánve. U této metody se spojuje modifikace s očkováním tím, že se modifikátor přímo směšuje s očkovadlem (FeSi). Vyšší využití dávají tak zvané těžké modifikátory na bázi Ni a Cu i Mg a to 50 až 70%. Jsou však velmi drahé a mimo to vhodné pouze pro tvárné litiny s perlitickou strukturou, nebo

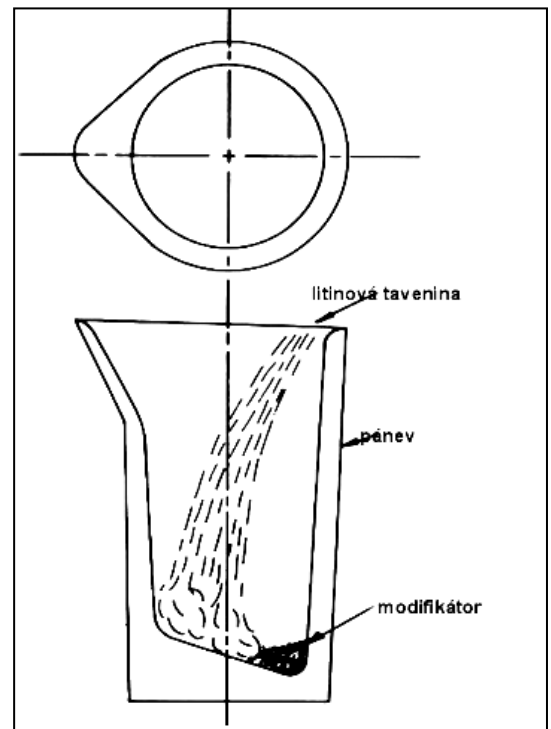
litiny legované. Použití vratného materiálu je též z tohoto důvodu omezeno (obsah Ni a Cu).

#### 4.1.2 Sandwich metoda – metoda sendvič

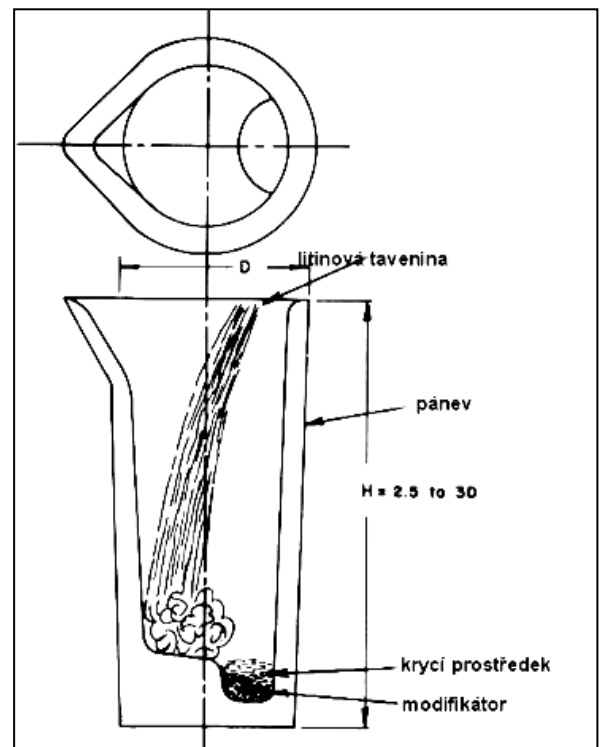
Metoda Sandwich je přímým následníkem polévací metody v otevřené pánvi. Celkové uspořádání zůstává stejné, jako v předešlém případě, pouze spodek pánve je upraven tak, že na opačné straně „hubičky“ pánve je vytvořena ve dně pánve prohlubeň, jakási reakční komora např. ve tvaru kruhové výseče (viz obr. 4-3).

V případě, že je tento zásobník modifikátoru umístěn např. uprostřed pánve (obr.4-4 a), mívá tvar válce. Objem zásobníku musí pojmout příslušné potřebné množství předslitiny – modifikátoru a tak zvaný krycí materiál, který zabrzdí počáteční styk taveniny s modifikátorem. Název metody je odvozen právě od této skladby různorodých vrstev při modifikačním procesu.

Jako primární očkovadlo, tj. modifikátor se používá většinou předslitina MgFeSi (5-6% Mg). Předslitinu a krycí prostředek možno do reakční komory přidávat prostřednictvím zaváděcího trychtýře (obr. 4-4 c). Využití Mg je oproti předcházejícímu způsobu vyšší, cca 40-50%. Je to způsobeno postupnou pozvolnější reakcí, v důsledku omezeného přístupu taveniny, přes rozpouštějící se krycí materiál. Reakce je klidnější, zajišťuje delší styk hořčkových par s taveninou, větší ochlazení tave-

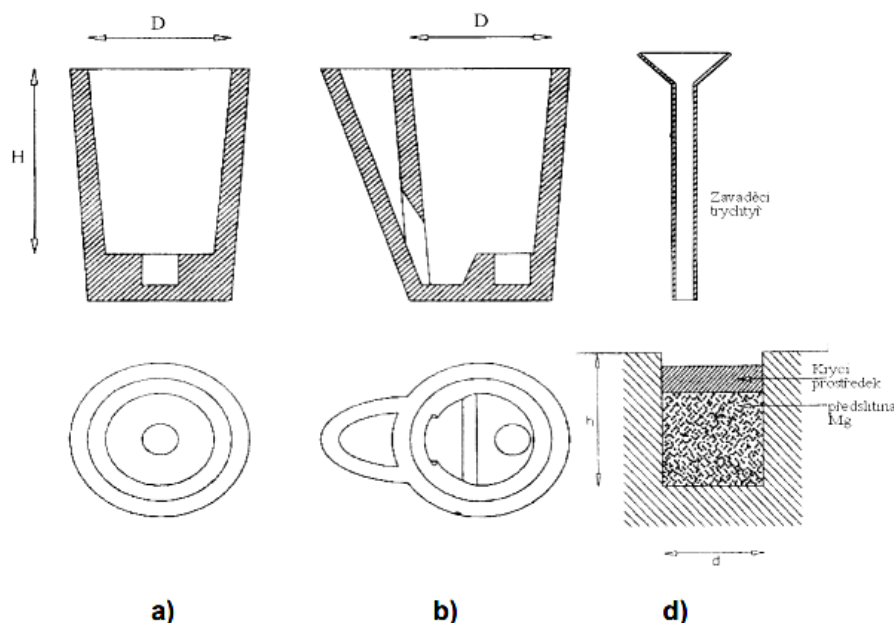


Obrázek 4-2 - Polévací metoda v otevřené pánvi [1]



Obrázek 4-3 - Sandwich metoda v otevřené pánvi [1]

niny u dna pánve a její „přesycení“ hořčíkem, míšení této přesycené taveniny s teplejší ještě nemodifikovanou taveninou.



Obrázek 4-4- Sandwich metoda

a) zásobník uprostřed pánve, b) čajníková pánve, c) zaváděcí - plnicí trychtýř, d) zásobník [1]

Metoda umožňuje použití předslitiny s poměrně velkým rozsahem zrnitosti (0,1 až 10 mm), což je ekonomicky výhodné. Jako krycí materiál se osvědčil plech z nelegované uhlíkové oceli, který se beze zbytku roztaví (o max. tloušťce 1,8 mm), nebo vhodně drcené FeSi. Povrch krycí vrstvy má ležet cca 25 až 30 mm pod úrovní dna pánve. Při použití plechu je nutno na jeho roztavení počítat s tepelnou ztrátou cca 25-28 °C a ztrátou uhlíku o cca 0,07%. Množství krycího materiálu činí cca 1-2% hmotnosti taveniny. Zrnitost FeSi se pohybuje v rozmezí 1 až 12 mm.

Jako **krycí materiál** možno též použít např. rozstřík z tvárné litiny, čisté ocelové třísky, kalcium karbid, písek pojený pryskyřicí, nebo čistý křemenný písek. Žádný z nich však nedosáhl většího rozšíření. Při použití písku, jako krycího prostředku, je-li dobře rozprostřen se roztaví a vytvoří sklovitý krunýř, který dobře chrání modifikátor proti reakci. Teprve po proražení tohoto krunýře z vnějšku, přes sloupec taveniny tyčí, nastává reakce. Tento postup se nazývá trigger proces (spouštěcí proces). Pro Sandwich metodu možno též využít čajníkový typ pánví (obr. 4-4 b).

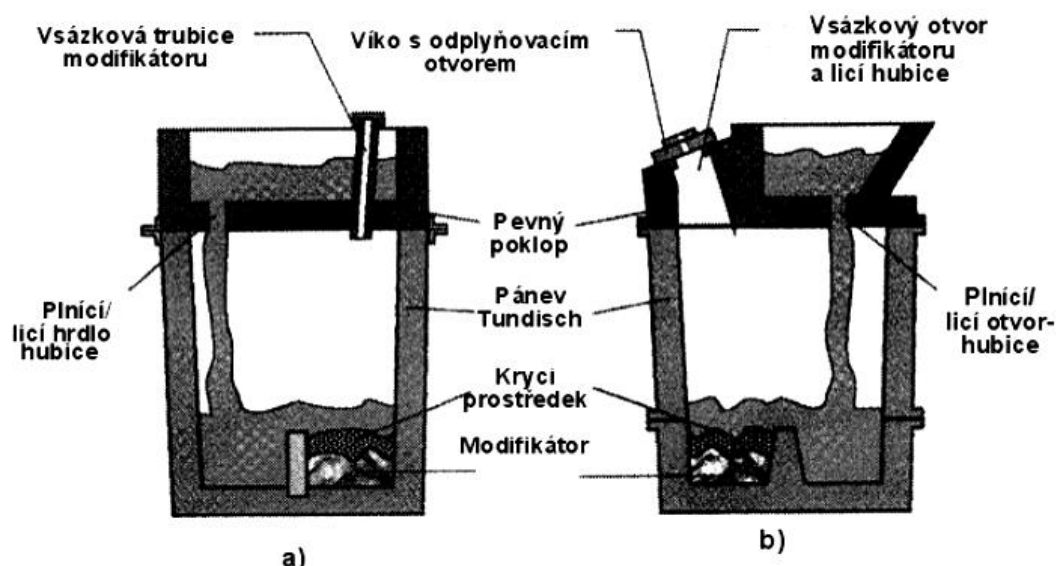
Celkové tepelné ztráty u Sandwich metody činí, při dostatečném přehřevu pánve cca 40 až 60 °C. Metodu možno použít téměř bez omezení pro různou velikost pánví. Nevýhodou je nutnost použití výchozí taveniny s nízkým obsahem síry, celkem nestabilní výtěžnost Mg a relativně velké pyroefekty, jak je u polévacích metod do otevřených pánví běžné. Optimální

množství Mg v předslitině MgFeSi činí 6 - 6,5%. V rozmezí teplot mezi teplotou odpichu (zpracovací teplotou při modifikaci) 1575 °C a lící teplotou 1450 °C, činí výtěžnost Mg 55 až 71%. S rostoucím množstvím předslitiny MgFeSi (0,8 až 2%), klesá lící teplota a výtěžnost Mg.

#### 4.1.3 Tundish cover zpracovací pánve

Metoda vychází z jednoduchého předpokladu, který uvažuje, že omezením přístupu kyslíku během reakce taveniny s hořčíkem v modifikátoru se docílí dvojího efektu:

1. Při sníženém přístupu kyslíku vzniká mnohem menší množství hořčíkových výparů-dýmu. Vytvořené množství těchto zplodin zůstává uzavřeno nad hladinou taveniny a nemůže unikat do okolí.
2. Vzhledem k tomu, že jsou ztráty oxidací hořčíku podstatně menší, zvyšuje se využití hořčíku pro vlastní modifikaci.



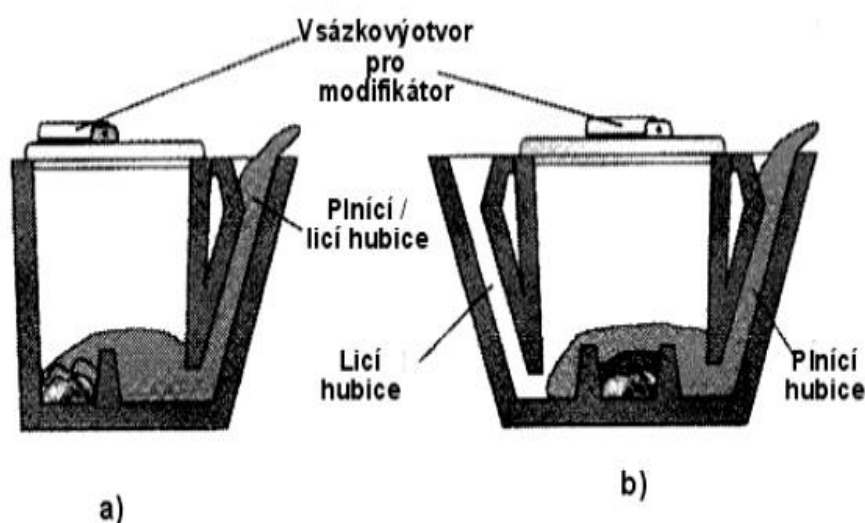
Obrázek 4-5 - Tundish pánve s pevným víkem - a) původní konstrukce, b) nová konstrukce [1]

Tohoto účinku se docílí použitím speciálního víka, které je umístěné na zpracovací pánvi, jejíž tvar je v podstatě totožný s předcházejícími. Víko je konstruováno jako lící jamka s otvorem k plnění pánve taveninou konstantní rychlostí. Modifikátor a krycí prostředek se umísťují jako v předcházejících případech na dno pánve do vytvořeného zásobníku. Například na obr. 4-5 a, je zásobník vytvořen vloženou rozdělovací přepážkou vytvořenou stěnou (na obr. 4-5 b). Proud taveniny z „lící jamky“ směřuje mimo zásobník s modifikátorem a přepážka brání přímému styku čerstvé taveniny s modifikátorem. Použitý krycí prostředek je pokládán ve slabší vrstvě, jako u polévacích metod. Přes průkazné efekty se metoda Tundish cover, v důsledku obtížné manipulace s víkem rozšiřovala velmi sporadicky. Tento hlavní nedostatek byl částečně odstraněn použitím upevnitelného víka k pánvi pomocí šroubů, klínových svorek nebo zástrček, případně vyspárováním netěsností maltou. Tento způsob však má nevýhodu vytváření struskové klenby v místech plnicího/odlívacího otvoru (viz obr. 4-5 a).

Nová konstrukce (obr. 4-5 b) je opatřena zvláštním otvorem, kterým se přidávají modifikační přísady a slouží i jako odlévací hubice. Tento pomocný otvor je uzavíratelný víkem. Ve víku je též umístěn pojistný ventil. Po modifikaci a otevření slouží otvor jako odlévací hubice a pomáhá k odstraňování strusky.

#### 4.1.4 Čajníkové Tundish pánve

Tyto pánve umožňují snadné odstraňování strusky. Po umístění modifikačních přísad se pomocné víko uzavře, zajistí a pánve se naplní přes rozšířenou plnicí/licí hubici pánve (obr.4-6 a). Po skončení reakce se toutéž hubicí modifikovaná litina vylije. K dokonalému vyčištění pánve slouží základní krycí víko.



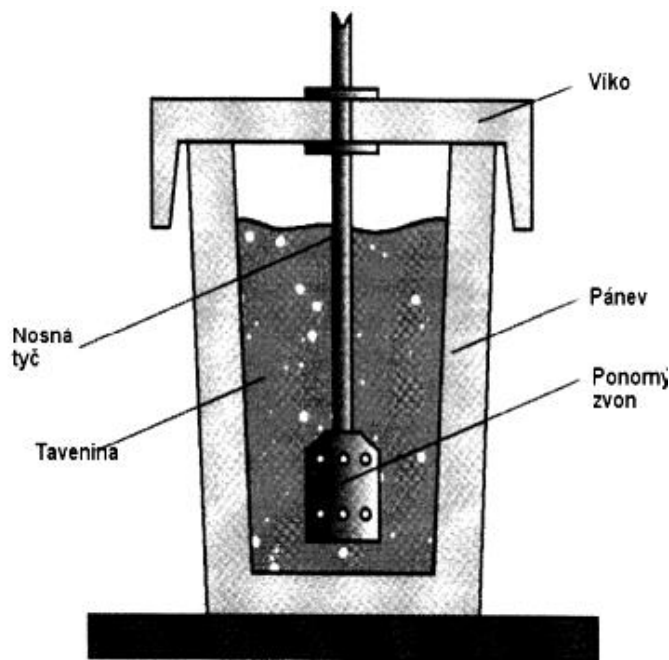
Obrázek 4-6 Čajníková Tundish pánve v provedení

a) se společnou plnicí/licí hubicí; b) se samostatnou plnicí a licí hubicí

#### 4.1.5 Ponorný způsob

Ponorný zvon na vnášení modifikátoru do lázně může být vyroben z ocelové trubky, opatřené žáruvzdorným povlakem, z grafitu, nebo přímo z keramického žáruvzdorného materiálu. Během zpracování taveniny se zvon naplněný potřebným množstvím modifikátoru spustí a ponoří do taveniny až ke dnu pánve (cca 40 až 50 mm ode dna) a minimálně 600 mm pod hladinu (dle velikosti pánve). Zvon je uchycen ve víku a celá tato soustava je ovládána zdvihacím zařízením, jeřábem, nebo pneumatickým válcem. Výtěžnost hořčíku při jeho hlubokém ponoření do taveniny je vysoká a může, v případě nízké koncentrace v předslitině 5-6%, dosáhnout i více než 50%. Předností této metody je, že nevyžaduje při jednotlivých cyklech úplné vyprázdňování pánve, jako je tomu u polévacích metod. Může se používat předslitina až 30%.





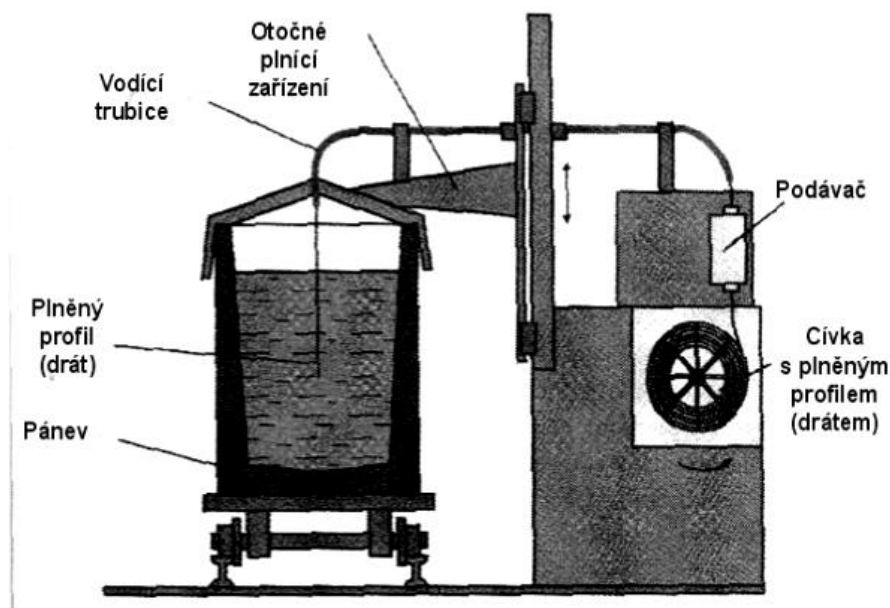
Obrázek 4-7 - Ponorný způsob výroby tvárné litiny [1]

#### 4.1.6 Metoda plněných profilů

Předchůdcem této metody je beze sporu, ve svém provedení velmi podobná metoda, zavádění očkovačů (modifikátorů), do litinové taveniny ve formě drátu nebo tyčinky. V tomto případě je použit drát nebo tyčinka-profil, který je tvořen ocelovým pláštěm - trubicí z uhlíkové oceli, který je vyplněn modifikátorem. Hořčíková slitina (= modifikátor) obsahuje 5 – 98% Mg a používá se v různých formách, např. granulí, prášku či plného celistvého drátu.

Výhodou této metody je možnost variantního řešení náplně, tedy modifikátoru (složení, podíl jednotlivých složek, především hořčíku, jejich konsistence atd.). Nevýhodou je především vyšší jednotková cena plněného profilu.

Na obrázku níže je znázorněno zařízení pro zavádění plněných profilů do taveniny. Cívka i podávač jsou umístěny ve společné skříni. Z cívky se odvíjí drát, který prochází podávčem do vodící trubice a následně do pánve s taveninou. Vodící trubicí lze vést více druhů plněných profilů – např. jeden drát se odvíjí z cívky, druhý z koše a v plnicím zařízení jsou společně vedeny do vodící trubice.



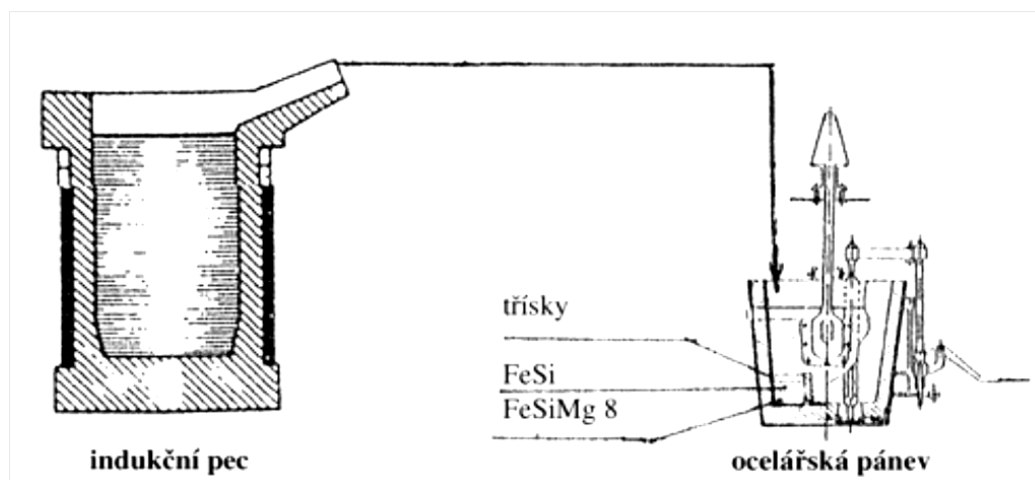
Obrázek 4-8 - Zařízení na zavádění plněných profilů do taveniny pro nižší výkony [1]

## 4.2 Způsoby modifikace

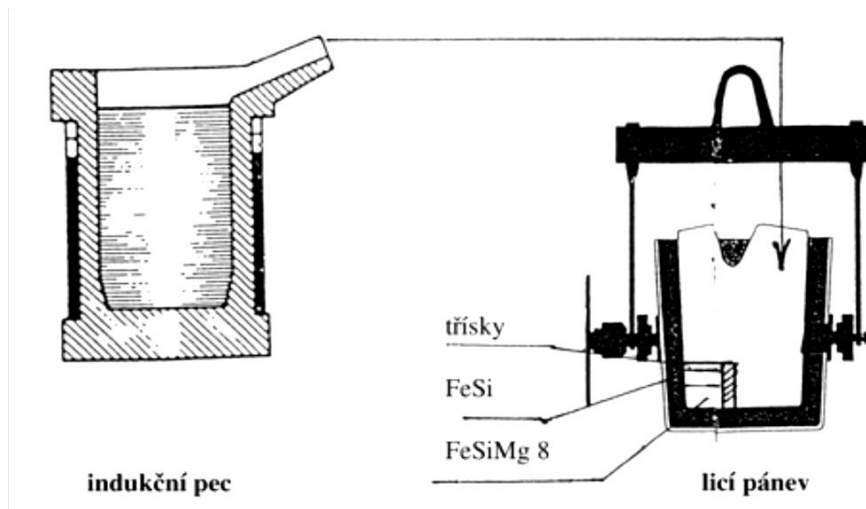
Modifikace je nedílnou součástí výroby tvárné litiny. Modifikačním prvkem se používá nejčastěji hořčík, který se přidává do taveniny a způsobí transformaci tvaru grafitu z lupínkového na kuličkový. Oproti tomu přidáním grafitizačního očkovačla se zvýší počet grafitizačních zárodků a docílí se pravidelné a jemné struktury grafitu.

Modifikaci rozlišujeme jedno či dvoustupňovou.

Při použití **jednostupňové metody** výroby probíhá modifikace a grafitizační očkování v jedné pánvi.

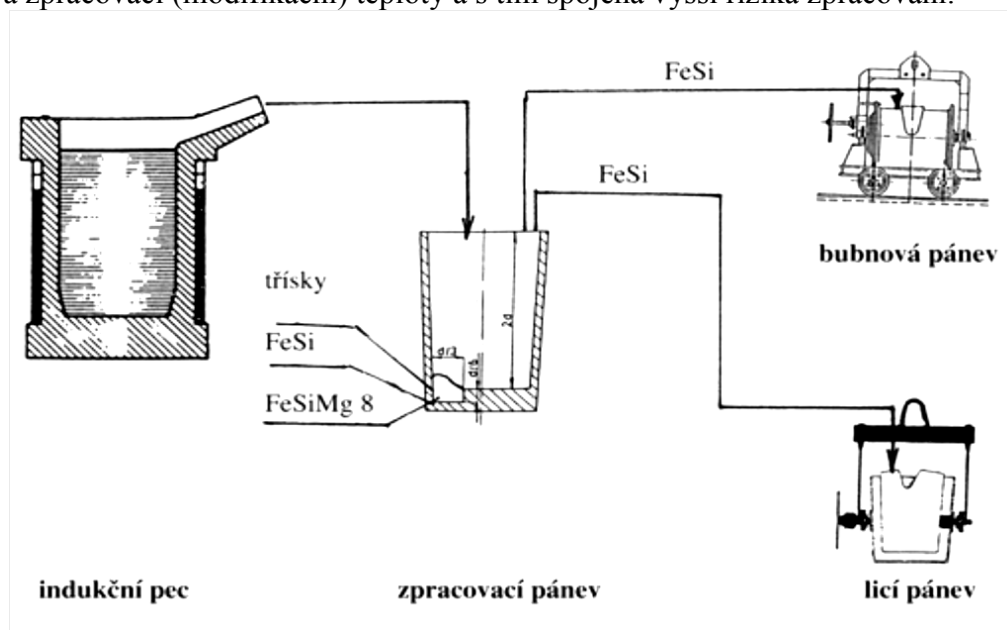


Obrázek 4-9 Jednostupňová výroba LKG, odlévání z pánvi se spodním výpustným otvorem [2]



Obrázek 4-10 Jednostupňová výroba LKG, odlévání z pánvi s horním odléváním [2]

Princip **dvoustupňové** výroby spočívá v modifikaci kovu nejprve v první pánvi, poté se kov přelije do druhé pánve, v níž probíhá grafitizační očkování. Nevýhodou je nutnost vyšší odpichové a zpracovací (modifikační) teploty a s tím spojená vyšší rizika zpracování.



Obrázek 4-11 Dvoustupňová výroba LKG, modifikace ve zpracovací pánvi, odlévání z pánvi s horním odléváním [2]

### 4.3 Prvky přítomné při zpracování

- primární prvky – C, Si, Mn, P a S;
- sferoidizační (primárně očukující-modifikační) prvky – Mg, prvky vzácných zemin, Ca, atd.;
- legující prvky – Cu, Ni a Mo;
- prvky zbytkové a pro určité účely, se speciálním záměrem – As, Bi, Pb, Sb atd.;
- perlitó - a karbidotvorné prvky – As, B, Cr, Sn a V;
- plyny – H, N a O;

Vliv nejčastěji se vyskytujících prvků na strukturu litiny a její mechanické vlastnosti je blíže popsán v kapitole 6.

### 4.4 Modifikátory

#### 4.4.1 Hořčík

Vyrábí-li se tvárná litina pomocí přísad na bázi hořčíku, přechází hořčík z očukující látky do litiny. Při modifikačním zpracování je hlavním úkolem dostat hořčík do roztoku, tzn. rozpustit ho v tavenině.

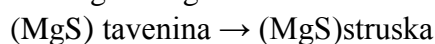
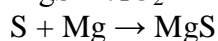
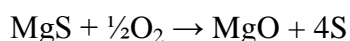
Hlavní příčinou je provozní obtížnost výroby, která je mj. způsobena:

1. nízkou teplotou bodu tavení a především bodu varu hořčíku
2. nízkou hustotou Mg a jeho vysokou aktivitou - afinitou ke kyslíku a k síře
3. značným poklesem teploty litiny po očkování Mg

Teplota tavení Mg je 651 °C, bod varu Mg je 1107 °C; proto se hořčík přidaný do taveniny za teplot modifikace prudce odpařuje, zplyňuje a tlak jeho nasycených par dosahuje 6 až 10 at (0,5 -1 MPa), způsobuje výbuchy a vystřikovávání taveniny. Hořčík vyplouvá na hladinu a stykem se vzduchem se pak spaluje a hoří prudkým, jasně bílým plamenem, za současného vývinu dýmu.

#### Reakce mezi taveninou a atmosférickým kyslíkem:

Po zpracování hořčíkem, přítomný MgS vyplouvá na povrch taveniny a reaguje se vzdušným kyslíkem podle rovnice:



Je také možné využít účinku jiných slitinových prvků s hořčíkem ke tlumení bouřlivého vypařování při modifikaci (např. použití vápníku). Samotný hořčík může způsobit problémy pocházející z tvorby karbidů a s ním spojené i snižování počtu grafitových zrn (karbidy působí jako překážky pro další růst zrn). Pro omezení karbidotvorného vlivu hořčíku, se přidávají

současně během procesu modifikace též některé další prvky, jako cer, případně další prvky vzácných zemin.

### Přísady hořčíkových slitin

Nejpoužívanější prvky pro modifikaci jsou ty, které podporují tvorbu kuličkového grafitu a pomáhají usměrnit reakci s hořčíkem a tím zvýšit i jeho využitelnost.

- **slitiny TĚŽKÉ** na bázi Cu-Ni-Mg, Cu-Mg, Ni-Mg
  - nikl je nahrazován mědí
  - použití mědi není vhodné pro výrobu feritických a měkkých tvárných litin, ale výhodně se využívá při výrobě perlitických druhů litin.

V tabulce je uvedeno složení předslitin, tvořící základ dalších typů a modifikací většiny dodavatelských firem:

Označení	Složení %				
	Mg	Si	C	Fe	Ni
Slitina 1	13-16	-	2,0	-	zbytek
Slitina 2	13-16	26-33	-	5 max	zbytek
Slitina 3	1,2-4,8	-	2,0 max	-	zbytek
Slitina 4	4,0-4,5	-	2,0 max	32-36	zbytek

Obrázek 4-12 Základní modifikátory na bázi nikl-hořčík [1]

Slitina 1 – využití hořčíku je 50–70 %

- je možné ji využít pro různé způsoby výroby (metoda Sandwich, ponorný způsob)

Slitina 2 – část niklu je nahrazena křemíkem

- využití hořčík je nižší

Slitiny 3, 4 – se vyznačují vyšší hustotou ve srovnání s taveninou, proto jsou ponořovány do litinové taveniny u těchto slitin (3,4) je vyšší využitelnost hořčíku oproti výše uvedeným (1,2)

- **LEHKÉ** na bázi Mg-Si

V dnešní době se jedná o nejčastěji používaný druh předslitiny, jejíž zastoupení tvoří přibližně 80 % celosvětové výroby tvárné litiny. Nejrozšířenější jsou slitiny hořčíku s ferosiliciem (MgFeSi) - pro automatizovaná udržovací a licí zařízení je nezbytné udržovat v modifikátorech FeSiMg co nejnižší obsah hliníku, jinak hrozí zvýšená tvorba hlinitanových strusek, které zanáší licí zařízení. Směrnými činiteli v modifikátorech MgFeSi je hořčík, vápník, hliník, křemík, cer a součet prvků vzácných zemin.

Obsah hořčíku je z uvedených prvků nejvýznamnější. Je prokázáno, že se snižujícím se obsahem Mg hořčíku v předslitině se zvyšuje jeho celková využitelnost. V současné době je pou-

žívána předslitina se 6% Mg, pro vyšší využití hořčíku. V případě Tundish metody v čajníkové pánvi se užívají modifikátory s 5% Mg (nebo i nižší).

Technologická omezení, ale i omezení platná pro prostředí, určují úroveň uvolněných zplodin vzniklých reakcemi a tím i obsah Mg v modifikační předslitině. Slévárny, které nemají k dispozici rychlou kontrolu obsahu Si v litině, používají modifikátory s vyšším obsahem Mg (např. 9% Mg).

#### 4.5 Cer a prvky vzácných zemin [1]

Názor na množství přidávaného ceru a prvků vzácných zemin je odlišný v závislosti na praktických zkušenostech sléváren. Slévárny vyrábějící **silnostěnné** odlitky používají modifikátory MgFeSi s minimálním obsahem ceru, nebo prvků vzácných zemin - hlavním důvodem je zajistit co nejnižší rozdíly ve velikosti, rozdělení a tvaru zrn grafitu v základní hmotě tvárné litiny. Slévárny vyrábějící **tenkostěnné** odlitky dávají přednost obsahu ceru a celkovému obsahu prvků vzácných zemin pohybující se kolem 0,5-1% v modifikátorech, neboť předpokládají, že vyšší obsah těchto prvků může způsobit větší výskyt karbidů ve struktuře odlitků. Cer může mít vlastní modifikační účinky, neutralizovat rušivé prvky, nebo vytvářet nukleační zárodky pro tvorbu zrnitého grafitu.

**Prvky vzácných zemin** je možné použít ve formě směsného kovu (tzv. Mischmetal), jako přísady prvků vzácných zemin s nízkým obsahem ceru nebo přísady s vysokým obsahem ceru. Prvky vzácných zemin umožňují snížení množství hořčíku při modifikaci, mají rovněž schopnost neutralizovat vliv rušivých prvků (např. olovo, bizmut, titan, antimon, arsen), které podporují vznik červíkovitého, nebo lupínkového grafitu.

Morrogh a později též Miskelson a Merrill prokázali, že litinu se zrnitým grafitem je možno vyrobit použitím prvků vzácných zemin s **vysokým obsahem ceru**. Ukázalo se však, že reprodukční doba (modifikace-odlití) je velmi krátká nebo že se zrna grafitu rozpadnou na karbidy. Cer je možno použít jako modifikátor pro tenkostěnné odlitky.

*Pro získání struktury s vysokým počtem grafitových zrn je výhodnější použití nižšího obsahu ceru ve směsi s ostatními prvky vzácných zemin (Skupina I.), jako vyšší koncentrace ceru (Skupina II.)*

Prvky (PVZ)	Přibližné složení %		
	„Mischmetal“	Skupina I. (PVZ) Prvky vzácných zemin s nízkým obsahem ceru	Skupina II.(PVZ) prvky vzácných zemin s vysokým obsahem ceru
Cer	50	50	90
Lanthan	25	33	5
Neodym	16	12	2
Praseodym	6	4	1
Samarium	2	-	-
Yttrium a ostatní vzácné zeminy	1	1	2

Obrázek 4-13 Chemické složení skupin přísad prvků vzácných zemin [1]

Všeobecně je prokázáno, že pro tenkostěnné průřezy nemá celkový obsah I. i II. skupiny prvků vzácných zemin překročit 0,017%. Příliš vysoký obsah ( $> 0,025\%$ ) vede ke karbidické struktuře.

#### **4.6 Vápník**

Hlavní funkcí vápníku je zvyšování počtu grafitotvorných zárodků a zpomalení účinku hořčíku. V současné době se používá v rozmezí 0,3 až 2%. Přítomnost vápníku v tvárné litině zvyšuje její životnost, ovšem nevýhodou v některých případech je zvýšená tvorba strusky, která zanáší hubice pánví - k tomuto jevu dochází při udržování pánví a pozdějším odlévání.

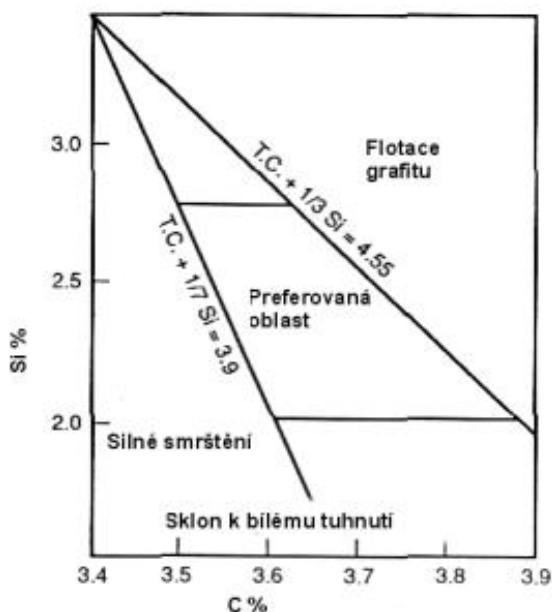
Přidáním vápníku do tvárné litiny dochází rovněž k redukci karbidů, ke snížení těkavosti hořčíkových par, zvýšení výtěžnosti hořčíku, v důsledku potlačení a utlumení reakce hořčíku a zpomalení doznívajícího účinku hořčíku.

Při použití většího množství vápníku jako modifikátoru je možné odlévat karbidů prostou strukturu i u tenkých průřezů stěn. Pro snížení vzniku nadměrného množství strusky, které znesnadňuje odlévání, je nutno použít nízkých množství vápníku a hliníku.

## 5 Normované vlastnosti

### 5.1 Volba chemického složení - Hendersonův diagram

Z hlediska jakosti odlitku je zásadní volba obsahu uhlíku a křemíku. Dle známého množství uhlíku v litině si z grafu dohledáme potřebný obsah křemíku, který nám zaručí požadované vlastnosti. Pohybujeme se v preferované oblasti.



Obrázek 5-1 Hranice optimálního složení uhlíku [1]

### 5.2 Volba chemického složení dle jakosti

Rozhodujícím je tloušťka stěny odlitku, tomu odpovídající strukturní stav a v důsledku mechanické vlastnosti odlitku.

Jakost	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	HB	E [MPa]	KC [J/cm <sup>2</sup> ]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Struktura
ČSN 422304	400	250	15	135-185	100000-185000	10-19	7,1-7,3	F
ČSN 422305	500	320	7	170-220				F+P
ČSN 422306	600	380	3	200-250		3,5-10		P+F
ČSN 422307	700	440	2	235-285				P
ČSN 422308	800	500	2	270-325				P

Tabulka 5-1 Volba chemického složení dle jakosti



## 6 Vliv prvků na strukturu a vlastnosti tvárné litiny

### 6.1 Volba uhlíku a křemíku

#### 6.1.1 Stupeň eutektičnosti (uhlíkový ekvivalent)

Rozhodující roli hraje tuhnutí eutektika, na něž má zásadní vliv chemické složení taveniny. Přítomné prvky buďto snižují, nebo naopak zvyšují obsah uhlíku v eutektiku, primárně pak působí svým vlivem na rozpustnost uhlíku v tekuté litině. Nad ostatními prvky převládá vliv křemíku. Křemík snižuje rozpustnost uhlíku v tavenině a snižuje tak jeho obsah v eutektiku. Vliv křemíku je dobře prozkoumán a často popisován jako substituční prvek uhlíku ve vztahu, tzv. „ekvivalentu uhlíku“ (CE).

Jeho zjednodušený, nejběžněji používaný tvar je dán rovnicí:

$$\text{Ekvivalent uhlíku (CE)} = \%C + 1/3 (\%Si + \%P)$$

CE = 4,23 => litina eutektická

CE < 4,23 => litina podeutektická

CE > 4,23 => litina nadeutektická

U běžně vyráběných odlitků z tvárné litiny se *obsah uhlíku* pohybuje v rozmezí 3,0% až 4,0%, zatímco u tenkostěnných odlitků pro směrnou tloušťku stěny cca 3,5 mm je optimální udržovat *obsah Si* v rozmezí 3,5 až přes 4,0%, a pro tlustostěnné odlitky (nad 40 mm a více) pod hranici 3,5% Si. Kombinace složení s vysokým obsahem uhlíku (přesněji uhlíkového ekvivalentu) a pomalé rychlosti tuhnutí a ochlazování vede k flotaci a degeneraci grafitu.

**Pro tenkostěnné odlitky** (pod cca 12 mm) se doporučuje CE = 4,55%,

**Pro střední tloušťku stěn** (12 až 40 mm) se doporučuje CE = 4,35 až 4,45%

**Pro tlustostěnné odlitky** (nad 40 mm) se doporučuje CE = max. 4,3%.

Obecně se v tvárných litinách udržuje *obsah křemíku* v rozmezí 1,80% až 2,80%, ačkoliv je možný i značně větší rozptyl (například u žáruvzdorné litiny se obsah zvyšuje až na 6,0 %Si). Vzhledem k tomu, že je Si silný grafitizátor, jeho nižší obsah v litině podporuje vznik karbidů, což se může projevit zákalkami v rozích a na hranách odlitku, ale i přímo ve struktuře jako mezibuněčné a osově karbidy (spíše u tlustostěnných odlitků).

**Křemík** zvyšuje počet grafitových zrn, snižuje velikost buněk a potlačuje vznik karbidů.

Ovlivňuje strukturu základní kovové hmoty. Zvyšující se počet zrn grafitu je ve většině případech doprovázen vyšším obsahem uhlíku a křemíku. Na tvar grafitu nemá křemík, až do obsahu cca 4,00 %, prakticky žádný vliv, zvětšuje však po určitou hranici pevnost a tvrdost feritu a potlačuje vznik perlitu.

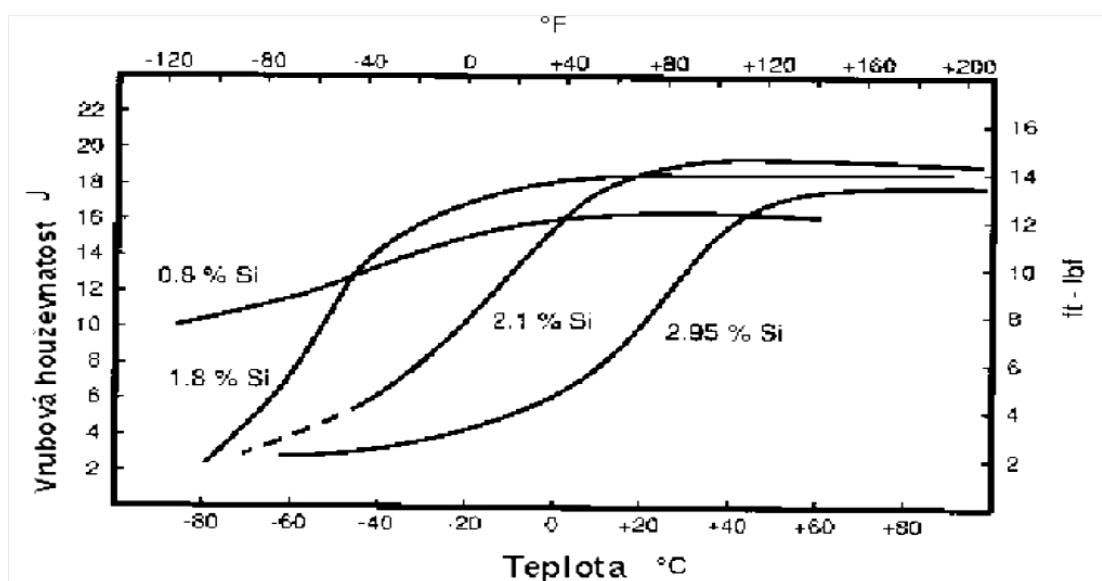
Se stoupajícím **obsahem uhlíku** v rozmezí 2,5 až 3,8 % C, roste po odlití poněkud pevnost a tažnost a klesá tvrdost; po vyžihání jsou mechanické vlastnosti přibližně stejné

**Vliv uhlíku a křemíku na mechanické vlastnosti** tvárné litiny musí být uvažován v souvislostech následujících proměnných:

- vliv těchto prvků na počet zrn v tvárné litině
- vliv těchto prvků na možnost stability perlitu, zajišťující vzrůst tvrdosti tvárné litiny (tvorbu feritu a nebo perlitu v litém stavu, podmínky k žihání a normalizaci);
- vliv těchto prvků na vlastnost feritu přítomného ve struktuře;
- vliv těchto prvků na kalení tvárné litiny (tvorbu martenzitu, nebo bainitu během kalení a tepelného zpracování).

### 6.1.2 Vliv obsahu křemíku na rázovou houževnatost

Z grafu níže je zřejmé, že s rostoucím obsahem křemíku stoupá přechodová teplota. Křivky se posouvají směrem doprava ke kladným hodnotám teplot. K dosažení maximálních hodnot houževnatosti při nízkých teplotách je nutné udržovat obsah Si co nejnižší.



Obrázek 6-1 Vliv obsahu křemíku na rázovou houževnatost [1]

## 6.2 Hořčík

Pevnost litiny v litém stavu je pro určitou tloušťku stěny (při různém obsahu hořčíku) přibližně stejná; po vyžihání však, se vzrůstem obsahu hořčíku pevnost tvárné litiny roste.

V silnějších průřezích je pevnost tvárné litiny menší. Tažnost po odlití je pro různý obsah hořčíku i tloušťku stěn konstantní. Po vyžihání se tažnost s rostoucím obsahem hořčíku a zvětšující se tloušťkou stěny zmenšuje. Pro průměrné tloušťky stěn odlitků je optimální obsah hořčíku v tvárné litině 0,06%.

V současné době je na základě i dalších zjištění všeobecně přijat názor, že k dokonalé sferoidizaci grafitu, tj. k získání 100% tvárné litiny je potřeba, aby zbytkový obsah hořčíku činil minimálně 0,03%. Prakticky se doporučuje udržovat **zbytkový obsah Mg 0,04 až 0,06 %**.

### 6.3 Nikl

Nikl se do tvárné litiny přidává v množství 0,5-36%, a to z důvodu zajištění tvrdosti, zabránění perlitické transformace (v rozmezí 0,5-4% Ni); z důvodu stabilizace austenitu – nikl podporuje stabilizaci austenitické matrice (v rozmezí 18-36% Ni). Nikl se rovněž využívá pro nízkoteplotní aplikace – k vývoji feritické tvárné litiny s vyhovující pevností a nízkým obsahem křemíku (v rozmezí 1-2% Ni);

Nikl se přidává do litiny ve formě kovových pelet (>90% Ni) nebo ve formě předslitin Mg-Ni, nebo Mg-Ni-Si. V důsledku vysoké rozpustnosti Mg v niklu, rozpouští se Mg-Ni předslitiny v litině klidně, bez turbulence a s minimálními bouřlivými a světelnými efekty.

V litině se nikl rozpouští v jakémkoliv poměru. Je grafitizačním prvkem; redukuje rozpustnost uhlíku v tavenině a snižuje množství eutektického uhlíku o 0,06% na 1% Ni. Nikl zvyšuje stabilní eutektickou teplotu austenit-grafit a snižuje metastabilní eutektickou teplotu austenit-karbid železa a tak redukuje sklon k zákalkám a vylučování karbidů.

Nikl je účinným prostředkem k brzdění perlitické transformace a je používán při výrobě litiny s acikulární (jehlicovou) strukturou v litém stavu a k získání martenzitické struktury tepelným zpracováním. Působnost niklu na kalitelnost litiny je významně podpořena přísadou molybdenu a pro výrobu litin s jehlicovou (acikulární) strukturou po odlití se užívá legur s kombinovaným obsahem niklu a molybdenu.

### 6.4 Měď

Měď je grafitizačním prvkem a podporuje vznik perlitu. Nejčastěji se používá k zajištění vývoje perlitické struktury. Při nižším obsahu v litině působí obdobně jako Ni. Její grafitizační schopnost je 10x menší, než je grafitizační schopnost křemíku. V důsledku svého silného působení na stabilizaci perlitu je její obsah ve feritických litinách omezen do 0,03%.

Měď samostatně zlepšuje kalitelnost tvárné litiny; v kombinaci s molybdenem je podstatně účinnější. V litině má omezenou rozpustnost a rozpouští se v ní do obsahu kolem 2,5%. Její rozpustnost se zvyšuje přísadou niklu. Přísada 1% Ni zvyšuje rozpustnost Cu o cca 0,4%. Rozpustnost ve feritické fázi je podstatně menší. Precipitační vytvrzování je možné v litinách obsahujících nad 1% Cu.

Potřebné množství mědi k zajištění perlitické struktury závisí nejen na jejím množství, ale též na síle stěny odlitku. Měď snižuje ve struktuře litiny objem feritu a podporuje vylučování perlitu; má dvojnásobný účinek na stabilizaci perlitu jako mangan. Měď zpomaluje rozpad perlitu, zvláště při nižším obsahu křemíku. Měď snižuje rázovou houževnatost a zvyšuje přechodovou teplotu. Litiny s obsahem 1,25 až 1,75 % Cu mohou být precipitačně vytvrzovány

při ohřevu 480 až 560 °C. Litiny s obsahem 1,25 až 1,75 % Cu mohou být precipitačně vytvrzovány při ohřevu 480 až 560 °C.

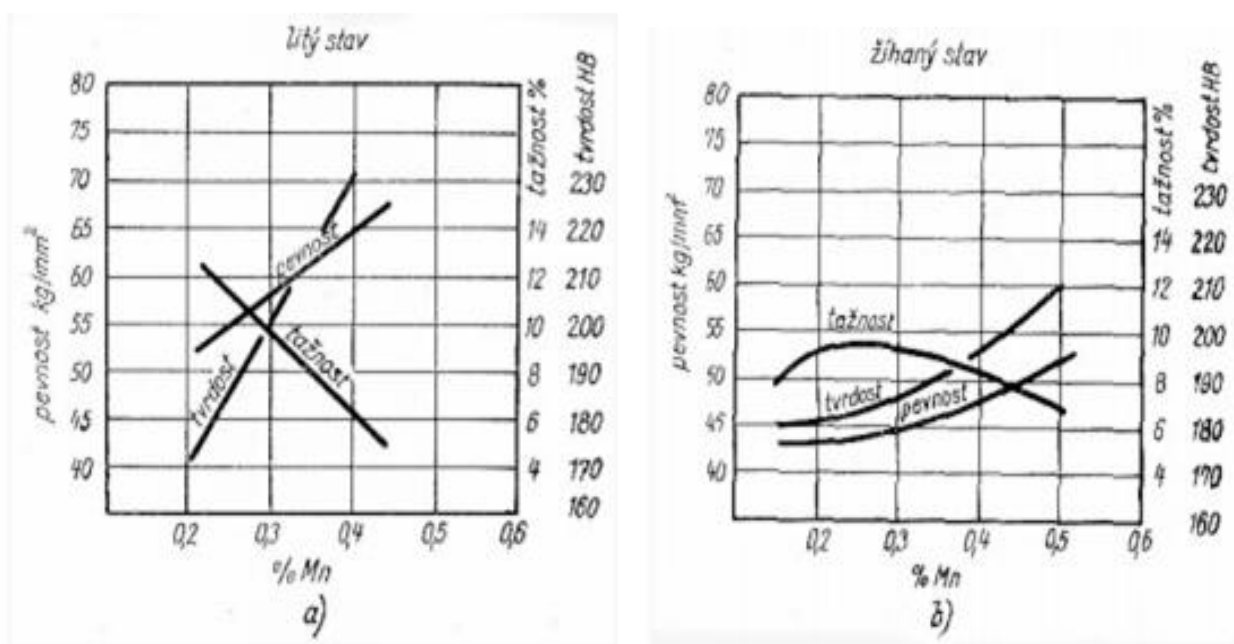
## 6.5 Hliník

Hliník je taktéž přítomen ve všech tvárných litinách. Jeho původ je ve vsázkových materiálech a ve feroslitinách používaných při zpracování a očkování tvárné litiny. V FeSi a MgFeSi slitinách bývá přítomno 0,6 až 1,5 % hliníku; ve většině ocelí je hliník přítomen v množství 0,02 – 0,05%. V tvárných litinách se všeobecně pohybuje obsah Al do cca 0,05%, ale podobně jako u titanu je jeho obsah citlivější u silnostěnných odlitků. Vliv Al na tvar grafitu je podstatně menší oproti titanu a podporuje také vznik červíkovitého grafitu. Hliník může být neutralizován přísadou ceru. Množství 0,01% ceru neutralizuje účinek 0,50% hliníku. Dalším důvodem omezování množství hliníku v litině je jeho negativní vliv na tvorbu bodlin v odlitcích.

## 6.6 Mangan

Účinnost manganu v tvárné litině je vyšší než v litině šedé. Tvárná litina obsahuje nepatrné množství síry, mangan nevytvoří MnS a účinnost je proto vyšší. V běžné šedé litině se využijí 2/3 manganu na vazbu síry a zbylé množství působí jako legující přísada.

Uspadňuje rozpustnost uhlíku v litině, rozšiřuje oblast fáze  $\gamma$ , brání rozpadu austenitu, zabraňuje grafitizaci, stabilizuje a zjemňuje perlit a zvyšuje tvrdost a pevnost feritu. Působí tedy opačným způsobem než křemík.



Obrázek 6-2 Vliv manganu na vlastnosti tvárné stav litiny

a) litý, b) žíhaný stav [1]

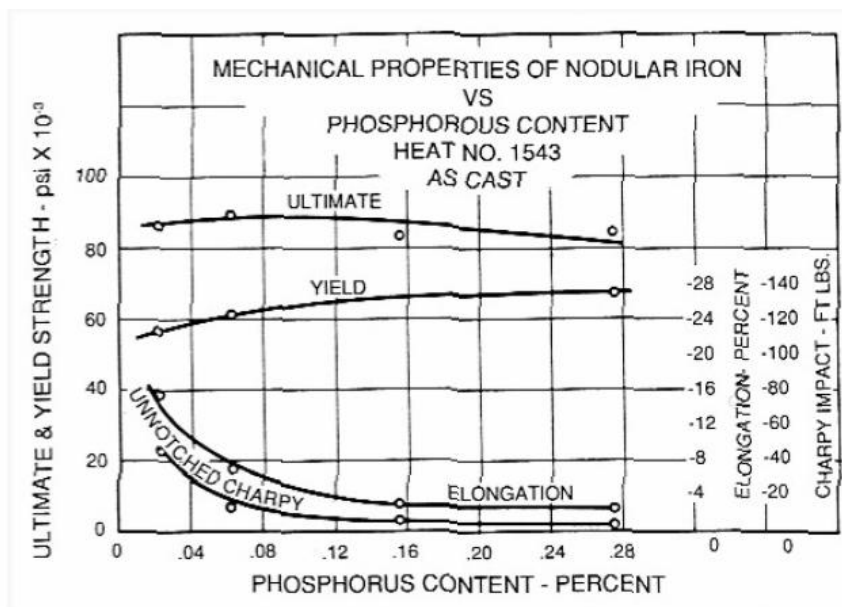
Z diagramu je patrné, že v obou případech: s přidavkem manganu se zvyšuje pevnost i tvrdost a zároveň klesá tažnost. V případě litého stavu je závislost lineární, tedy i velikost změn je znatelnější než v případě stavu žíhaného.

Mangan se využívá rovněž pro zvýšení tvrdosti perlitu po normalizaci a martenzitu při kalení a popouštění tvárné litiny.

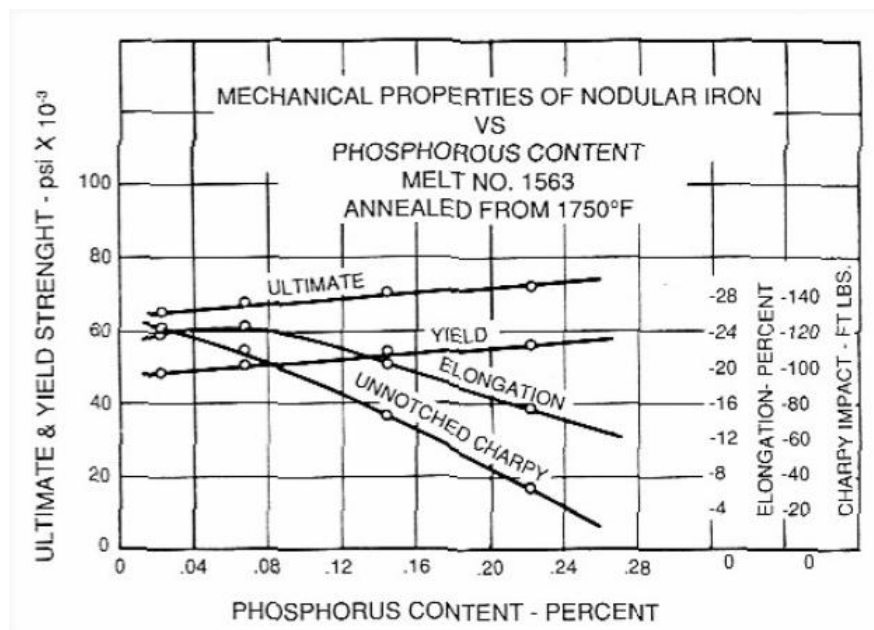
## 6.7 Fosfor

Fosfor segreguje do eutektických buněk, které obklopují každé zrno grafitu. Segregovaný fosfor vytváří křehké fosfidické síťoví, které se v důsledku své nižší teploty tuhnutí vylučuje na hranicích eutektických zrn a působí nepříznivě na tvárnost litiny.

Fosfor zvyšuje tvrdost, stabilizuje a zjemňuje perlit. Při vyšším obsahu (0,08 % P) zvyšuje tranzitní teplotu. Nemá vliv na tvar grafitu. Nad 0,15 % fosforu se vlastnosti litiny značně zhoršují.



Obrázek 6-3 Mechanické vlastnosti v závislosti na obsahu fosforu - litina ve stavu po odlití [1]



Obrázek 6-4 Mechanické vlastnosti v závislosti na obsahu fosforu – žíhaná litina [1]

## 6.8 Vliv stabilizačních prvků [1]

Tyto prvky jsou užívány (záměrně i nezáměrně), aby při tuhnutí tvárné litiny podporovaly tvorbu karbidů, při přechodu v kritických teplotních oblastech podporovaly vznik perlitické struktury. Tyto prvky se mohou podílet na tvorbě karbidů či perlitu buďto přímo (např. vanad, chrom, niob, apod.) nebo nepřímo (cín, měď, apod.)

### 6.8.1 Chrom

Chrom obecně podporuje vznik karbidů i perlitické struktury v tvárné litině. Chrom přechází do litiny přímo ze vsázky, kdy je v určitých vsázkových materiálech v přebytku, nebo záměrně ve formě předslitiny jako ferrochrom, nebo jako ocelový odpad z legovaných ocelí.

Tolerance pro obsah chromu závisí na typu tvárné litiny a požadované struktuře matrice v konečném stavu použití.

U **feritické tvárné litiny** ve stavu po odlití musí být obsah chromu co nejnižší. Pokud možno do 0,04%, což však závisí na počtu grafitových zrn (vyšší obsah chromu a vyšší počet zrn) a průřezu stěn odlitku (při delší době tuhnutí je nižší obsah chromu).

U zcela **perlitické struktury** možno udržovat obsah chromu až do 0,10%. Tato hodnota opět závisí na počtu grafitových zrn ve struktuře a době tuhnutí, neboť chrom segreguje během tuhnutí do intercelulárních oblastí, kde může zapříčinit vznik karbidického síťoví.

### 6.8.2 Vanad

Vanad působí v tvárné litině obdobně jako chrom. Může být použit do obsahu 0,02%, s niklem a molybdenem, za účelem zvýšení pevnostních hodnot a tvrdosti v průřezích stěn odlitků nad cca 70 mm. Vanad je citlivý na tloušťku stěny odlitku a při obsahu nad 0,20%V vytváří masivní karbidy.

### 6.8.3 Cín

Jako velký stabilizátor perlitu se přidává do litiny k získání čistě perlitické struktury bez feritických dvorců kolem grafitových zrn. Jeho schopnost potlačovat vznik feritu je velká, proto se v litině vyskytuje jen ve stopovém množství. Do obsahu 0,15% nepodporuje vznik karbidů. Cín působí tím způsobem, že se akumuluje přednostně na povrchu grafitových zrn a brání difuzi uhlíku do okolí a potlačuje tím tvorbu feritu. Cín je cca 10x účinnější stabilizátor perlitu než měď a 6x účinnější než chrom.

Limity pro množství přísady cínu závisí na požadované struktuře: [1]

- Feritická tvárná litina. Obsah cínu do 0,01%, v závislosti na počtu grafitových zrn.
- Perlitická tvárná litina. Pro zajištění zcela perlitické struktury v tvárné litině je potřeba přísada 0,03 až 0,08% cínu. Množství Sn při tom závisí, právě tak jako u Cu, na síle stěny odlitku. Úroveň obsahu cínu je funkcí ostatních prvků v litině; přebytek cínu pak vede k jeho segregaci do intercelulárních oblastí, kde se tvoří jemný, těžko pozorovatelný film karbidů, které mají nepříznivý vliv na vlastnosti tvárné litiny. Je nutno pečlivě sledovat zbytkový obsah cínu, abychom se vyhnuli tomuto efektu.

## 6.9 Vliv plynů [1]

### 6.9.1 Kyslík

Vzhledem k tomu, že je hořčík velmi účinným desoxydantem, je obsah kyslíku během zpracování v konečné tvárné litině redukován na velmi nízkou úroveň. Obsah kyslíku základní litiny závisí na tavicím procesu. Po zpracování hořčíkem klesá obsah kyslíku v prvním případě na cca 33ppm ve druhém případě na 15ppm. Při tavně v indukčních pecích může jeho obsah být v závislosti na tavicí praxi ve větším rozmezí, menší ale i větší obsah. Vsázky s vysokým podílem ocelového odpadu (zvláště u tenkostěnných odpadů: plechové, nepaketované odstřížky, třísky apod.) Vysoké tavicí teploty vedou k vysokému obsahu kyslíku v základní natavené litině. Je tedy nutno korigovat i potřebné množství hořčíku.

### 6.9.2 Vodík

**Vodík** podporuje, v důsledku vlivu na přechlazení (podchlazení) litinové taveniny, vznik karbidů. Pro zajištění požadované, reprodukovatelné struktury, je nutno jeho obsah v litině udržovat na velmi nízké úrovni. Při „kritickém“ obsahu vodíku, v důsledku jeho segregace do

posledně tuhoucích oblastí (tepelných uzlů) mohou vznikat soustředěné karbidy, nebo inverzní zákalky. Při vysokém obsahu vodíku je nebezpečí vzniku bodlin doprovázených karbidy.

### 6.9.3 Dusík

**Dusík** je v litinové tavenině rozpustný a v metalurgii se používá v molekulární formě, na příklad při injekci různých přísad do taveniny jako nosný plyn, nebo u technik k odplynění taveniny bez nebezpečí destrukčních účinků na strukturální složky litiny. Při injekčních technikách prostřednictvím zaváděných trysek, nebo prostřednictvím pórovitých zátek apod., se používá suchý dusíkový plyn. Limitní množství rozpuštěného dusíku by se mělo pohybovat kolem 0,008 až 0,009%. Pod touto hodnotou nebyl pozorován žádný účinek dusíku na strukturu.



## 7 Tepelné zpracování tvárné litiny

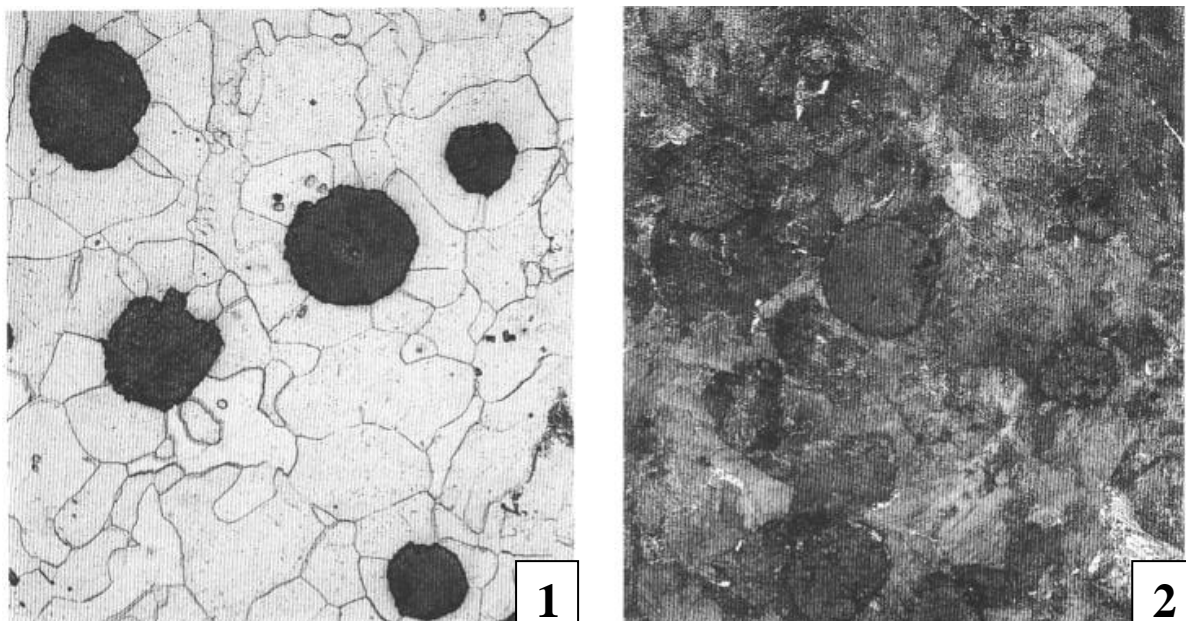
Tepelným zpracováním je možné měnit mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti i strukturu matrice tvárné litiny. Tvar vyloučeného grafitu nemá na změnu vlastností tak výrazný vliv jako struktura základní kovové hmoty. Při výrobě lze ve většině případů uplatnit podobné způsoby tepelného zpracování jako u ocelí. Správnou metodou tepelného zpracování lze zvýšit tažnost tvárné litiny až nad 40 %, pevnost až nad 1500 MPa a tvrdosti až na 60 HRC.

Přidáním křemíku se lineárně zvyšuje horní kritická teplota – tj. teplota, při které se z austenitu začínají vylučovat zrna feritu a grafitu.

Pro dosažení nejlepších výsledků při tepelném zpracování je nutná znalost chemického složení daného materiálu a jeho kritické teploty, které popisují dilatometrické křivky.

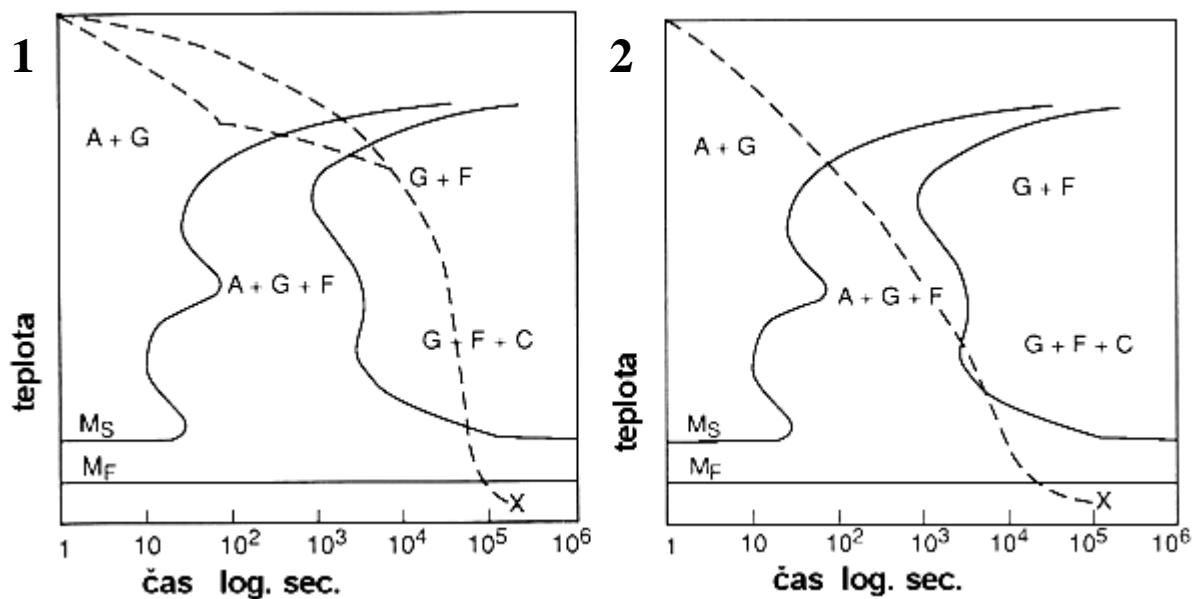
### 7.1 ARA diagramy

ARA diagramy tvárné litiny feritické a perlitické, znázorňují vliv průběhu ochlazování na výslednou strukturu. Snímky nad diagramy představují výslednou strukturu získanou při daném průběhu ochlazování.



Obrázek 7-1 Struktura získaná po ochlazování

1- feritická, 2- perlitická tvárná litina [1]



Obrázek 7-2 ARA diagramy tvárné litiny, 1- feritická, 2 perlitická tvárná litina [1]

## 7.2 Způsoby tepelného zpracování

1. Žíhání za účelem snížení vnitřních pnutí
2. Grafitizace vázaného uhlíku (rozpad karbidické struktury)
3. Feritizace perlitu
4. Homogenizace
5. Normalizace
6. Kalení – 6.1. zušlechtování – kalení a popouštění  
6.2. izotermické kalení – izotermicky kalená tvárná litina ADI
7. Povrchové kalení - 7.1 indukční kalení, 7.2 kalení plamenem

### 7.2.1 Žíhání za účelem snížení vnitřních pnutí

Po odlití odlitků z tvárné litiny vznikají vlivem smrštění vnitřní pnutí, důsledkem může být vznik trhlin, které snižují kvalitu výrobku. Pnutí nastávají rovněž při vzniku karbidů ve struktuře, po obrábění, svařování, tváření za studena, tepelném zpracování.

Ke snížení vnitřních pnutí se nechávají odlitky tzv. uměle „stárnout“, tj. žíhají se pod spodní kritickou teplotou.

Dle Otáhalá [1] jsou doporučeny následující žíhací cykly:

- **Odlitky z nelegované tvárné litiny, jednoduchého tvaru**  
Žíhací teplota 565 až 590 °C po dobu 1 hodiny na sílu stěny 25 mm plus 1 hodina; ochlazování pozvolné, rychlostí 25 až 75 °C až na teplotu cca 250 až 300 °C. Další ochlazování může proběhnout na vzduchu.

- **Odlitky legované, složité**  
Žíhací teplota 620 až 680 °C po dobu 1 hod. na sílu stěny 25 mm plus 1 hodina; ochlazování pozvolné, rychlostí 25 až 75 °C až na teplotu cca 250 až 300 °C. Další ochlazování může proběhnout na vzduchu.
- **Odlitky z Ni-resist**  
Žíhací teplota 620 až 680 °C po dobu 1 hod. na sílu stěny 25 mm plus 1 hodina; Žíhání je uplatňováno až po ohrubování součásti.

U nelegovaných litin je doporučována výdrž pod teplotou 600 °C, neboť při vyšší teplotě dochází ke znatelnému poklesu tvrdosti.

Tento způsob je vhodný pro perlitické a feriticko-perlitické struktury odlitků.

### 7.2.2 Grafitizace vázaného uhlíku – rozpad karbidické struktury

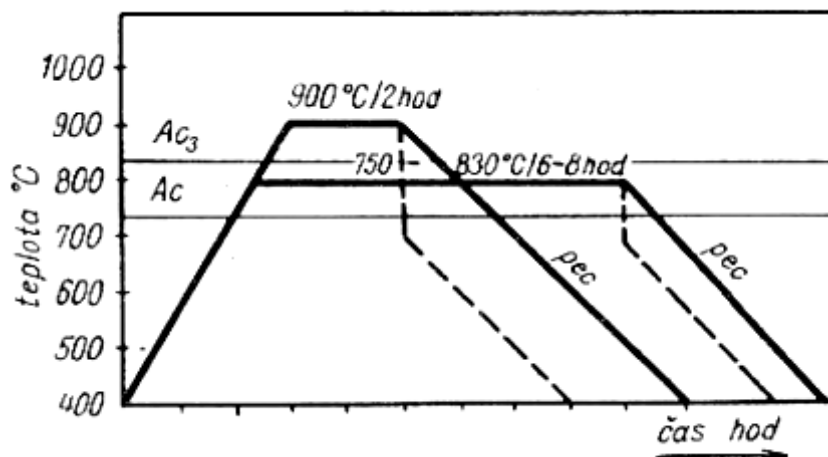
Ke vzniku karbidické struktury dochází při překročení doporučeného množství hořčíku nebo při nedokonalém sekundárním grafitizačním očkování. Karbidy svou tvrdostí snižují životnost nástrojů, dochází i ke zhoršení mechanických vlastností litiny.

Rovnovážné struktury bez karbidů nejrychleji dosáhneme ohřevem litiny nad horní kritickou teplotu tzn. na 890-900 °C. Při této teplotě dochází k rozpadu cementitu na grafit a ferit, příp. perlit. Grafit vzniklý rozpadem se vždy vylučuje do tvaru zrn. **Rychlost rozpadu cementitu** je ovlivněna tloušťkou stěny, chemickým složením tvárné litiny, závisí rovněž na teplotě a době trvání ohřevu. S vyšší teplotou i dobou ohřevu roste rychlost rozpadu cementitu. Stabilizační prvky (Mn, Cr, V) grafitizaci zpomalují, grafitizační (např. Si) ji urychlují. Zvýšením obsahu křemíku v tvárné litině přibližně o 1% se doba potřebná k rozpadu cementitu zkrátí téměř o polovinu.

Pokusy bylo zjištěno, že pro normální litinu, která obsahuje 3,3 až 3,6 %C, 0,2 až 0,4 %Mn a 2,25 až 3,0 %Si postačí k úplnému rozkladu cementitu dvouhodinový ohřev na teplotě 850 °C. Vypočtená doba je velmi přibližná. [1]

Pro získání velmi jemné feritické struktury je doporučeno udržovat teplotu na 800 °C. Jemná feritická struktura se vyznačuje svou vyšší vrubovou houževnatostí i za nižších teplot. Rozpad primárních karbidů probíhá pozvolně (10-20 hodin), proces je možné urychlit dvou-  
stupňovým zpracováním. Tento postup spočívá v rozpadu karbidů při ohřevu na teplotách nad 900 °C, ochlazení na normální teploty a druhém ohřevu na 800 °C ke zjemnění zrna. Tímto zpracováním dochází ke snížení přechodové teploty o 17-22 °C.

Struktury, u nichž je vyžadována houževnatá feritická struktura nesmí obsahovat chrom, maximálně do 0,05%. Dalšími karbidotvornými prvky, nežádoucími v houževnatých tvárných litinách jsou molybden, měď (více než 1%), mangan, bor, vanad, zinek, wolfram a cín.



Obrázek 7-3 - Průběh tepelného zpracování tvárné litiny pro grafitizaci vázaného uhlíku (rozpad cementitu) [1]

———— výsledná struktura feritická  
- - - - - výsledná struktura perliticko-feritická

### 7.2.3 Feritizace perlitu

Struktura litiny, jež je tvořena feritem a zrnitým grafitem se vyznačuje vysokou houževnatostí.

Rozkladu perlitu lze docílit dvěma způsoby:

- prodlouženým ohřevem pod spodní kritickou teplotou (subkritická feritizace)
- ohřevem nad spodní nebo krátkodobě nad horní kritickou teplotou s následujícím pozvolným ochlazováním

**Ohřev pod spodní kritickou teplotou** se používá u silnostěnných odlitků, u kterých nedochází k tvorbě cementitu ve struktuře. Spodní kritická teplota tvárné litiny se pohybuje v rozmezí cca 730 až 780 °C. Teplota ohřevu, potřebná k rozkladu perlitu bude ležet v oblasti teplot cca 650 až 760 °C. Čím je vyšší teplota ohřevu, tím rychleji bude probíhat rozpad perlitu.

Za teplot 700 až 740 °C se pro grafitizaci prvních 20% perlitu spotřebuje asi 20% celkové žíhací doby, na rozklad dalších 60% perlitu také 20% celkové žíhací doby a na rozklad posledních 20% perlitu se spotřebuje 60% z celkové žíhací doby.

Na rychlost rozpadu perlitu má vliv přítomnost manganu, chromu a dalších stabilizačních prvků, rovněž i jemnost perlitu.

Doba výdrže ohřevu je závislá na velikosti odlitku, struktuře a výši teploty ohřevu. Ochlazování probíhá na vzduchu a rychlost ovlivňuje rázovou houževnatost a vnitřní pnutí.

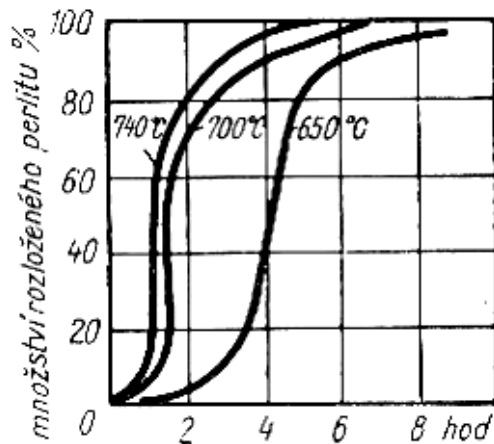
### **Ohřev nad spodní kritickou teplotou s pozvolným ochlazováním.**

V případě, že struktura obsahuje cementit, je nutné zvýšit žíhací teplotu nad horní kritickou teplotu (nad  $A_{c3}$ ). Jakmile nastane rozpad karbidů, doporučuje se snížit zvolna žíhací teplotu opět do kritické oblasti, aby se zmenšilo nebezpečí oxidace a deformace odlitku.

Obecně se doporučuje odlitky z tvárných litin, o velmi širokém rozsahu chemického složení:

3,2 až 3,8% C, 1,0 až 3,9%Si, 0 až 0,50%Mn, 0 až 3,0%Ni, 0,025 až 0,08%Mg, k zajištění rozpadu až 90% perlitu, zpracovat ohřevem na teplotě 690 °C, po dobu minimálně pěti hodin.

Odlitky žíhané na úplný rozpad perlitu mající feritickou strukturu, jsou tvárné, velmi tažné, mají vysokou vrubovou houževnatost, ale jsou velmi měkké a mají malou odolnost vůči opotřebení. Perlit ve struktuře zajistí vyšší odolnost vůči opotřebení. Jelikož rozpad perlitu neprobíhá u všech odlitků stejně a závisí na průřezu stěn a chemickém složení, musí být jednotlivě kontrolován.



Obrázek 7-4 - Vliv teploty a doby žíhání na rozpad perlitu v tvárné litině (3,2% C; 2,9% Si; 0,47% Mn) [1]

**V praxi** se při žíhání postupuje tak, že zároveň s odlitky se do žíhací komory vkládá série vzorků, jejichž tloušťka se rovná průměrné tloušťce stěn odlitků. Po určité době žíhání se vzorky z pece vyjmou a měří se jejich tvrdost. Jakmile odpovídá požadované struktuře, žíhání se přerušuje a odlitky se nechají v peci zvolna chladnout.

Jsou v podstatě dva možné způsoby tohoto zpracování: [1]

- V prvním případě se odlitky i se vzorky žíhají při teplotě 680 °C. Po dvou hodinách se vyjme vzorek a změří se jeho tvrdost. Je-li vyšší než odpovídá pěti procentnímu prodloužení, pokračuje se v žíhání další hodinu, načež se opět měří tvrdost. Žihá se tak dlouho, dokud se nedocílí požadované tvrdosti.
- Druhým způsobem částečné feritizace je žíhání na teplotu 850 °C a následující pozvolné ochlazování na teplotu 650 °C. Z této teploty již může být ochlazení rychlé.

V tabulce je uveden pokles tvrdosti několika vzorků (3,3% C, 2,10% Si, 0,45% Mn, 0,17% P, 0,08% S, 0,08% Mg), žíhaných různou dobu na teplotě 690 °C. Ve všech případech měl způsob ochlazování poměrně malý vliv na konečnou tvrdost tvárné litiny.

Počáteční tvrdost $H_B$	Setrvání na teplotě 690 °C, h	Způsob ochlazování	Tvrdost zpracování, $H_B$
280	1	vzduch	275
295	1,5	vzduch	275
295	2	vzduch	265
290	2	pec 20 °C/h	260
270	5	vzduch	230
270	5	pec 30 °C/h	225

Tabulka 7-1 - Vliv doby žíhání na výslednou tvrdost tvárné litiny [1]

#### 7.2.4 Homogenizace

Homogenizaci používáme pro dosažení rovnoměrné struktury, při níž dochází k rozrušení sítě vyloučenin, která vznikla po odlití. Pro tvárnou litinu se doporučuje dvouhodinový ohřev na teplotě 1000 °C, s následujícím ochlazením na vzduchu. Dochází ke zvýšení tažnosti a rázové houževnatosti tvárné litiny, přičemž se pevnost v tahu a tvrdost téměř nemění. Homogenizace vykazuje účinky pouze u tvárné litiny s vyšším obsahem manganu (nejméně 0,81% Mn).

#### 7.2.5 Normalizace

Tvárnou litinu normalizujeme pro zvýšení pevnosti a odolnosti proti opotřebení. Podstatou tohoto procesu je ohřev nad horní kritickou teplotou obvykle mezi 900 až 920 °C po dobu cca 2 hodin na tloušťku 25 mm, s následujícím ochlazením na vzduchu. Vysokou teplotou ohřevu docílíme austenitizace všech strukturálních složek včetně karbidů, ochlazením na vzduchu docílíme jemné perlitické struktury. Normalizace se používá u tenkostěnných odlitků s tloušťkou stěn do 25 mm. U odlitků se silnější stěnou z nelegované tvárné litiny by se vylučoval hrubý perlit a velké množství feritu (vlivem malého teplotního spádu).

Pro dosažení optimální rázové houževnatosti s vysokou pevností je vhodná **normalizace s následným popouštěním**. Popouštění probíhá při teplotě 430 až 650 °C, prodleva na této teplotě je po dobu 2 hodin na každých 25 mm tloušťky stěny. S rostoucí popouštěcí teplotou, klesá výsledná tvrdost, ale roste houževnatost tvárné litiny. Při prudkém ochlazení z popouštěcích teplot 430 až 510 °C může dojít u houževnatých tvárných litin s feritickou strukturou ke zkřehnutí materiálu, které se projevuje vzrůstem teploty přechodové oblasti (oblast mezi houževnatým a křehkým lomem).

U nízko fosforatých (0,05%P) a nízko křemíkatých (2,0%Si) tvárných litin může tento posuv činit vzrůst teploty o cca 11 až 22 °C. U vysoko fosforatých (0,08 až 0,16%P) a vysoko křemíkatých (2,7%Si) tvárných litin může tento posuv činit vzrůst teploty až o 83 °C. [1]

## 7.2.6 Kalení

Kalením lze získat řadu vynikajících vlastností – vysokou tvrdost, výborné pevnostní charakteristiky, vysokou odolnost vůči opotřebení. Většina malých a středních odlitků může být zpracována bez legování, běžnými postupy. Velké a těžké odlitky vyžadují přídavek legur.

Základním předpokladem při ohřevu je zachování uhlíku ve struktuře a jeho obohacení austenitem. Maximální tvrdost je dána množstvím uhlíku v austenitu, který závisí na teplotě austenitizace, množstvím křemíku v litině a zvoleném postupu kalení. Obsah uhlíku a legující prvky, jako měď, molybden, mangan a nikl ovlivňují kalitelnost.

Většina tvárných litin s obsahem 2 až 3%Si dosahuje plné austenitizace za teploty 900 °C. Po hodině až dvou je austenit zcela nasycen uhlíkem a dává předpoklady maximální tvrdosti po zakalení.

Nižší austenitizační teploty se používají u komplikovaných odlitků k zajištění minimálního sklonu k borcení a praskání. Praktické minimální austenitizační teploty jsou funkcí chemického složení, ale vedou k nižším tvrdostem po zakalení.

Mezi prvky, které se používají ke zvýšení kalitelnosti tvárné litiny je optimální molybden, za ním pak následuje mangan, nikl a měď. Účinek obsahu uhlíku v litině je nepřímě úměrný obsahu křemíku. Křemík má vliv jak na kalitelnost, taktéž na maximální tvrdost litiny. [1]

Má-li se dosáhnout maximální tvrdosti, je nutné kalit z teplot o 10 až 20 °C vyšších, než je horní kritická teplota zpracování tvárné litiny. Doba prohřevu při austenitizaci se prodlužuje s rostoucím množstvím feritu v základní struktuře (cca na 1 až 2 hodiny). Překročení doby prohřevu může mít za následek zhrubnutí martenzitu, oxidaci a deformaci součásti. U menších součástí z perlitické litiny je doba prohřevu do 30 minut.

Maximální tvrdosti perlitické tvárné litiny (1,8 – 2,6% Si) se dosahuje kalením z teplot 830 až 880°C. U tvárné litiny feriticko-perlitické se stejnou dobou prohřevu se optimální kalící teploty posouvají k vyšším hodnotám, a to až na cca 940-950°C.

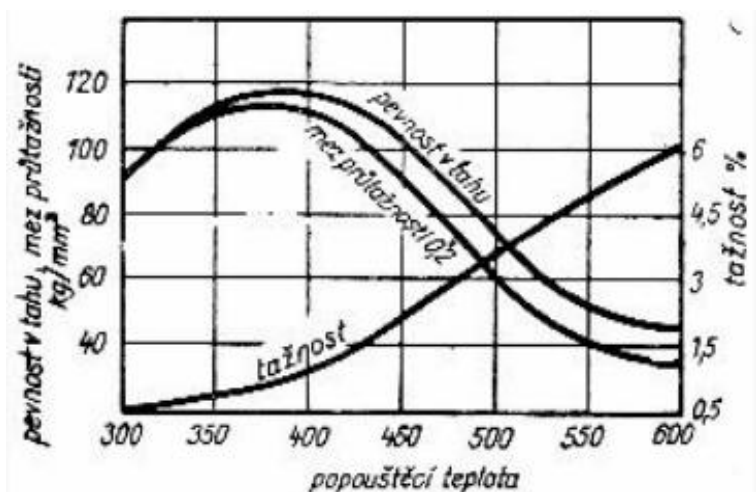
Vhodné kalící prostředí volíme v závislosti na chemickém složení litiny. Velké odlitky z nelegované litiny je možné kalit do vody. V případě litiny s vyšším množstvím křemíku či niklu ochlazujeme součást v oleji.

### 7.2.6.1 *zušlechťování – kalení a popouštění*

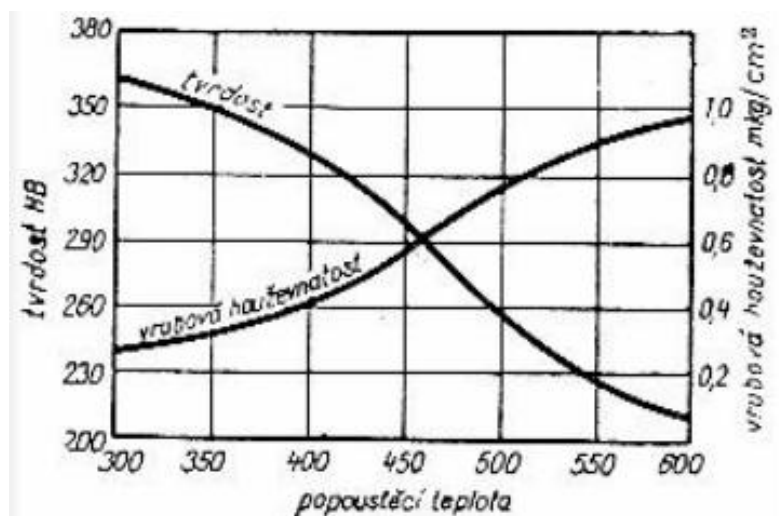
Pro zlepšení mechanických vlastností se odlitky po zakalení popouští. Pojmem zušlechťování je označováno kalení s následným popouštěním, jež je ovlivněno obsahem křemíku a výškou popouštěcí teploty. Nejprve nastává popouštění martenzitu na sorbit či trostit, poté dochází k jejich grafitizaci. Grafit se vylučuje v kulových útvarech, dochází k poklesu tvrdosti tvárné litiny, pevnost i tažnost se pohybuje víceméně na stejných hodnotách. Prvky křemík, nikl a měď podporují a urychlují grafitizaci, naopak mangan či molybden grafitizaci potlačují, což

může vést při vyšších obsazích těchto prvků ke zlepšení mechanických vlastností po popouštění. Při udržování odlitku na vyšších popouštěcích teplotách, rovněž při prodloužení popouštěcí teploty klesá tvrdost i pevnost odlitku.

Z diagramu níže je zřejmé, že s rostoucí popouštěcí teplotou klesá tvrdost, pevnost v tahu a zvyšuje se tažnost a vrubová houževnatost, toto tvrzení je platné do teploty 400 °C. Neoptimálnějších výsledků lze dosáhnout popouštěním mezi teplotami 350 až 450 °C.



Obrázek 7-5 Vliv teploty popouštění na pevnost, mez průtažnosti 0,2 a tažnost [1]

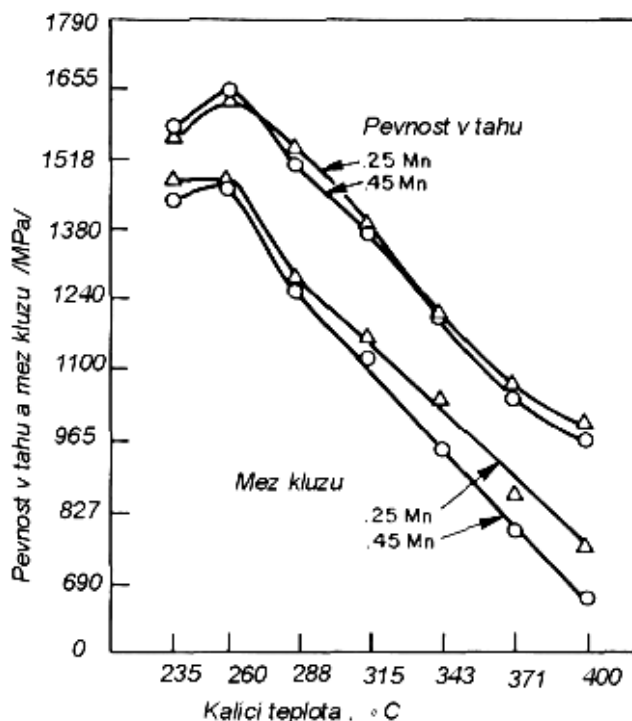


Obrázek 7-6 Vliv teploty popouštění na tvrdość a vrubovou houževnatost [1]



### 7.2.6.2 izotermické kalení

Litiny zpracované výše uvedenou metodou (tzv. ADI litiny) dosahují vysokých pevností, vyznačují se velmi dobrou houževnatostí a odolností vůči opotřebení.



Obrázek 7-7 Závislost kalicí teploty a pevnostních hodnot izotermicky kalené tvárné litiny [1]

Graf (viz obr. 7-7), znázorňuje závislost kalicí teploty a mechanických vlastností tzv. ADI litin. Výsledné hodnoty pevnosti a mezi kluzu jsou ovlivněny různými faktory – např. výší ohřevu, dobou ohřevu, velikostí součástí, chemickým složením tvárné litiny, volbou kalicího prostředí.

### 7.2.7 Povrchové kalení

Povrchově kalžený odlitek se může vyznačovat tvrdým povrchem s houževnatým jádrem odolným vůči rázům. Proto, aby bylo možné litinu povrchově kalit, musí být její struktura perlitická, s minimálním množstvím vyloučeného feritu a minimálně 0,5-ti procenty vázaného uhlíku. Volíme vyšší teploty a krátké doby ohřevu.

#### 7.2.7.1 kalení při ohřevu plamenem

Oproti ostatním metodám povrchového kalení je dosaženo lepší odolnosti vůči otěru. Velmi dobře kalitelné jsou perlitické a jehlicovité struktury.

Před samotným povrchovým kalením musí být součást zbavena vnitřních pnutí, která by mohla vést ke vzniku trhlin (ohřev na teplotu 590 - 650 °C/1 hod. na každých 25 mm tloušťky stěny). Za plamenem se vede vodní sprcha. Tvrdost struktury a hloubka zakalení je závislá na vzdálenosti mezi hořákem a sprchou, tlaku plynu a kyslíku, rychlosti pohybu hořáku, vzdále-

nosti od povrchu předmětu. S vyšším tlakem kyslíku je prudší ohřev, a zvyšuje se nebezpečí vzniku přehřátí, až spálení kovu. Čím je menší vzdálenost mezi hořákem a sprchou, tím je vyšší tvrdost povrchu, ale i nižší hloubka prokalení.

Po povrchovém ohřevu a zakalení by měl být odlitek přenesen do lázně či pece ohřáté na teplotu 150 – 200 °C po dobu min. 1 hodiny a poté ochlazen na vzduchu. Tímto dokončovací postupem snížíme napětí mezi povrchem a jádrem, aniž by došlo ke snížení tvrdosti povrchu.

### 7.2.7.2 indukční kalení [1]

Na výsledné hodnoty tvrdosti má značný vliv struktura materiálu společně s jeho složením. Požadujeme-li nižší houževnatost, pak volíme výchozí strukturu perlitickou či strukturu po normalizaci. Při požadované vyšší houževnatosti jádra je vhodnější struktura s vyšším obsahem feritu a volba vyšších teplot při kalení. Velmi vhodná pro indukční kalení je tvárná litina ADI.

Při indukčním kalení možno použít vysoké i střední frekvence. Hodnota proudu a délka ohřevu závisí na rozměrech kalené součásti a na výchozí struktuře. Při vysokofrekvenčním kalení jednodušších válcových součástí z tvárné litiny stačí většinou jednorázový ohřev příkonem 25 až 40 kW, tj. 1 až 3 kW/cm<sup>2</sup>, při době ohřevu 2 až 8 vteřin.

Při kalení proudem střední frekvence činí hodnoty příkonu 1,5 až 2,35 kW/cm<sup>2</sup>, při délce ohřevu 1,8 až 4 vteřiny. Součásti se většinou zakalují vodní sprchou. V některých případech, zvláště je-li litina legována niklem, může se kalit na vzduchu.

Tepelné zpracování	Druh materiálu odlitku	Požadavek	Teplota	Čas	Způsob chlazení ze žhací teploty
Snížení vnitřních pnutí	nelegované nizkolegované vysoce legované	snížení vnitřních pnutí	500 – 550°C 560 – 600°C 600 - 650°C	1 h + 1h na 25 mm síly stěny	40K/h do 300°C (do 100°C pro složitě odlitky)
Měkké žhání při nízkých teplotách	nelegované nizkolegované	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	700 - 760°C	45 min. až 1 hod. na 25 mm stěny	55K/h mezi 540 a 300°C
Měkké žhání při střed. teplotách	nelegované nizkolegované vysoce legované	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	790 - 900°C	Přes 45 min. na 25 mm stěny	v peci do 300°C
Měkké žhání při vyšších teplotách	melírovaná nebo bílá struktura	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	900 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	v peci do 300°C
Měkké žhání při vyšších teplotách	melírovaná nebo bílá struktura	odstranění karbidů při udržení maximální pevnosti a tvrdosti	900 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	ochlazení na vzduchu do 540°C, pak pec do 300°C
Perlitizace	všechny druhy	perlitická struktura	850 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	ochlazení na vzduchu do 540°C, pak pec do 300°C
Kalení	všechny druhy	martenzitická struktura, vysoká tvrdost	800 - 955°C	1h + 1h na 25 mm stěny	Vzduch nebo lázeň na <200°C
Zušlechťování	všechny druhy	snížení důsledků martenzitické transformace	150 - 650°C	1h na 25 mm stěny	vzduch nebo pec

Tabulka 7-2 Přehled způsobů tepelného zpracování tvárné litiny [1]

## Závěr

Vlastní praktické ověřovací zkoušky nemohly být provedeny. V práci uvedené údaje jsou ale postačující pro metalurgii výroby tekutého kovu v elektrické indukční peci o objemu 500kg tekuté litiny. Jsou zde popsány různé metody výroby, které mohou připadat v úvahu při výběru technologie. Je nutno uvést, že v této oblasti úvah bude rozhodující názor vlastníků slévárny, především co se týče vstupních surovin pro výrobu tekutého kovu (kovová vsázka, modifikační a očkovací předslitiny). Dále pak i technologické vybavení pro vlastní modifikaci, očkování a lití. V práci uvedené skutečnosti umožňují volbu vsázky dle požadované jakosti konečného odlitku, technologie výroby tekutého kovu i volbu případného tepelného zpracování pro dosažení požadovaných vlastností.

Při výrobě tvárné litiny je potřeba udržovat množství síry a fosforu na nižších hodnotách, než je tomu u litiny šedé, naopak množství křemíku i mědi je vyšší.

Z vypočtených hodnot pro vsázku je zřejmé, že litina ČSN 42 2305 má oproti syntetické litině vyšší jednotkovou cenu. Tato skutečnost je ovlivněna rozdílným složením vsázkových surovin – vyšší množství surového železa, které je ve srovnání s ocelí či vratem drahé. Nejdražšími surovinami je pro svá vyčerpaná naleziště měď. Dalšími vysoce ceněnými položkami jsou očkovačla, modifikátory a nauhličovadla, jejichž kvalita je přímo úměrná ceně

## Literatura

- [1] OTÁHAL, Vlastislav. *Litina s kuličkovým grafitem: Monografie*. Metalcasting and Foundry Consult. Brno.
- [2] Mores, A. *Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice, Slévárenství*. duben 2012.
- [3] Stephan Hasse. *Duktiles Gusseisen: Handbuch für Gußerzeuger und Gußverwender*. Schiele & Schön. ISBN 3-7949-0604-7
- [4] Tvárná litina. *Wikipedie* [online]. 2001 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tv%C3%A1rn%C3%A1\\_litina](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tv%C3%A1rn%C3%A1_litina)
- [5] Jana SKALOVÁ, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-244-6.]
- [6] LITINY-MV\_cv\_2.pdf. In: *Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci* [online]. Liberec, 2005 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV\\_cv\\_2.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV_cv_2.pdf)