

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA, STRUKTURA A VLASTNOSTI LITIN S KULIČKOVÝM GRAFITEM VYRÁBĚNÝCH NA ELEKTRICKÝCH PECÍCH

MANUFACTURING, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST IRON WITH GLOBULAR GRAPHITE  
PRODUCED ON ELECTRIC FURNACES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Tomáš Tvrdoň**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**

**BRNO 2022**



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Tomáš Tvrdouh</b>
Studijní program:	Slévárenská technologie
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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

### **Výroba, struktura a vlastnosti litin s kuličkovým grafitem vyráběných na elektrických pecích**

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

Litiny s kuličkovým grafitem mají strukturu tvořenou jednak grafitem ve tvaru kuliček a dále základní kovovou hmotou, která bývá feritická, feriticko–perlitická nebo zcela perlitická. Tvar, počet kuliček a jejich grafitu mají zásadní vliv na mechanické, technologické i užité vlastnosti litiny. Změnou tvaru grafitu se mění zejména plastické vlastnosti litiny. Podíl feritu a perlitu významně ovlivňuje jak meze pevnosti a meze kluzu. Na strukturu a vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem má vliv nejen chemické složení litiny, ale i typ použitého tavícího agregátu, skladba vsázky zejména podíl surového železa ve vsázce a dále způsob očkování a modifikace litiny a podmínky jejího tuhnutí a chladnutí ve slévárenské formě.

#### **Cíle diplomové práce:**

Cílem práce je provést literární rozbor technologie výroby odlitků z litiny s kuličkovým grafitem zejména z pohledu použitého tavícího agregátu, druhování kovové vsázky a následně podmínek modifikace a očkování litiny. Na základě tohoto rozboru provést návrh technologie výroby litiny s kuličkovým grafitem na elektrické indukční peci, kterou by bylo možné modifikovat pro její použití na elektrické obloukové peci. Jedná se zejména o optimalizaci podílu surového železa ve vsázce. Cílem je získat technologii využívající levnější kovovou vsázku při zachování vyhovujících mechanických i slévárenských vlastností litiny s kuličkovým grafitem a vyhovující vnitřní a povrchové jakosti odlitků z těchto litin. Navržené technologie budou i provozně ověřeny včetně stanovení výrobních nákladů a jejich porovnání se stavem ve vybrané slévárně využívající tavení na elektrických obloukových pecích.

#### **Seznam doporučené literatury:**

ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998. ISBN 80-214-1263-1.

BERNS, H., W. THEISEN. Ferrous Materials Steel and Cast Iron. SPRINGER 2008. ISBN 978-3-540-71847-5.

ELBEL, T. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

HOSFORD, F.W. Iron and Steel. Cambridge, New York 2012. ISBN 978-1-107-01798-6.

CAMPBELL, J. Casting. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. ISBN 0-7506-1696-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá technologií výroby litiny s kuličkovým grafitem (LKG) s nižšími výrobními náklady a vyhovující jakostí z hlediska vnitřní struktury a mechanických vlastností. V práci je provedena rešerše na téma grafitických litin s bližším pojednáním o chemickém složení, struktuře a vlastnostech litiny s kuličkovým grafitem. Experimentální část se zabývá výrobou LKG na elektrické obloukové a indukční peci s rozdílným druhoáním vsázky. Následně jsou porovnány struktury a mechanické vlastnosti litiny vyrobené na těchto dvou tavicích agregátech. Důležitou součástí této práce je také ekonomické zhodnocení, kde jsou navržené varianty porovnány z hlediska druhoání vsázky a použitého tavicího agregátu.

### **Klíčová slova**

litina s kuličkovým grafitem, druhoání vsázky, elektrická oblouková pec, elektrická indukční pec, ekonomické zhodnocení

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the technology of production of ductile iron with lower production costs. The thesis takes into account quality in terms of internal structure and mechanical properties. The thesis consists of two parts. The first part is about theoretical analysis of the topic of graphite cast irons with a more detailed discussion of the chemical composition, structure and properties of ductile iron. The experimental part deals with the production of ductile iron on electric arc and induction furnaces with different metall charging. Subsequently, the structures and mechanical properties of the ductile iron produced on these two melting aggregates are compared. An important part of this work is also an economic evaluation, where the proposed variants are compared in terms of metall charging and used melting aggregates.

### **Key words**

ductile iron, metall charge, electric induction furnaces, arc furnaces, economic evaluation

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TVRDOŇ, Tomáš. *Výroba, struktura a vlastnosti litin s kuličkovým grafitem vyráběných na elektrických pecích* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139822>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba, struktura a vlastnosti litin s kuličkovým grafitem vyráběných na elektrických pecích vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

místo, datum

---

Bc. Tomáš Tvrdoň

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych v první řadě velice poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Antonínovi Záděrovi, Ph.D. za odborné vedení, velmi cenné rady a připomínky během psaní této diplomové práce. Velmi si vážím jeho trpělivosti nejen při konzultacích. Poděkování patří také pracovníkům odboru slévárenství VUT za rady a pomoc při experimentech. Zároveň bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Tužičkovi a Františkovi Mrázkovi za poskytnutí potřebného zázemí a rad ve slévárně Ernst Leopold s.r.o.

---



---

**OBSAH**

ÚVOD .....	10
1 Litiny – základní klasifikace.....	11
1.1 Strukturní složení grafitických litin.....	11
1.1.1 Uhlík a křemík v litinách .....	12
1.2 Základní kovová hmota v litinách .....	14
1.2.1 Ferit.....	14
1.2.2 Perlit.....	18
1.2.3 Austenit.....	19
1.2.4 Cementit.....	20
1.2.5 Další struktury v litinách .....	20
2 Litina s kuličkovým grafitem .....	22
2.1 Výroba litiny s kuličkovým grafitem .....	23
2.1.1 Vsázkové suroviny pro LKG .....	23
2.2 Tavnice a tavnice.....	23
2.2.1 Kelímková elektrická indukční pec .....	23
2.2.2 Elektrická oblouková pec .....	26
2.2.3 Modifikace litin .....	28
2.2.4 Grafitizační očkování litin .....	31
3 Experimentální část .....	33
3.1 Volba materiálu .....	33
3.2 Volba forem pro zkušební odlitky .....	35
3.3 Druhování vsázek zkušebních taveb .....	37
3.4 Tavnice a odlévání .....	41
3.5 Příprava vzorků .....	45
3.6 Mechanické zkoušky .....	48
3.7 Metalografie .....	55
3.7.1 Příprava vzorků.....	55
3.7.2 Hodnocení metalografických vzorků.....	56
4 Tavnice provedené v provozních podmínkách slévárny Ernst Leopold .....	70
5 Ekonomické zhodnocení.....	74
ZÁVĚR.....	79
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	82
SEZNAM PŘÍLOH .....	84

---

---

## ÚVOD

Litina s kuličkovým grafitem (LKG) je materiál, který se ve strojírenství používá ke komerční výrobě odlitků přibližně 70 let. Jedná se o materiál s dobrými slévárenskými vlastnostmi. Mechanické vlastnosti LKG (mez pevnosti, mez kluzu) jsou přibližně srovnatelné s vlastnostmi nelegovaných ocelí na odlitky. V průběhu let převažuje stále rostoucí tendence objemu výroby LKG, jelikož se jedná o materiál s širokým spektrem využití, a to např. v automobilovém průmyslu, energetice a dalších odvětvích trhu.

Jak již název napovídá, grafit v LKG je v matici vyloučen ve tvaru kuliček. Toho se v praxi dosahuje přísadou hořčíku, který způsobuje právě vylučování kuličkového grafitu. Důsledkem vyloučených kuliček je zvýšení pevnosti a tažnosti, naopak se snižuje např. zabíhavost nebo tepelná vodivost. Dnes se LKG vyrábí převážně na elektrických indukčních pecích (EIP) s následným odléváním do pískových forem.

LKG obecně patří mezi materiály s nízkou cenou. Pro její dosažení je důležité neustále snižovat výrobní náklady. V posledních měsících se však setkáváme s prudkým nárůstem cen u vstupních surovin, energií, dopravy atd. Zejména u kovových materiálů a energií se jedná o zdražení v desítkách až stovkách procent. Z tohoto důvodu hraje ekonomika výroby zásadní roli a je nutné ji neustále sledovat.

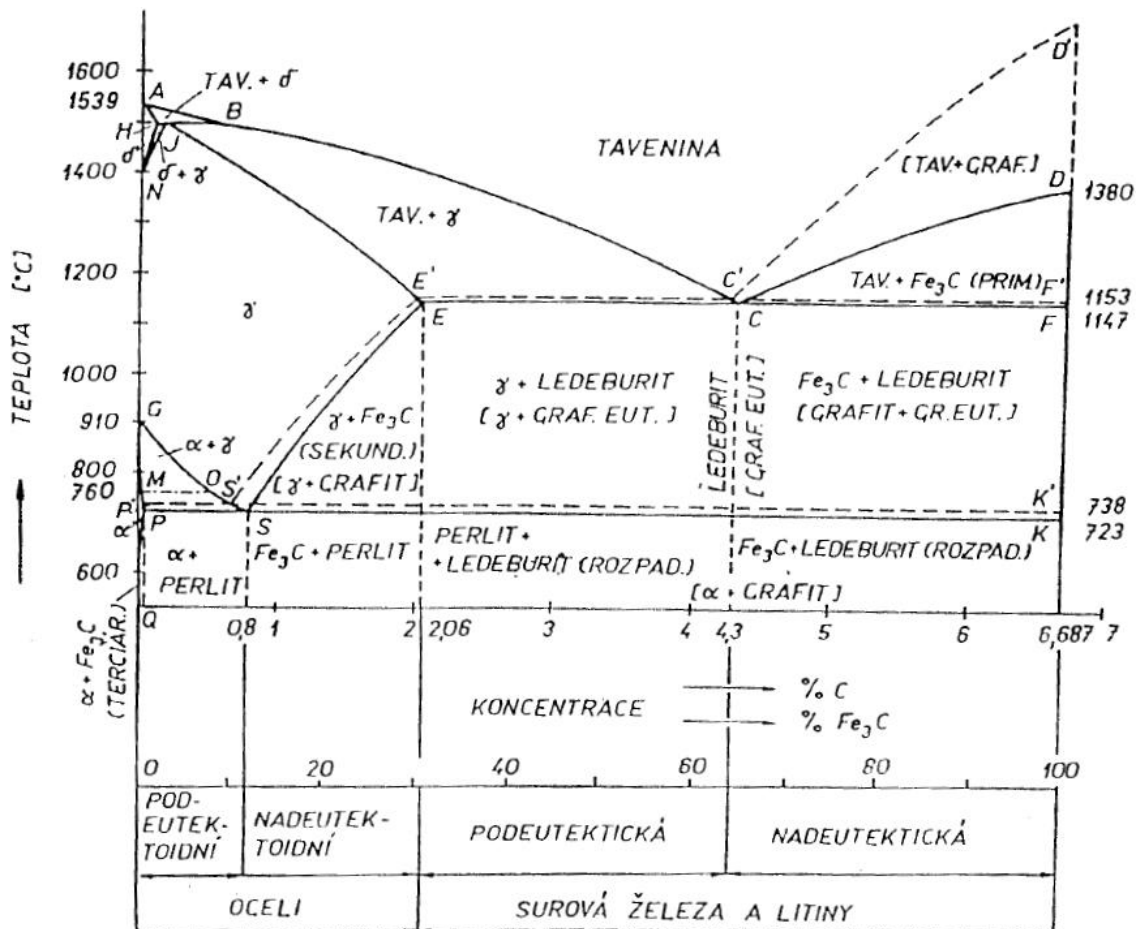
Vlastní diplomová práce se zabývá tímto aktuálním problémem a řeší snižování nákladů v konkrétním provozu – ve slévárně Ernst Leopold s.r.o. (EL). Jedná o slévárnu vyrábějící převážně ocelové odlitky. Zároveň v provozu slévárny EL nejsou k dispozici elektrické indukční pece. Proto zde výroba LKG probíhá na elektrických obloukových pecích (EOP), což není tradičně využívaný tavicí agregát pro výrobu LKG. I přesto EL vyrábí významný podíl LKG a z tohoto důvodu je optimalizace nákladů na využívaném tavicím agregátu důležitá.

V první části této práce byla zpracována rešerše zabývající se litinou s kuličkovým grafitem zejména z hlediska vnitřní struktury, chemického složení a výroby. Následně byla zpracována experimentální část práce. Navržené experimenty se lišily zejména z pohledu druhování vsázky a tavicího agregátu (EOP a EIP). Následně byly tavby zhodnoceny z hlediska mechanických vlastností a vnitřní jakosti.

Výsledkem diplomové práce je také ekonomické zhodnocení, které porovnává možné varianty výroby LKG z hlediska obou zmíněných tavicích agregátů. Zároveň tato práce ukazuje cestu k možným úsporám výrobních nákladů.

## 1 LITINY – ZÁKLADNÍ KLASIFIKACE

Litiny patří mezi významné slitiny železa, uhlíku a dalších doprovodných prvků. Zastoupení uhlíku v matici je vždy větší, než je minimální rozpustnost uhlíku v austenitu, což odpovídá zhruba 2,14 %. Uhlík je v litinách nejvýznamnějším prvkem a může se vyskytovat buď jako grafit, nebo jako sloučenina  $\text{Fe}_3\text{C}$  – karbid železa. Soustava, ve které figuruje sloučenina  $\text{Fe}_3\text{C}$  (též označovaná jako cementit), se nazývá metastabilní a popisuje vyloučení uhlíku v ocelích a bílých litinách. Druhou variantou je stabilní systém (diagram Fe-C), kde je uhlík vyloučený ve formě grafitu. Podle tohoto systému je popsáno tuhnutí grafitických litin. Přechodovým stavem mezi grafitickými a bílými litinami je tzv. maková litina. Obr. 1 popisuje diagram se stabilní soustavou železo-grafit (čárkovaná čára) a metastabilní soustavou železo-cementit (plná čára). [1; 2; 3; 4]



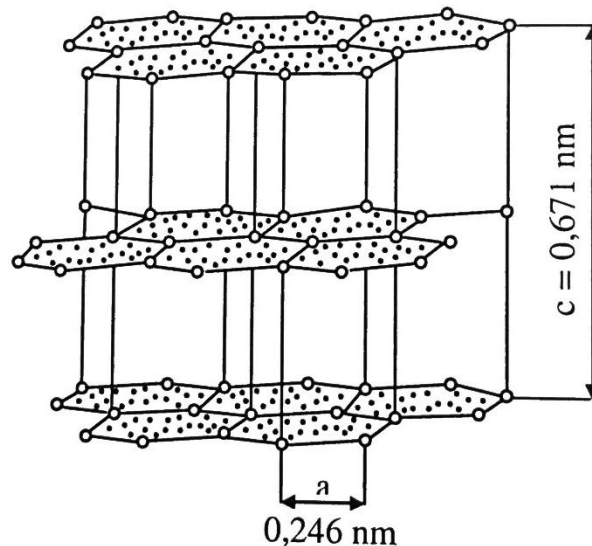
Obr. 1 Rovnovážný diagram Fe-C --- Fe-Fe<sub>3</sub>C [3].

### 1.1 Strukturní složení grafitických litin

U grafitických litin je strukturní složení dáno grafitem a kovovou hmotou. Vnitřní struktura v litině přímo ovlivňuje její mechanické i technologické vlastnosti. Uhlík i jednotlivé složky kovové hmoty jsou níže podrobněji rozebrány. [3; 4]

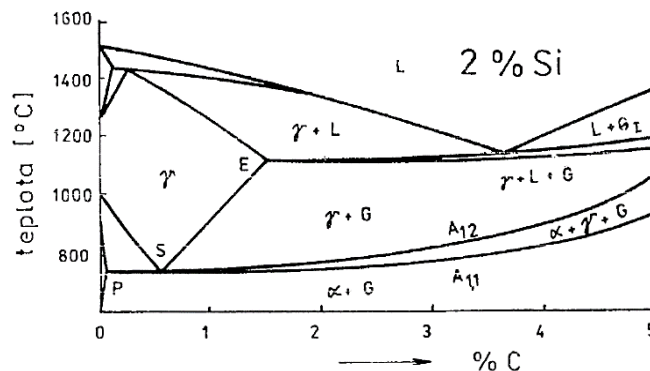
### 1.1.1 Uhlík a křemík v litinách

Čistý uhlík se může vyskytnout ve dvou alotropických modifikacích. První z nich je diamant, který je nejtvrďší přírodní látkou. Důvodem této stability jsou čtyři pevné kovalentní vazby mezi atomy uhlíku. Druhou modifikací, pro metalurgii litin nejvýznamnější, je grafit. Zde jsou jednotlivé roviny uhlíkových atomů spojeny jen slabými vazbami, což je znázorněno na *obr. 2*. Proto je grafit měkký a vede elektrický proud. [1; 4]



*Obr. 2* - Krystalová struktura grafitu [2].

Uhlík v litině podporuje grafitizaci. Při vylučování grafitu v litině dochází ke zvětšování objemu. Tento proces je označován jako grafitická expanze a kompenzuje celkové zmenšení objemu kovu při tuhnutí. Na grafitizaci má také velký vliv křemík, který je významným prvkem v litině. Pro lepší ilustraci toho, co se při tuhnutí v litině děje, slouží ternární diagramy soustavy Fe-C-Si. Příkladem takového diagramu se 2 % křemíku v kovu je rovnovážný diagram Fe-C-%Si na *obr. 3*. Je patrné, že při daném obsahu křemíku dochází jednak k posunu eutektoidního bodu na hodnotu cca 3,6 % C a zároveň k rozšíření dvofázového pásma v oblasti eutektické teploty. Křemík významně působí jako feritotvorný prvek. [3]



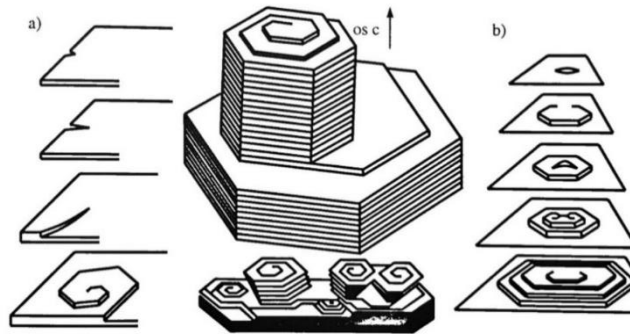
*Obr. 3* Rovnovážný diagram soustavy Fe-C-2 %Si [3].

Zkoumání tuhnutí litin potvrdilo, že se v kovu vyskytují uspořádaná místa (tzv. klastry), která jsou obohacena o uhlík. Krystalizace grafitového eutektika začíná na cizích částicích, tzv. zárodcích, které plavou v tavenině. Při tomto procesu se okolí ochuzuje o uhlík a vzniká druhá krystalická fáze eutektika – austenit. Grafit krystalizuje v šesterečné mřížce (HCP). Růst

grafitu je možný ve směru osy **a** i osy **c**. Růst může probíhat buď spirálovitě, nebo do pyramidy, může se i různě větvit, což znázorňuje *obr. 4*. Jaký tvar grafitu se v matrici objeví závisí na směru, ve kterém grafit rychleji krystalizuje.

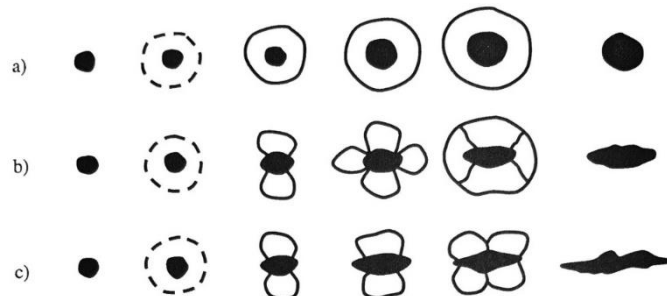
Pokud:

- $v_a > v_c$ , pak převažuje růst ve směru  $\{11\bar{2}0\}$  a vzniká lupínkový grafit,
- $v_a < v_c$ , pak převažuje růst ve směru  $\{0001\}$  a vzniká červíkovitý, zrnitý a přechodový grafit.



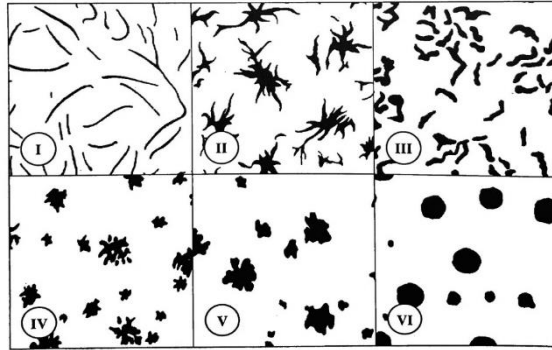
*Obr. 4* a) spirálovitý a b) pyramidový růst grafitu [2].

Při krystalizaci je zárodek nejprve obalen austenitickou obálkou, přes kterou difunduje uhlík a krystal roste. Pokud dojde při tuhnutí k rychlému uzavření austenitické obálky, je výsledkem zrnitý (kuličkový) grafit. V případě, že se obálka neuzavře vůbec, je výsledkem lupínkový grafit. Pokud se obálka uzavře pomalu, grafit tuhne v podobě červíků, což je přechodová forma mezi kuličkovým a lupínkovým grafitem. Tento proces je znázorněn na *obr. 5*. [2]



*Obr. 5* Schéma různých tvarů grafitu podle charakteru austenitické obálky: a) rychle uzavřená – zrnitý grafit, b) pomalu uzavřená – červíkovitý grafit, c) neuzavřená – lupínkový grafit [2].

Podle normy ČSN EN 1560 dělíme grafit podle jeho tvaru do šesti kategorií (viz *obr. 6*). Pokud je grafit v matrici vyloučen ve formě jehliček, hovoříme o lupínkovém grafitu (I). Pokud je grafit vyloučen ve formě kuliček, označujeme ho jako zrnitý (VI) a tvoří strukturu litiny s kuličkovým grafitem. Dále rozlišujeme vločkový (II), červíkový (III), pavoučkový (IV) a nedokonale zrnitý grafit (V). Blíže se problematikou pavoučkového grafitu zabývá závěrečná práce na téma Vliv olova a antimonu v litině na degradaci tvaru grafitu. [1; 2; 5]



*Obr. 6* Klasifikace tvaru grafitu podle normy ČSN EN 1560: I – lupínkový, II – vločkový, III – červíkový, IV – pavoučkový, V – nedokonale zrnitý, VI – zrnitý [2].

## 1.2 Základní kovová hmota v litinách

Vlastnosti materiálů závisí na jejich struktuře. Jinak tomu není ani u litin. Ve ztuhlé litině se může vyskytovat řada strukturních složek. Ty vznikají během tuhnutí a jsou ovlivněny zejména chemickým složením, dále pak rychlostí tuhnutí či případným zušlechťováním. Níže jsou tyto významné strukturní složky litiny podrobněji rozebrány. [6; 7]

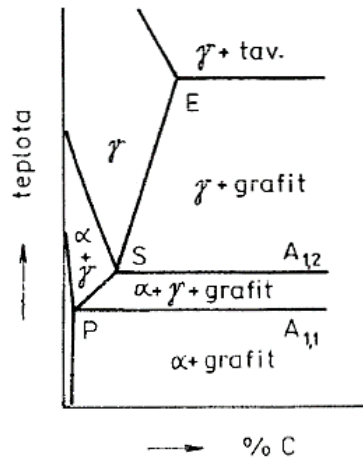
### 1.2.1 Ferit

Podle stabilního systému vzniká eutektoidní transformací austenitu ferit a grafit. V metastabilním systému se austenit rozpadá na ferit a cementit (který dohromady tvoří perlit). Pomalé ochlazování podporuje vyloučení feritu v matrici. [3] Ferit je měkký a tvárný a je nositelem houževnatosti. V surovém stavu (v čistém železe) má nízkou pevnost (do 100 MPa), v grafitických litinách je však díky legujícím prvkům substitučně zpevněn (zejména křemíkem), a proto dosahuje vyšších pevností (220 MPa i více), jak je uvedeno v *tab. 1*. Díky těmto vlastnostem je také dobře obrobitelný. Ferit je do 768 °C magnetický, nad tuto teplotu je paramagnetický. Ferit má FCC mřížku. [8]

*Tab. 1* Fyzikální vlastnosti feritu [3].

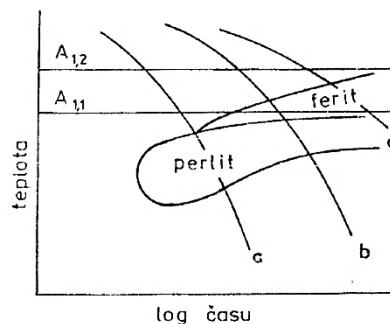
Alotropická modifikace železa	$\alpha$ -Fe
Mřížka	FCC
Poloměr atomu	0,123 nm
maximální rozpustnost uhlíku	0,04 % při 723 °C (<0,01 % při 20 °C)
R <sub>m</sub>	220 MPa
Tvrdość	50 HB
Tažnosť A5	70 %

Na vyloučení feritické struktury v litině mají vliv zejména feritotvorné prvky. Tím nejdůležitějším je křemík, v literatuře [3] je uveden také hliník a v omezené míře titan (může tvořit karbidy). Záměrné použití hliníku či titanu je pro podpoření feritické struktury výjimečné. Na *obr. 7* je zobrazen výřez z diagramu Fe-C-Si, kde je patrné široké dvoufázové teplotní pásmo vymezené teplotami  $A_{1,1}$  a  $A_{1,2}$ . Mezi těmito teplotami existují současně ferit s austenitem a grafitem. V této oblasti dochází právě ke zmiňované transformaci austenitu na ferit, což výrazně podporuje právě křemík (rozšiřuje toto pásmo a dává tak více prostoru pro vyloučení feritu). Rychlost ochlazování také zásadně ovlivňuje průběh krystalizace.



*Obr. 7* Transformace austenitu v diagramu Fe-C-2 %Si [3].

Průběh tuhnutí v závislosti na teplotě a času je znázorněn na ARA diagramu na *obr. 8*. Zde je vidět oblast vymezená teplotami  $A_{1,2}$  a  $A_{1,1}$ . Při pomalém tuhnutí kovu podle křivky **a** dochází k ztuhnutí kovu právě v této vymezené oblasti a dochází tak k transformaci austenitu na ferit.



*Obr. 8* ARA diagram: vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu [3].

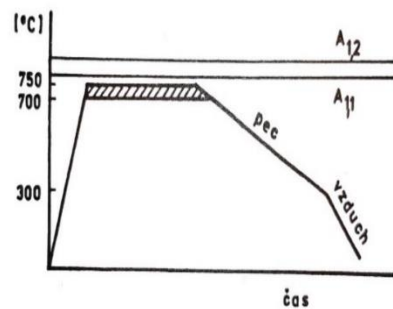
Naopak při rychlém ochlazování dochází ke krystalizaci podle křivky **c**. Zde dochází k vyloučení perlitu a vzniká tak čistě perlitická struktura. Křivka **b** znázorňuje vznik (přechodové) feriticko-perlitické struktury. Rychlost ochlazování ovlivňují tloušťky stěn. Rychlejší chladnutí bude probíhat u tenkostěnných odlitků, naopak pomalé chladnutí se projeví u silných stěn. Proto je důležité vztahovat vlastnosti litiny ke konkrétním tloušťkám stěn. [3]

Pokud dojde k vyloučení vyššího množství perlitu v litině, která má být převážně feritická, kov je možné tepelně zpracovat a dosáhnout tak feritické struktury. Jedná se o žihání naměkko – tzv. feritizační žihání. Během procesu dochází k rozpadu perlitického cementitu a zvyšuje se tak podíl feritu ve struktuře. K tomuto procesu může docházet už při podkritických teplotách, těsně

pod kritickou teplotou. Rychlost přeměny je závislá hlavně na chemickém složení kovu. Pokud jsou přítomny prvky stabilizující perlit (např. Mn, Cu, Sn, Cr, V, Mo), probíhá proces rozpadu pomaleji. Nikl na dobu či teplotu žíhání nemá vliv. Při feritizačním žíhání se netvoří nové grafické útvary, ale dochází k difuzi uhlíku a k jeho připojování se ke stávajícím částicím grafitu. Jelikož se obecně jedná o difúzní proces, může být rychlost feritizace ovlivněna jak vyšší teplotou žíhání, tak i jemněji vyloučeným grafitem. Z hlediska zvolené teploty žíhání rozlišujeme:

- žíhání za podkritických teplot,
- žíhání za těsně nadkritických teplot,
- dvoustupňové feritizační žíhání.

Žíhání za podkritických teplot se volí zhruba 30–50 K pod teplotou  $A_{1,1}$ . Vyšší hodnoty se nedoporučují, jelikož pak dochází k rozpouštění uhlíku v austenitu. Při rychlejším ochlazení to může vést ke vzniku perlitu. Na *obr. 9* je znázorněn průběh teploty žíhání v závislosti na čase. V *tab. 2* jsou shrnuty parametry procesu. U ochlazování platí, že čím vyšší je obsah manganu v kovu, tím je pomalejší má být ochlazování (kvůli zabránění vyloučení perlitu). [7]

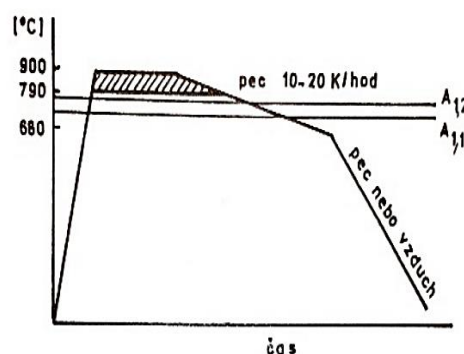


*Obr. 9* Feritizační žíhání za podkritických teplot [7].

*Tab. 2* Parametry žíhání za podkritických teplot [7].

teplota žíhání	700-760 °C
délka prodlevy	45–60 min + 60 min/25 mm tloušťky stěny
ochlazování	v peci: do 580 °C (20-50 K. hod <sup>-1</sup> ) pak na vzduchu nebo v peci: do 300 °C (50-60 K.hod <sup>-1</sup> )

Feritizační žíhání při těsně nadkritických teplotách probíhá v oblasti kritické teploty nebo těsně nad ní (viz *obr. 10*). Následné ochlazování probíhá pomalu, a to zejména přes oblast kritických



*Obr. 10* Feritizační žíhání za nadkritických teplot [7].

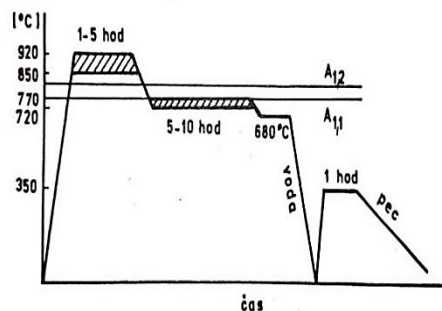


teplot  $A_{1,2}$  a  $A_{1,1}$ . Při rychlém ochlazení by hrozilo zpětné vyloučení perlitu. Feritizační žíhání se používá v případě, že při žíhání za podkritických teplot nedojde k dostatečné feritizaci. Zároveň bývá aplikováno při nízkém obsahu křemíku v kovu nebo při přítomnosti prvků stabilizujících perlit. V *tab. 3* jsou uvedeny teploty a doporučené časy žíhání. [7]

*Tab. 3* Parametry žíhání za nadkritických teplot [7].

teplota žíhání	790-900 °C
délka prodlevy	1 hod + 1 hod/25 mm tloušťky stěny
ochlazování	mezi 800-640 °C: v peci rychlostí 10-20 K.hod <sup>-1</sup> (nutné dodržet, jinak se vytvoří perlit) mezi 640-300 °C: na vzduchu nebo v peci (50-60 K.hod <sup>-1</sup> )

Dvoustupňové feritizační žíhání se používá pro odlitky vyrobené z litiny s kuličkovým grafitem, které mají vysoké nároky na tažnost. První stupeň žíhání probíhá při nadkritických teplotách. Následuje rychlé ochlazení ve vodě na teplotu těsně pod spodní kritickou hodnotu. Následuje popouštění. Při teplotě nad 900 °C dochází k růstu austenitického zrna, což je nežádoucí. Počet grafitových a chemické složení ovlivňuje dobu výdrže na 2. stupni žíhání. Celý proces je znázorněn na *obr. 11*. Průběh teplot a časů dvoustupňového žíhání shrnuje *tab. 4* [7]



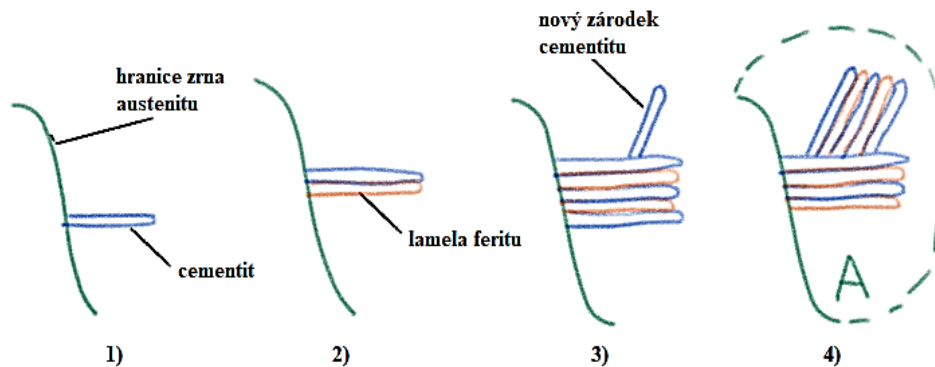
*Obr. 11* Dvoustupňové feritizační žíhání [7].

*Tab. 4* Parametry dvoustupňového žíhání [7].

1. stupeň	
teplota žíhání	850-920 °C
délka prodlevy	1-5 hod
ochlazování	ochlazení v peci nebo na vzduchu do oblasti kritických teplot
2. stupeň	
teplota žíhání	720-770 °C
délka prodlevy	5-10 hod.
ochlazování	ochlazení v peci na 690-700 °C/1hod. – ochlazení ve vodě
popouštění	
350 °C/1 hod. na vzduchu	

## 1.2.2 Perlit

Perlit vzniká rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Podle literatury [3] je vedoucí fází perlitické přeměny cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Ten vzniká na hranici zrna austenitu. Následně dochází k ochuzování okolí o uhlík a vedle lamel cementitu vznikají lamely feritu. Zrna vznikající na austenitu nemají vždy stejnou orientaci (viz *obr. 12*). Z hlediska morfologie rozlišujeme lamelární a globulární perlit. Lamelární perlit je obvyklejší formou a je tvořen lamelami feritu a cementitu, které vyrůstají paralelně po svém boku. Globulární perlit není zcela obvyklý, jelikož vzniká sbalením lamel perlitu až při sferoidisačním žhání nebo při velmi pomalém ochlazování. Tyto globulární struktury jsou lépe obrobitelné.



Obr. 12 Vznik perlitu (schéma) [3].

V porovnání s feritem je perlit nositelem pevnosti a tvrdosti v litině. S tím souvisí nižší houževnatost. Vedle toho však perlit vykazuje lepší otěruvzdornost, což souvisí s nižší obrobitelností. To, jaké budou výsledné vlastnosti perlitu, závisí především na jeho „hustotě“ v matici, což popisuje tzv. disperzita perlitu.

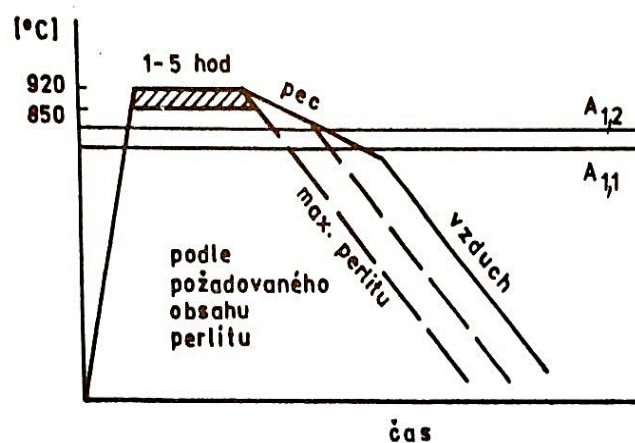
V *tab. 5* jsou shrnuty vlastnosti perlitu. Zde je patrná právě vysoká tvrdost (až 280 HB) a mez pevnosti až 800 MPa. Proto je perlitická struktura významná hlavně pro výrobky s požadavky na vysokou pevnost a tvrdost.

Tab. 5 Vlastnosti perlitu [3].

llootropická modifikace železa	$\alpha\text{-Fe}$
mřížka	FCC
mez pevnosti (Rm)	800 MPa
tvrdost	280 HB

Vylučování perlitu je ovlivněno rychlostí tuhnutí. Rychlé tuhnutí kovu vede k vyloučení většího podílu perlitu, jak již bylo popsáno výše. Vedle toho má na perlitickou strukturu zásadní vliv chemické složení. Existují prvky, jejichž přítomnost stabilizuje v kovu perlit. Jsou to Sn, Mo, P, Cu, Ti, Mn, Ni a Cr (seřazeno od největšího účinku). V praxi se nejčastěji využívá cín a měď. Cín má až desetinásobný účinek na vyloučení perlitické struktury než měď. Přítomnost cínu v kovu nad 0,05 % vede ke vzniku mezibuněčného lupínkového grafitu. Vyšší podíl cínu je možný v případě současného legování niklem. To je z ekonomického hlediska nevýhodné, a proto se tento způsob v praxi nepoužívá. [2]

Perlitické struktury lze dosáhnout i tepelným zpracováním – normalizačním žíháním. Dosahuje se při něm částečné nebo zcela perlitické struktury. Při ohřátí kovu nad kritické teploty (cca 850-920 °C) dochází k tzv. austenitizaci (cca 30-60 K na teplotou  $A_{1,2}$ ). Zde dochází k obohacování austenitu uhlíkem. Následně je provedeno prudké ochlazení přes kritické teploty, což vede k vyloučení perlitické struktury. Řízením ochlazovacího procesu lze ovlivnit výsledný podíl perlitu. Např. pokud po austenitizaci následuje ochlazování v peci a až potom následuje prudké ochlazení, dosáhne se nižšího podílu perlitu. U silnostěnných odlitků se používá chlazení proudem vzduchu nebo vodní sprchou. U odlitků s tenkými stěnami stačí ochlazování na vzduchu. Důsledkem normalizačního žíhání může být zbytkové vnitřní pnutí v odlitku. Řešením může být buď ukončení ochlazování na 550 °C, nebo následné žíhání pro odstranění vnitřního pnutí. Průběh normalizačního žíhání je na obr. 13. [7]



Obr. 13 Průběh normalizačního žíhání [7].

V tab. 6 jsou shrnuty parametry normalizačního žíhání.

Tab. 6 Režim normalizačního žíhání [7].

teplota austenitizace	850-920 °C (nelegované litiny bez volných karbidů cca 30 K nad kritickou teplotou $A_{1,2}$ )
délka prodlevy	1-5 hod
ochlazování (nelegované litiny):	tloušťka stěny do 40 mm: klidný vzduch tloušťka stěny 40-60 mm: proudící vzduch tloušťka stěny nad 60 mm: vodní sprcha

### 1.2.3 Austenit

V nelegovaných litinách při tunutí vzniká austenit a grafit, případně cementit. Jak již bylo uvedeno na str. 14, austenit se následně rozpadá při austenitické transformaci na ferit a cementit, popřípadě na ferit a grafit. V tomto případě lze konstatovat, že austenit není v litině při pokojové teplotě typickou strukturou. Existují ale austenitické niklové litiny (obchodně též označovány jako Ni-resist). V litinách typu Ni-resist se austenit vyskytuje i při pokojové teplotě. Pomáhají tomu prvky, které stabilizují austenit. Jsou to např. nikl, měď či mangan. Tyto prvky zvyšují maximální rozpustnost uhlíku a snižují transformační teplotu austenitu. Prvek, který snižuje stabilitu austenitu, je podle literatury [3] zejména křemík. Problematikou

austenitických niklových litin se blíže zabývá např. Ing. Václav Kaňa Ph.D. ve své disertační práci. [3, 9]

Jak uvádí literatura [3], austenit jako takový je měkký a tvárný. Je odolný vůči korozi a vysokým teplotám a je paramagnetický. V *tab. 7* jsou shrnuty fyzikální vlastnosti austenitu. [3]

*Tab. 7* Vlastnosti austenitu [3].

alotropická modifikace železa	$\gamma$ -Fe
mřížka	FCC
poloměr atomu	0,126 nm
mřížková konstanta	0,364 nm
maximální rozpustnost uhlíku	2,08 % při 1147 °C (platí pro metastabilní systém)

#### 1.2.4 Cementit

Jedná se o velmi tvrdé částice, které jsou u nelegovaných litin tvořeny karbidem železa  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Cementit krystalizuje ve rhombické krystalové mřížce, která je velmi složitá. Pokud jsou v matici přítomné legury (např. Mn, Cr, W, V, Mo), mohou substituovat za atomy železa a tvořit tak komplexní karbidy typu  $(\text{Fe.X})_3\text{C}$ .

Tvrdość cementitu dosahuje až 800 HV, komplexní karbidy jsou ještě tvrdší. S tím souvisí vysoká křehkost. Při překročení určitého podílu karbidů ve struktuře už je materiál prakticky neobrobitelný.

Z pohledu podmínek vylučování cementitu rozlišujeme v litinách 3 formy cementitu:

- Primární – vyskytuje se v bíle tuhoucích (nadeutektických) litinách ve formě hrubých jehlic (plave v tavenině).
- Eutektický – součást ledeburitu, vzniká při tuhnutí eutektika. Způsobuje vysokou tvrdość, křehkost a neobrobitelnost bílé litiny.
- Perlitický – vzniká jako součást transformace austenitu na perlit. [3; 6]

#### 1.2.5 Další struktury v litinách

##### ▪ Ledeburit

Jedná se o eutektikum v metastabilní soustavě Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , obsahuje 4,3 % uhlíku. Eutektikum je tvořeno austenitem a ledeburitickým cementitem. Transformovaný ledeburit vzniká transformací ledeburitického austenitu na perlit při eutektoidní teplotě. U bílých litin je ledeburit základní složkou. Vzniká nejčastěji v oblastech, kde dochází k rychlému odvodu tepla. Hovoříme o tzv. zákalce.

##### ▪ Bainit

Vzniká u litin legovaných zejména niklem a molybdenem jako lící struktura. Tyto litiny vykazují poměrně vysokou pevnost a při zachování dobrých plastických vlastností. [3; 6]

##### ▪ Martenzit

Jedná se o velmi tvrdou (až 1000 HV) a křehkou složku v matici, která vzniká bezdifúzním rozpadem austenitu při kalení nelegovaných nebo legovaných litin. U legovaných litin se může vyskytnout i v litém stavu.

##### ▪ Fosfidy

Objevují se v litině jako důsledek omezené rozpustnosti fosforu. Již při nízkých koncentracích (0,1 – 0,2 hm. % P) tvoří ternární eutektikum zvané stedait (Fe- $\text{Fe}_3\text{P}$ - $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Steadit má nízkou teplotu tání (okolo 953 °C), a proto se při tuhnutí koncentruje až v místech posledního tuhnutí.

Vylučuje se na hranicích zrn. Po ztuhnutí se jedná o tvrdé fáze, které snižují houževnatost litiny. Výskyt těchto fosfidů je u litin nežádoucí, zvláště pak u litin s kuličkovým grafitem.

- Sulfidy

Jedná se např. o sloučeniny MnS nebo FeS. Síra má omezenou rozpustnost a segreguje (podobně jako fosfidy) na hranicích zrn. Zde tvoří sulfidy s teplotou tuhnutí okolo 925 °C. Po ztuhnutí vzniká sulfidické síťoví, které významně snižuje houževnatost litin.

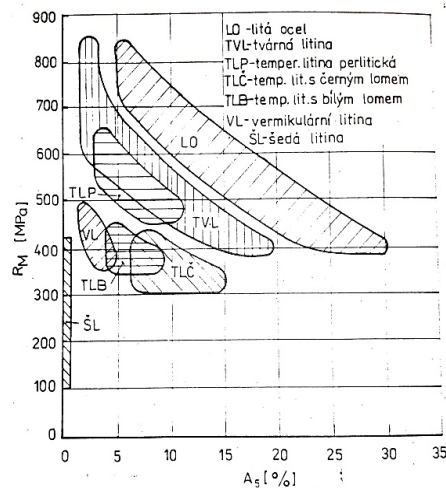
- Karbidy

Karbidy v litinách vznikají hlavně působením karbidotvorných prvků – zejména chromu. U nelegovaných litin přítomnost takových karbidů nežádoucí, jelikož se litina stává jen těžko obrobitelnou a vlivem tvrdých částic křehne. [3; 6]

## 2 LITINA S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Litina s kuličkovým grafitem, mezi slévači běžně označovaná jako tvárná litina, byla objevena zhruba v polovině minulého století. Jak uvádí literatura [10], 7. května 1948 oznámil H. Morrogh na kongresu AFS ve Philadelphii objev litiny se sferoidálním grafitem. Od této doby stál vedle litiny s lupínkovým grafitem nový druh litiny, který měl být konkurencí hlavně pro ocelové odlitky. Objevení litiny s kuličkovým grafitem (LKG) a její zavedení do výroby přineslo hlavně ekonomické výhody proti ocelovým odlitkům. V dnešní době je tvárná litina velmi významným strojírenským materiálem. Pro zajímavost, v České republice se za rok 2018 vyprodukovalo cca 55 000 tun LKG. [10; 11]

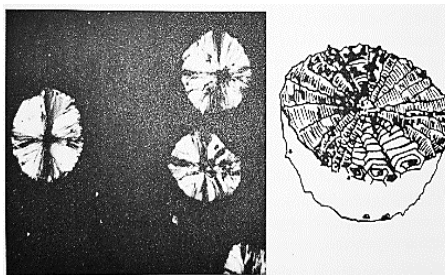
Na *obr. 14* jsou porovnány mechanické vlastnosti běžných litin a lité oceli. Je patrné, že LKG svým rozsahem pevnosti od cca 380 MPa po cca 850 MPa (u nelegovaných LKG) konkuruje litým ocelím. Z hlediska tažnosti má LKG dokonce větší rozsah než ocel, samozřejmě s ohledem na pevnost. LKG má o cca 8 % nižší měrnou hmotnost než ocel. Zároveň se odhaduje, že při rekonstrukci ocelového odlitku na odlitek z LKG může být úspora na hmotnosti 15 až 25 %. [12; 13; 14]



*Obr. 14* Porovnání mechanických vlastností nelegovaných druhů litin a oceli [14].

V této kapitole bude litina s kuličkovým grafitem blíže rozebrána, a to zejména z pohledu používaných tavacích agregátů a druhování kovové vsázky. Na konci kapitoly jsou shrnuty základní informace o očkování a modifikaci.

Litina s kuličkovým grafitem, ve zkratce LKG, je druh kovového materiálu, jehož obsah uhlíku se pohybuje blízko eutektickému složení. Klíčový rozdíl proti jiným druhům litiny je grafit ve tvaru kuliček, který je v matici v optimálním případě rovnoměrně rozložen. Kuličky grafitu v LKG nevyvolávají významný vrubový účinek, jako např. lupínky v LLG. Z tohoto důvodu se jedná o materiál, který dokáže být poměrně houževnatý. Tažnost LKG může přesahovat až 20 %, což např. u LLG není možné. Níže na *obr. 15* je zrno grafitu ve tvárné litině. [14]



*Obr. 15* Zrna grafitu v LKG (vlevo: nelepáné, vpravo: strukturní model) [2].

## 2.1 Výroba litiny s kuličkovým grafitem

Výroba litiny s lupínkovým grafitem je metalurgicky jednodušší, protože grafit zůstává v litém stavu ve formě lupínků. Výroba LKG má své výrobní požadavky a výsledkem je kuličkový grafit. Na začátku výroby LKG je důležitá již kovová vsázka. Jsou kladeny vyšší nároky na jakost vsázky pro LKG než pro LLG. Detaily budou vysvětleny níže. Operací navíc proti LLG je modifikace kovu, při které dochází právě k modifikaci grafitu z lupínků na kuličky. Na modifikaci navazuje očkování litiny. Při tomto procesu jsou do kovu uměle vnášeny grafitizační zárodky. Následuje odlévání odlitku. Každá část výroby má svá specifika. Níže je jsou části výrobního postupu podrobněji rozebrány. [2]

### 2.1.1 Vsázkové suroviny pro LKG

Výběr vsázkových surovin pro výrobu LKG je ovlivněn:

- požadavkem na výslednou jakost litiny,
- použitým tavicím agregátem,
- způsobem modifikace (technologie, druh modifikátoru),
- využitím tekutého kovu (na základě využití tekutého kovu se počítá podíl vratného materiálu ve vsázce),
- cenou všech surovin vstupujících do výroby kovu.

Mezi hlavní složky kovové vsázky patří:

- surové železo (SŽ),
- ocelový odpad (OC),
- vratný materiál (VR),
- třísky.

Surové železo je nejkvalitnější, ale zároveň také nejdražší surovinou v kovové vsázce. Zpravidla se do sléváren dodává ve formě housek, hmotnost jedné housky se pohybuje okolo 15-25 kg. Ocelový odpad může být dodáván ve formě plechů, odstřížků apod. ve slévárnách se často třídí podle obsahu manganu, protože mangan je perlitotvorný prvek a ovlivňuje tak výslednou vnitřní strukturu. Vratný materiál je velmi výhodnou složkou vsázky. Jednak je produkován samotnou slévárnou (odřezané nálitky, vtokové soustavy apod.), zároveň má známé chemické složení. Třísky se používají v malé míře, je vhodné, když jsou odmaštěny a pakety.

Při výběru jednotlivých složek vsázky musí být zohledněno výsledné chemické složení. Vedle toho je ale nutné kontrolovat i prvky, které by mohly bránit vzniku kuličkového grafitu. Takové prvky nazýváme antiglobalizační. Jsou to zejména Sb, Pb, Bi, Ti, O, S, a další. Už v řádu setin (i tisícín) % mohou tyto prvky negativně ovlivnit vznik kuličkového grafitu. Na opačné straně jsou prvky podporující vznik kuličkového grafitu. Nazýváme je globulitizační a jsou to zejména Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Ce. [3; 14]

## 2.2 Tavení a tavicí agregáty

Z hlediska tavicích agregátů se pro tavení litin běžně používají kelímkové elektrické indukční pece (EIP), elektrické obloukové pece (EOP), bubnové pece a kupolní pece (kuplovny). Jelikož se praktická část této práce zabývá výrobou LKG na indukční a obloukové pece, budou níže rozebrány pouze tyto dva agregáty. [3; 15]

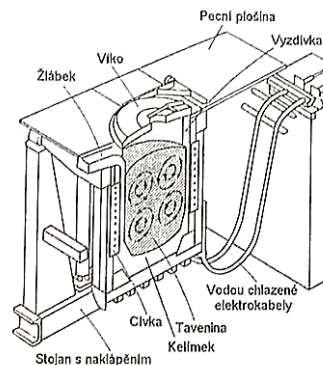
### 2.2.1 Kelímková elektrická indukční pec

Elektrické indukční pece jsou ve slévárnách využívány pro výrobu litiny čím dál častěji. Důvodem jsou zejména ekologické a ekonomické důvody. [3] Z hlediska ekologie produkují

EIP méně prachových částic. Zároveň se tyto částice relativně dobře zachycují, jelikož jsou víka pecí napojena na odsávání s filtrací. [16]

Z hlediska napájení mohou být pece středofrekvenční (120–1000 Hz) a na síťovou frekvenci (50 Hz). Vysokofrekvenční pícky jsou používány zejména v laboratořích. Z důvodu vyšší rychlosti tavení a možnosti úplného vyprázdnění kelímku se v provozech setkáváme častěji s pecemi středofrekvenčními. Objem kelímku EIP se v českých slévárnách běžně pohybuje v rozmezí 3–6 tun. [3; 17]

V EIP prochází elektrický proud cívkou, což tvoří silné magnetické pole. Působením magnetického pole vzniká napětí a následně elektrický proud v kovové vsázce. V kovu vzniká elektrický odpor produkující teplo, které taví kov. Na *obr. 16* níže je schéma EIP. Cívka uvnitř pece je měděná a chlazená vodou. Naklápění víka a celé pece je zajištěno hydraulickými rameny. [15; 16]



*Obr. 16* Schéma EIP [16].

Celá pec svým principem připomíná transformátor. Primárním vinutím je zde cívka napájená střídavým elektrickým proudem. Frekvence střídavého proudu je proměnná. Sekundární vinutí tvoří kovová vsázka v kelímku. Ta tvoří jeden závit vinutí na krátko. Ve vsázce se indukují vířivé proudy, které po roztavení kovu zajišťují míchání taveniny, jak je také vidět na *obr. 16*. Víření závisí na frekvenci střídavého proudu. Čím vyšší frekvence, tím nižší víření kovu. Víření je při výrobě kovu výhodné, jelikož dochází k promíchávání, a tedy k lepší homogenizaci. [3; 16]

Konstrukce středofrekvenční pece zahrnuje tyto části:

- transformátor,
- usměrňovač,
- vyhlazovací tlumivku,
- frekvenční měnič,
- kondenzátorovou baterii,
- těleso pece. [16]

Vsázka pro LKG na EIP by měla mít vyšší jakost. Surové železo by mělo mít co nejnižší podíl nečistot. Podíl síry by se měl pohybovat do 0,3 % a podíl fosforu do 0,08 %. Surové železo je zdrojem uhlíku ve vsázce. Jeho obsah v surovém železe může být až 4,5 %. Zároveň je ale nejdražší komponentou vsázky. Jelikož lze uhlík obsažený v surovém železe jednoduše nahradit pomocí nauhličovadel, bývá z ekonomického hlediska podíl surového železa ve vsázce pro EIP spíše nižší. Ocelový odpad se třídí podle chemického složení (dle podílu manganu – perlitotvorný prvek). Dále je využíván vratný materiál z LKG. Jedná se o vtokové soustavy, nálitky či neshodné odlitky z vlastní produkce slévárny. Chemickým složením je tedy LKG vrat vyhovující. Z hlediska kusovitosti vsázky může být používána kusová vsázka, plechy i třísky.



Není vhodné zavážet EIP rezavou vsázkou nebo špatně očištěným vratem. Následkem by pak bylo zbytečně velké množství strusky. [3]

Korekce uhlíku je prováděna komerčně dostupnými nauhličovadly. Pokud se použije přísada s vysokým obsahem síry, musí být kov dodatečně odsířen (přídavkem hořčíku). Korekce dalších prvků (např. Mn) je prováděna feroslitinami nebo čistými legurami (např. Cu, Sn). [17]

U EIP rozlišujeme 3 základní typy výdusek:

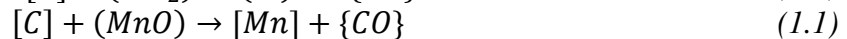
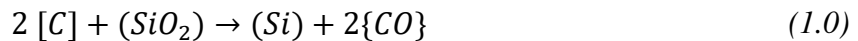
- kyselé – na bázi  $\text{SiO}_2$ ; při kontaktu s vodou tvoří kyseliny,
- zásadité (bazické) – na bázi  $\text{MgO}$  (>60 %), zbytek  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; při reakci s vodou vznikají hydroxidy,
- neutrální – tvořené hlavně  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (80-90 %), částečně  $\text{MgO}$  (10-20 %). [18]

Tavbu na EIP lze rozdělit na tyto části:

- zavážení kovu do pece,
- tavba (nejvyšší výkon pece),
- stažení strusky, odběr zkušební vzorku,
- dohotovení,
- odpich.

Tavba LKG na EOP trvá přibližně 60 minut (3 t pec).

Propaly prvků u EIP jsou spojeny s uhlíkovou reakcí. Ta probíhá podle rovnic (1.0), (1.1). Tímto způsobem se redukuje oxid křemičitý z vyzdívky i ze strusky:



Hodnota rovnovážné teploty (teploty uhlíkové reakce) se mění v závislosti na podílu uhlíku a křemíku v tavenině. Platí, že vyšší obsah uhlíku a nižší obsah křemíku rovnovážnou teplotu snižuje. Orientačně se však tato teplota pohybuje okolo 1450 °C. [15]

Při nižších teplotách, než je rovnovážná teplota, dochází v kovové lázni k oxidaci Si a Mn. Existují i další prvky s vyšší afinitou ke kyslíku. Podle vztahů 1.2 a 1.3 probíhá reakce křemíku a manganu se vzdušným kyslíkem nebo s kyslíkem z oxidů železa. [15]



Při teplotách kovové lázně pod teplotou uhlíkové reakce nedochází k propalu uhlíku. Při teplotách vyšších, než je teplota uhlíkové reakce, dochází k redukci oxidů křemíku, manganu a železa. Průběh redukce oxidu křemíku uhlíkem byl popsán ve vztahu (1.0).

Výsledkem reakcí probíhajících na EIP je vyšší propal uhlíku. U křemíku může docházet buď k nízkému propalu, nebo i přípalu. Hodnoty propalů základních prvků jsou při tavení v EIP obvykle nízké a lze je při výpočtu vsázky zanedbat. [3; 15]

Tavby vedené na EIP doprovází míchání taveniny. Při tomto procesu dochází k tzv. „fyzikálnímu čištění“ taveniny. Jemné suspenze přechází v hrubší částice, které následně vyplouvají na hladinu a jsou zachycovány ve strusce. Struska je u EIP tzv. „studená“ a má omezené metalurgické možnosti (např. snížení P, S,  $\text{H}_2$  či  $\text{N}_2$ ). Hlavní funkcí je tedy zachycování nečistot z kovové lázně. [3; 18]

Obsah plynů (zejména  $\text{N}_2$  a  $\text{H}_2$ ) v tavenině se během tavby mění. Okolo teplot 1460-1500 °C bývá v kovu nejvyšší koncentrace kyslíku. S koncentrací plynů v závislosti na teplotě souvisí vznik oxidických blan, struskových vměstků a plynových dutin. Ty jsou následně příčinou vad v odlitcích. Z hlediska vměstků pocházejících ze strusky se doporučuje udržovat vyšší lici

teploty. S tím ale souvisí vyšší namáhání vyzdívky i formy. Zároveň nad teplotami cca 1500 °C dochází k destrukci některých oxidických zárodků vhodných pro grafitizaci. Následkem toho je pak vyšší sklon k zákalce. Opatřením je zpravidla lepší očkování. [3]

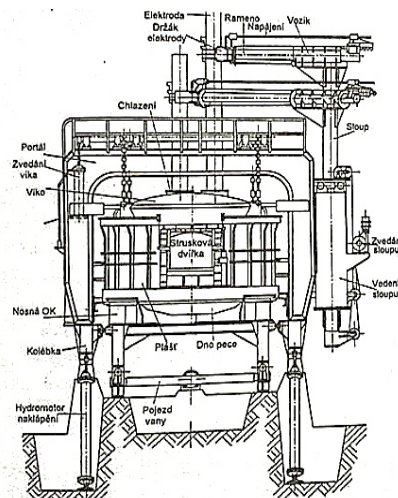
### 2.2.2 Elektrická oblouková pec

Výroba litiny na elektrické obloukové peci (EOP) není příliš obvyklá. S tímto způsobem výroby se setkáváme zejména ve slévárnách oceli, které postupně rozšířily svůj sortiment také o LKG. [3; 15]

Princip ohřevu v EOP spočívá v přenosu tepla obloukovým výbojem. Tento oblouk vzniká termoelektrickou emisí elektrod do vsázky. Během dotyku elektrody s kovovou vsázkou dochází vlivem silného protékajícího elektrického proudu k rozžhavení kovu. To je doprovázeno vysokou teplotou vznikajících plynů. Jejich teplota dosahuje 3000-4000 °C a umožňuje hoření oblouku i při oddálení elektrody. V praxi se používají pece s přímým obloukem, nevodivou nístějí a se třemi grafitovými elektrodami.

Podle způsobu otevírání pece se rozlišují 3 druhy EOP:

- pece s otočným víkem – víko se zvedá i s elektrodami, vozíky a portálem a natáčí se směrem k vylévacímu žlabu nebo ke struskovým dvířkům; sloupy se natáčejí ve vodorovné rovině,
- pece s pojízdným víkem – víko se zvedne spolu s vozíky a portálem, ale sloupy jezdí v podélné ose, pece s pojízdnou vanou – víko je i s elektrodami zdviženo portálem; vana pece vyjíždí zespod pece ven. Tento typ pece je na *obr. 17*. [16]



*Obr. 17* Schéma EOP s vyjížděcí vanou [16].

Držáky elektrod jsou vyrobeny z mědi a jedná se principiálně o sklíčidla, která jsou pomocí pružin tlačena na elektrody. V místech, kde elektrody prochází víkem, jsou chladiče elektrod. Držák elektrod je spojen s nosným ramenem a ten je spojen s vozíkem elektrody. Tyto části spolu zajišťují vertikální pohyb elektrod. Samotná vana a dno jsou svařeny z ocelového plechu a vyzděny žárovzdorným materiálem. Exponované části pece (víko, chladiče elektrod, strusková dvířka...) jsou chlazená vodou. [16]

Vyzdívka může být:

- kyselá (na bázi Al-Si),
- zásaditá (na bázi MgO).

Pro tavení litin je ve slévárnách v ČR využívána pouze zásaditá vyzdívka. [19]

Výroba LKG na EOP může mít tyto podoby [15]:

- **výroba LKG z ocelového odpadu s oxidačním údobím**

Vsázka je složena z ocelového odpadu, bez surového železa. Po natavení lze kov oxidovat stejným způsobem, jako při výrobě oceli. Lze odstranit část mikrolegujících prvků (Ti, V, Nb, Cr, B). Oxidaci kovů, kdy vznikají oxidy typu MeO, lze pospat rovnicí (1.4):

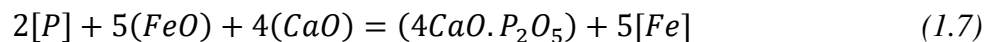


Oxidace jednotlivých prvků závisí na jejich afinitě ke kyslíku a na aktivitě kyslíku. V oxidačním údobí dochází k odplynění taveniny (N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>) při uhlíkovém varu. Ten je popsán vztahem (1.5). Podmínkou uhlíkového varu je dostatečná teplota. Kritická teplota je u litiny okolo 1450 °C. Přesnou hodnotu lze spočítat z rovnice 1.6, kde je popsána rovnováha mezi křemíkem a kyslíkem. Jelikož křemík má vyšší afinitu ke kyslíku, do dosažení kritické teploty je obsah kyslíku závislý na obsahu křemíku (popsáno již v rovnici 1.2 – reakce křemíku s kyslíkem). Po překročení kritické teploty začíná reakce mezi kyslíkem a uhlíkem (rovnice 1.5), tedy již zmíněný samovolný uhlíkový var [15; 19].



Ze vztahu (1.5) vyplývá, že se v tavenině při uhlíkovém varu tvoří bubliny CO. Do nich difundují plyny N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub> a dochází tak k odplynění taveniny. Aby došlo k dostatečné oxidaci mikrolegujících prvků, doporučuje se snížení obsahu uhlíku až na hodnoty pod 0,1 %C. [15]

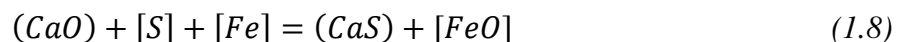
Při oxidaci lze také kov také odfosfořit. Fosfor v kovu je nežádoucí prvek (vznik steaditu, sklon k lasturovému lomu) a u LKG by měl být maximálně 0,08 %. Reakci odfosfoření popisuje rovnice 1.7:



Předpoklad reakce odfosfoření je snížení obsahu křemíku pod 0,05 % a použití zásadité strusky o nízké teplotě tavení. Lze dosáhnout snížení fosforu až na hodnotu 0,01 %.

Následně je potřeba kov nauhličit na požadovanou koncentraci uhlíku. Provádí se to dmýcháním prachových přísad (smolného koksu) do EOP. Nauhličení trvá několik minut. Po nauhličení se přidává požadované množství Si, popř. Mn, Cu a dalších legur.

V EOP je snadné snížit obsah síry v tavenině. Uhlík a křemík totiž zvyšují aktivitu síry, což vede ke zlepšení podmínek pro odsíření. Po nauhličení se stáhne zbytek koksu z hladiny. Na hladinu se nasadí odsířovací struska (dříve se v praxi dělala z vápna a kazivce v poměru 2:1). Množství se volí s ohledem na hmotnost tavby mezi 2 a 4 %. Struska musí být dobře tekutá a teplota se pohybuje na horní hranici odpichové teploty. Odsíření popisuje (podle molekulární teorie strusek) rovnice 1.8:



V dnešní době se tento způsob výroby LKG z ekonomického hlediska spíše nevyužívá. Snížení uhlíku pod hodnoty okolo 0,1 % C a následné nauhličování vede k vyšší spotřebě nauhličovačů. Zároveň se prodlužuje doba tavby, což vede k vyšší spotřebě elektrické energie. Výhodou této technologie je však výroba tvárné litiny s nízkým obsahem síry, fosforu, manganu, chromu a stopových prvků s vyšší afinitou ke kyslíku než železo. Příkladem využití uvedeného způsobu výroby LKG může být produkce odlitků pro energetický průmysl, kde bývají požadavky na nízké koncentrace některých prvků. [15; 19]

- výroba LKG z vratného materiálu s podílem surového železa a omezeným oxidačním údobím

Vsázka je sestavena tak, aby koncentrace uhlíku po roztavení odpovídala požadované koncentraci. Po roztavení kovu je dmýchán kyslík. Následně probíhá oxidická reakce s křemíkem a manganem. Oxidace křemíku slouží jako chemický ohřev a snižuje tak spotřebu elektrické energie. Při oxidaci 0,5 % Si se lázeň ohřeje o cca 150 °C, zároveň je možné snížit mangan až pod 0,2 %. Oxidace uhlíku nepřekročí 0,1 %. Během tohoto způsobu výroby lze zpracovat velké množství vratného materiálu s vysokým obsahem křemíku. Obsah manganu pod 0,2 % zároveň dovoluje výrobu feritické litiny. V případě, že je potřeba vyrobit litinu s perlitickou strukturou, leguje se litina cínem nebo mědí. V případě pokračování oxidace a snížení křemíku pod 0,05 % lze kov i odfosfořit, stejně jako to bylo popsáno v rovnici 1.8. Touto cestou lze také oxidovat chrom.

Po oxidaci křemíku je potřeba dobře stáhnout strusku a nasadit novou, zásaditou strusku z vápna a vhodného tavidla. Po oxidaci fosforu se opět důkladně stahuje struska. Je nutné, aby odfosfoření probíhalo za co nejnižších teplot.

Díky snížení koncentrace fosforu a manganu v kovu lze touto cestou vyrábět značky s předpisem na nárazovou práci při nízkých teplotách. [15]

### 2.2.3 Modifikace litin

Modifikace je důležitým technologickým krokem při výrobě LKG. Při této operaci totiž dochází k vyloučení grafitu právě ve formě kuliček. Zvýšení povrchového napětí na rozhraní grafit – tavenina vede ke krystalizaci grafitu s nejmenším povrchem, což je koule. V praxi se pro modifikaci (zvýšení povrchového napětí) používají modifikátory na bázi hořčíku. Pro dosažení kuličkového tvaru je nutné, aby se v tavenině rozpustilo minimálně 0,025 – 0,030 % Mg. Modifikační prostředky obsahují mimo hořčík také prvky jako Ca nebo KVZ. V modifikátorech jsou tyto prvky obsaženy v nižších koncentracích a potlačují účinky deglobulizačních prvků (Sb, Pb, Bi, Zn). [3; 15; 19]

Hořčík je kov, jehož měrná hmotnost je relativně nízká (1740 kg/m<sup>3</sup>). Při atmosférickém tlaku a teplotě cca 1107 °C dochází k vypařování hořčíku. Fyzikální vlastnosti hořčíku jsou shrnuty v tab. 8.

Tab. 8 Fyzikální vlastnosti hořčíku [3].

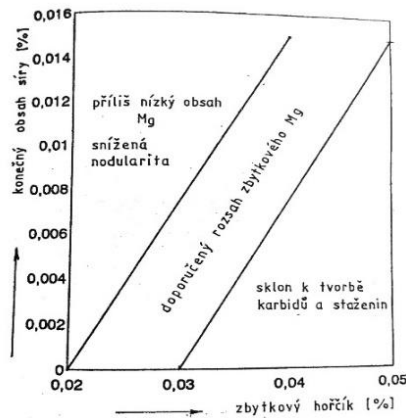
hustota	1740 kg/m <sup>3</sup>
teplota tavení	650 °C
teplota vypařování	1107 °C

Zároveň má hořčík vysokou afinitu k síře a kyslíku. Proto spolu snadno reagují. S těmito aspekty je tedy nutné při modifikaci počítat. Reakce je bouřlivá a je doprovázena také světelným efektem. Zároveň dochází k reakcím hořčíku s kyslíkem a sírou. Průběhy reakcí popisují rovnice 1.9 a 2.0.



Je tedy zřejmé, že grafit je modifikován do tvaru kuliček až tzv. zbytkovým hořčíkem (po proběhnutí reakcí 1.9 a 2.0). Z toho důvodu je nutné znát obsah síry před modifikací, aby

mohlo být odhadnuto, kolik hořčíku bude spotřebováno na odsíření taveniny. Jak je vidět na *obr. 18*, vysoký podíl zbytkového hořčíku by mohl vést ke tvorbě karbidů a staženin. Zároveň má litina větší sklon k bílému tuhnutí, hořčík totiž podporuje metastabilnímu tuhnutí. Naopak nízký podíl hořčíku vede k nedokonalé modifikaci. [15; 17]

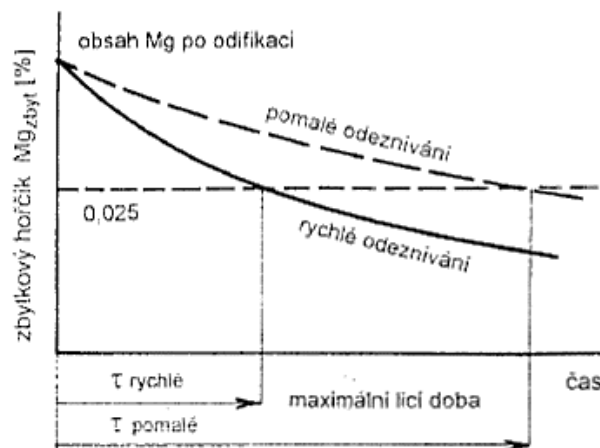


*Obr. 18* Doporučený rozsah zbytkového hořčíku v závislosti na obsahu síry [17].

Průběh modifikace je tedy nutné nastavit tak, aby docházelo k postupnému rozpouštění hořčíkových par, které prostupují taveninou ve formě bublin od spodu pánve na hladinu. Proto bývá modifikátor umisťován na dně pánve. [3]

Ztráty hořčíku během modifikace jsou způsobeny reakcemi s kyslíkem a sírou, ale také s  $\text{SiO}_2$  z vyzdívky – vznikají křemičitany hořečnaté. Důsledkem uvedených reakcí hořčíku s kyslíkem a sírou je odeznívání modifikačního účinku vymezuje čas, po který je kov dostatečně modifikován.

Doba odeznívání je také ovlivňována teplotou kovu, velikostí pánve a zacházením s kovem (přelévání kovu versus klidná hladina). Závislost doby odeznívání na klesajícím zbytkovém hořčíku je na *obr. 19*:

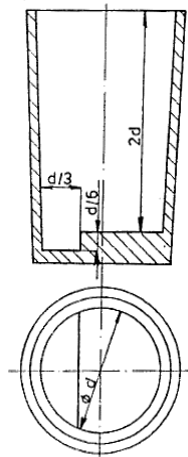


*Obr. 19* Doba odeznívání očkovacího účinku [3].

Mezi nejběžnější metody modifikace patří:

- metoda SANDWICH

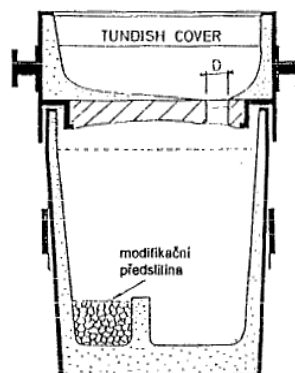
Při této metodě je využívána buď speciální pánev s komůrkou pro modifikátor, nebo klasická pánev. Modifikátor umístěný na dně pánve se následně překryje ocelovými odstřížky. Jedná se o jednoduchý a ekonomicky výhodný způsob modifikace. I přes nízké využití Mg (cca 40-50 %) je ve slévárnách tato metoda často využívána. Schéma pánve pro metodu SANDWICH je na obr. 20. [3]



Obr. 20 Schéma pánve pro metodu SANDWICH [3].

- metoda TUNDISCH (TUNDISCH COVER)

Jedná se o speciálně upravenou pánev s víkem, přičemž v pánvi je stejně jako u metody SANDWICH komůrka pro předslitinu. Víko je ve tvaru velké licí jamky a obsahuje úzký otvor ( $\text{ØD} \approx 100 \text{ mm}$ ), který je umístěn asymetricky vůči komůrce s předslitinou. Při vylévání kovu z pece putuje kov přes víko do pánve. Díky víku s malým otvorem je regulováno množství vzduchu (kyslíku) v pánvi, a dochází tedy k menší reoxidaci kovu. Zároveň víko brání rozstříku kovu a snižují se teplotní ztráty. Díky asymetrickému postavení otvoru ve víku a komůrky s předslitinou se oddaluje modifikační reakce (kov nepůsobí na modifikátor přímo, ale se zpožděním), a tak se prodlužuje modifikační účinek. Nízké investiční náklady metody a využití Mg mezi 60-70 % jsou hlavními důvody, proč se v současné době jedná o často využívanou metodu. Schéma pánve pro metodu TUNDISCH je na obr. 21. [3]



Obr. 21 Schéma pánve pro metodu TUNDISCH [3].

Mezi další používané metody patří modifikace:

- ponorným zvonem,
- v konvertoru Georg Fisher,
- ve sferokávu,
- plněným profilem,
- INMOULD,
- FLOTRET...

Zmíněné metody nebudou v práci dále rozebírány. Blíže se jim věnují autoři v odborných literaturách a článcích [3] a [20]. [3; 20]

#### 2.2.4 Grafitizační očkování litin

Očkování litin se provádí před odléváním. Při očkování je do kovu vnášen prostředek, který podporuje vznik heterogenních zárodků vhodných pro krystalizaci grafitu. Zpravidla se jedná o prostředky na bázi křemíku (ferosilicia) a dalších přísadových prvků (Ca, Al, Bi, Sb, KVZ...). Přísadové prvky mají za úkol buď podporovat účinek FeSi, nebo prodlužovat účinek očkování. Hlavními důvody grafitizačního očkování jsou [3; 15; 17]:

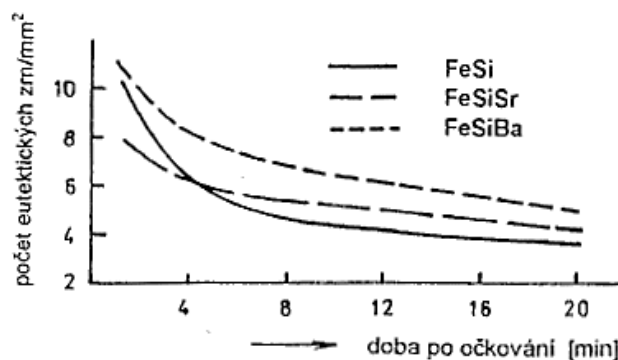
- potlačení sklonu k metastabilnímu tuhnutí ve všech částech odlitku (rozdílná tloušťka stěn),
- zrovnoměnění vlastností litiny v různých částech odlitku na základě rovnoměrně vyloučeného grafitu,
- zjemnění struktury, a tím zlepšení mechanických vlastností (zvýšení tažnosti, zrovnoměnění tvrdosti – zlepšení obrobitelnosti).

Očkování je o to důležitější, čím nepříznivější jsou podmínky pro grafitizaci:

- v tenkých stěnách odlitku,
- při rychlém ochlazení,
- při nepříznivém chemickém složení (nízký obsah grafitizačních a vysoký obsah karbidotvorných prvků).

Očkování je významné hlavně po modifikaci LKG. Při výrobě LKG se vyžaduje co nejvyšší množství krystalizačních zárodků v kovu. Při modifikaci LKG, kdy probíhají reakce hořčíku s kyslíkem a sírou, vzniká malé množství velkých vměstků. LKG, které by nebyly očkovány, by v důsledku sulfidických a oxidických vměstků vykazovaly hrubozrnnou strukturu a sklon k metastabilnímu tuhnutí. Proto je očkování u LKG důležitou součástí výrobního postupu. V praxi se někdy využívá dokonce víceúrovňového očkování pro zajištění optimálních podmínek grafitizace. [3; 15; 17]

Očkovadlo má podobně jako modifikátor odeznívající účinek (viz. obr. 22). Doba, po kterou má očkovadlo grafitizační schopnost, dosahuje cca 10-15 minut. Proto se kov očkuje až těsně



Obr. 22 Odeznívání očkovacího účinku [3].

před odléváním. Existují prvky, které zpomalují odeznívání očkovacího účinku a dokážou prodloužit dobu do odlití až na 20 minut. Takovými prvky jsou zejména Ba a Sr.

Na základě chemického složení rozlišujeme tyto druhy očkovaadel:

- očkovaadla na bázi křemíku,
- očkovaadla na bázi uhlíku,
- karbid křemíku.

Příkladem z praxe může být např. očkovaadlo SB 5. V *tab. 9* je uvedeno jeho přibližné chemické složení. Jak z tabulky vyplývá, jedná se o očkovaadlo na bázi křemíku a obsahuje baryum pro prodloužení očkovacího účinku.

*Tab. 9* Přibližné chemické složení očkovaadla SB 5.

očkovaadlo	Si [%]	Al [%]	Ca [%]	Ba [%]
SB 5	~70	~1	~1	~2,5

Z hlediska aplikace očkovaadla do kovu rozlišujeme tyto způsoby očkování:

- očkování v pánvi

Očkovací prostředek o kusovitosti 2-4 mm je nasypán do pánve před nalitím kovu. Nedoporučuje se sypat očkovaadlo do prázdné pánve, nýbrž do zbytku tekutého kovu na dně pánve. Zabráni se tak nalepení očkovaadla na dno pánve. Naopak očkování na hladinu je neefektivní a nevhodné. Nedojde totiž k homogenizaci lázně a očkování má jen velmi malý účinek. Dávkování u LKG se volí v rozmezí 0,7 – 1,2 % (i více).

- očkování do proudu kovu

Při této metodě se očkovaadlo o zrnitosti okolo 1 mm kontinuálně dávkováno buď přímo do proudu kovu, nebo do mezipánve. Tento proces bývá automatizován.

- očkování plněným profilem

Tato metoda využívá tenkostěnného profilu o průměru 9-13 mm, který je naplněn očkovaadlem. Drát s očkovaadlem je navinutý na bubnu a pomocí podavače je kontinuálně posouván směrem do taveniny. dávkování u LKG je do 0,2 %. [3]

- očkování očkovacími tělísky

Jedná se o speciální tělísky obsahující očkovaadlo. Vkládají se přímo do licí jamky, na dno vtokového kůlu či k filtrům. Dávkování u LKG je přibližně do 0,3 %. Blíže je tento způsob grafitizačního očkování rozebrán v literatuře [3; 21]



### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce se zabývá technologií výroby litiny s kuličkovým grafitem (LKG) na různých tavících agregátech. V práci byla navržena a ověřena výroba LKG na indukční peci. Následně byla výrobní technologie navržena a ověřena na elektrické obloukové peci. Hlavním cílem experimentu byl návrh nového výrobního postupu tak, aby byly sníženy výrobní náklady na kovovou vsázku při zachování požadovaných mechanických a slévárenských vlastností pro vybranou jakost litiny s kuličkovým grafitem. Zároveň by měla být zachována vnitřní jakost odlitků. Výsledkem práce je dále ekonomické zhodnocení jednotlivých výrobních postupů.

V současné době dochází na trhu k velmi vysokému nárůstu cen (mj.) u vstupních materiálů (kovové vsázky, legujících prvků) a energií. Samozřejmě dochází i ke zvýšeným výdajům na mzdy. Zákazníci zároveň vyžadují co nejnižší konečné ceny, velmi neradi akceptují jakékoli zdražení, a proto musí slévárny hledat úspory ve výrobním procesu – snížit náklady na výrobu efektivnějším výrobním procesem či snížit podíl neshodné výroby.

Diplomová práce vznikla ve spolupráci se slévárnou Ernst Leopold, s.r.o. sídlící v Blansku (dále EL). Je to slévárna s dlouhou tradicí, jejíž počátky sahají až do roku 1698. Mezi vyráběný sortiment patří ocel na odlitky a litina s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Slévárna EL disponuje dvěma elektrickými obloukovými pecemi o hmotnosti 6 t a dvěma studenovětrnými kupolními pecemi o kapacitě 12 t/hod. Odlitky z oceli a litiny s lupínkovým grafitem mohou dosahovat hmotnosti až 12 t. V případě litiny s kuličkovým grafitem je hmotnost odlitků omezena na 10 tun. Formy jsou vyráběny buď v ruční formovně, kde se používá samotuhnoucí směs pojená furanovou pryskyřicí, nebo na strojní formovně, kde se používá bentonitová formovací směs. Modelová zařízení jsou buď dřevěná nebo polystyrenová. Firma se specializuje zejména na odlitky pro automobilový průmysl, energetiku, či výrobní stroje a další. V experimentální části práce byly navrženy tavby s odlišným druhováním. Byly tak ověřeny možné cesty výroby litiny s kuličkovým grafitem. Cílem bylo snížit podíl surového železa, které je ve vsázce tou nejdražší složkou. Jednotlivé tavby byly následně metalograficky a mechanicky zhodnoceny (tahová zkouška a zkouška rázem v ohybu). Jeden z návrhů byl následně převeden do provozu slévárny Ernst Leopold, kde byla litina s kuličkovým grafitem tavena v elektrické obloukové peci. Z této tavby byly rovněž zhotoveny mechanické zkoušky a metalografické výbrusy. Na základě těchto pokusů pak byla stanovena ekonomická bilance při výrobě vybrané litiny s kuličkovým grafitem na elektrických pecích. [22]

#### 3.1 Volba materiálu

Na základě největšího objemu výroby ve slévárně EL byla pro vlastní diplomovou práci vybrána značka litiny EN GJS-400-15(18)-RT. Bylo stanoveno, že stěžejní je u této značky dodržet tažnost minimálně 15 %. Proto budou níže v práci porovnávány výsledky s litinou jakosti GJS 400-15(18)-RT. Odhadovaný roční objem výroby LKG ve firmě EL přesahuje 1500 t, přičemž litina vybrané značky tvoří přibližně polovinu výroby. Proto hraje vybraná litina důležitou roli ve výrobních nákladech slévárny.

Mechanické vlastnosti podle normy ČSN EN 1563 zvolené litiny jsou uvedeny v *tab. 10*. Jak z této tabulky vyplývá, jedná se o litinu s mezí pevnosti v tahu minimálně 400 MPa. Smluvní mez kluzu se pohybuje okolo 250 MPa a tažnost dosahuje minimálně 15 %.

*Tab. 10* Mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-400-15-RT dle ČSN EN 1563 [15].

označení litiny	pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	tažnost A [%]
EN-GJS-400-15-RT	min. 400	min. 250	min. 15

V *tab. 11* je uvedeno požadované chemické složení vybrané značky litiny. Jedná se o rozmezí koncentrací vymezené vnitřním předpisem slévárny EL.

*Tab. 11* Požadované chemické složení pro EN-GJS-400-15(18)-RT.

požadované chemické složení EN-GJS-400-15(18)-RT						
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mg [%]
3,50-3,70	2,40-2,60	max. 0,20	max. 0,1	max. 0,01	max. 0,1	0,025-0,050

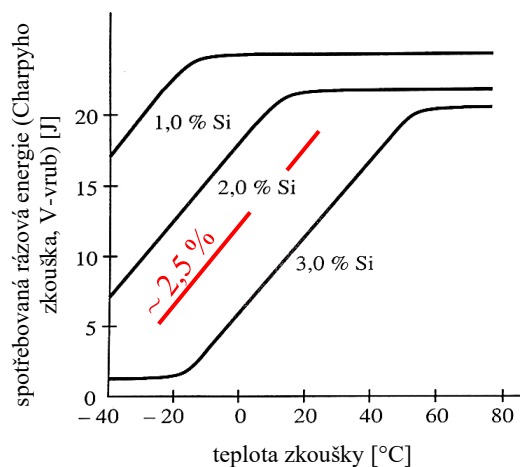
Uhlíkový ekvivalent  $C_E$  vyráběné litiny se pohybuje v rozmezí 4,3 - 4,6. To jsou podle *tab. 12* mírně vyšší hodnoty pro feritickou strukturu při tloušťce stěny 25 a 50 mm. V této tabulce je uvedena doporučená koncentrace uhlíku a křemíku pro vybrané tloušťky stěn. Tomu odpovídají hodnoty uhlíkových ekvivalentů.

*Tab. 12* Doporučené složení LKG podle struktury a tloušťky stěn [3].

matrice v litém stavu						
tloušťka stěny [mm]	převážně perlitická			převážně feritická		
	C [%]	Si [%]	$C_E$	C [%]	Si [%]	$C_E$
6	3,85	2,65	4,70	3,85	2,85	4,80
12	3,70	2,45	4,50	3,70	2,60	4,55
25	3,60	2,35	4,40	3,55	2,50	4,40
50	3,45	2,20	4,20	3,40	2,35	4,20
75	3,40	2,20	4,15	3,35	2,35	4,15

Koncentrace uhlíku by se měla podle předpisu z *tab. 11* pohybovat rozmezí 3,50 – 3,70 %. Uvedené vyšší množství uhlíku by mělo potlačit vlivem grafické expanze výskyt vad, které vznikají při tuhnutí (řediny, mikrořediny).

Křemík je ve vybrané litině udržován v rozmezí 2,40-2,60 %. Na *obr. 23* je zobrazen vliv křemíku na velikost nárazové práce v joulech. Je patrné, že obsah křemíku v kovu poměrně



*Obr. 23* Rázová energie při různých teplotách LKG a různým obsahem Si [2].

zásadně ovlivňuje velikost nárazové práce při změně teploty při zkoušce. S klesající teplotou klesá hodnota nárazové práce.

S klesajícím podílem křemíku se také snižuje tranzitní teplota kovu. Z toho vyplývá, že při nižších teplotách při nižším obsahu křemíku roste nárazová práce. Při zvoleném obsahu Si (~ 2,5 %) lze dle grafu na *obr. 23* očekávat tranzitní teplotu okolo 0 °C. [2]

Podíl manganu by měl být ve vybrané litině udržen pod hodnotou 0,2 %. Mangan je perlitotvorný prvek. Při překročení této koncentrace by se v matrici mohlo vyloučit více perlitu. To je pro zvolený typ litiny nevhodné. Jak uvádí *tab. 10* na *str. 33*, požadavek na tažnost je minimálně 15 %, což odpovídá převážně feritické struktuře. [3; 15]

Obsah fosforu by neměl překročit hranici 0,1 %. Vyšší podíl vede k tvorbě tzv. fosfidického síťové – stedaitu. Důsledkem by pak mohla být snížená tažnost, nižší výsledná hodnota nárazové práce a také horší svařitelnost litiny. [3; 23]

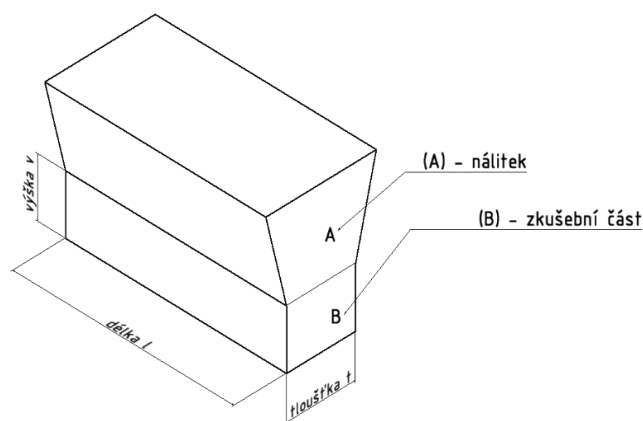
Obsah síry v kovu by se měl před modifikací pohybovat okolo 0,015-0,03 %. Podle literatury [13] se při hodnotách síry 0,01-0,02 % (před modifikací) dosahuje maximální pevnosti v tahu i meze kluzu. Zároveň je v litině největší počet grafitických nodulí. Po modifikaci by měl být obsah síry maximálně 0,01 %. Při vyšším obsahu síry může docházet k nedokonalé modifikaci kuliček grafitu, a to i v případě dostatečného množství hořčíku (0,030 % a více). Na druhé straně by ale neměl být obsah síry před modifikací extrémně nízký. Hořčík, který je hlavním prvkem modifikace, má vysokou afinitu k síře a kyslíku. Síra a kyslík tvoří v tavenině sulfidické vměstky, které jsou následně vhodnými heterogenními zárodky pro nukleaci kuličkového grafitu. [13; 15; 23]

Obsah chromu by neměl překročit koncentraci 0,1 % z důvodu tvorby karbidů v mezibuněčných prostorech a sklonu k perlitotvorné struktuře. To by vedlo ke snížení tažnosti a zhoršení obrobitelnosti. [15]

Jak uvádí literatura [2], odlitky vyrobené z materiálu EN-GJS-400-15(18)RT mohou mít tloušťky stěny od 5 do 100 mm a často bývají dynamicky namáhány. Příklady konkrétních odlitků jsou např. součásti těžební techniky, armatury či razníky nebo části zemědělských strojů. [2]

### 3.2 Volba forem pro zkušební odlitky

Jako zkušební odlitky byly pro vlastní diplomovou práci zvoleny tzv. Y – bloky (též zvané kýlové bloky). Jedná se o samostatně odlévaná zkušební tělesa. Schéma Y – bloku je na *obr. 24*. Pro účely diplomové práce byly zvoleny Y – bloky reprezentující tloušťky stěn



Obr. 24 Schéma Y-bloku.

skutečných odlitků, tj. 25 a 50 mm. V provozních podmínkách slévárny Ernst Leopold byly zvoleny pouze bloky tloušťky 50 mm.

V *tab. 13* jsou uvedeny rozměry zkušební části B. Z této části byla po odlití zhotovena zkušební tělesa pro určení mechanických vlastností a vnitřní strukturu kovu.

*Tab. 13* Rozměry zkušebních částí zvolených Y – bloků.

typ bloku	tloušťka t [mm]	délka l [mm]	výška v [mm]
Y – blok 25	25	215	40
Y – blok 50	50	165	50

Formy byly zhotoveny ve školní slévárně VUT v Brně. Jako ostřívo formovací směsi byl použitý křemičitý písek Bukowno BK27. Bylo použito pojivo a tvrdidlo GEOPOL® (Sand Team). Příprava směsi byla provedena na průběžném mísiči. V *tab. 14* jsou jednotlivé komponenty použité formovací směsi shrnuty.

*Tab. 14* Formovací směs [23].

složka	označení	poznámka	dávkování
ostřívo	křemenný písek BK 27	střední velikost zrna $d_{50}=0,27$ mm	
tvrdidlo	GEOPOL® SA	pro samotvrdnoucí směsi, střední reaktivita	14–18 % hm.
pojivo	GEOPOL® 618	pojivo pro samovolné vytvrzování	1,4-2,0 % hm.

Modely bloků o tloušťce  $t = 25$  mm byly uloženy do rámu po dvou kusech. U bloku tloušťky 50 mm bylo zvoleno uložení do samostatného rámu. Zhotovené formy byly opatřeny zirkonovým nátěrem.

### 3.3 Druhování vsázek zkušebních taveb

Navržený experiment byl prováděn v podmínkách školní slévárny VUT v Brně. Byly provedeny čtyři tavby na elektrické indukční peci (EIP) pro ověření vhodného technologického postupu. Tavby byly označeny čísla 676, 679, 710 a 711. V tavných byl postupně snižován podíl surového železa. Na základě výsledků z taveb na EIP byla provedena zkušební tavba i v provozních podmínkách slévárny EL, která byla provedena na elektrické obloukové peci (EOP).

V *tab. 15* jsou uvedeny základní suroviny včetně jejich přibližného chemického složení. Tyto suroviny tvořily základní kovovou vsázku. Jak je z tabulky patrné, největší přínos uhlíku do taveniny mělo zejména surové železo. Při snižování podílu surového železa ve vsázce bude nutné chybějící uhlík do kovu dodat pomocí nauhličovadel. Lze si také všimnout, že pro vybranou značku litiny s převážně feritickou strukturou (GJS-400-15(18)-RT) je obsah manganu udržován pod hodnotou 0,2 %. U oceli je proto potřeba při přejímce přivezeného materiálu do slévárny kontrolovat množství manganu v ocelovém odpadu. Podíl manganu má v nelegované oceli velkou variabilitu a není výjimkou dodávka oceli s obsahem Mn okolo 0,8-1,3 % (i vyšším). V takovém případě je nutné ocel s vyšším podílem Mn separovat.

*Tab. 15* Orientační chemické složení vybraných vsázkových surovin.

chemické složení						
materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]
surové železo	~ 4,4	~ 0,4	~ 0,2	max. ~ 0,3	~ 0,050	max. ~ 0,030
ocelový odpad	~ 0,1	~ 0,2	~ 0,2	~ 0,001	~ 0,01	~ 0,1
vratný materiál	3,50-3,70	2,40-2,60	0,10-0,20	~ 0,001	~ 0,10	max. 0,1

Jelikož může dojít k odchylkám chemického složení mezi jednotlivými dodávkami (každá šarže má pak vlastní atestový list), jsou hodnoty uvedené v *tab. 15* spíše orientační. Materiál dodávaný do slévárny EL obecně vykazuje dlouhodobě stabilní chemické složení a zatím nejsou ze strany EL evidovány výrazné odchylky od stanovených hodnot.

V rámci vlastní diplomové práce byl vytvořen program v MS Excel, který sloužil pro zjednodušení a kontrolu výpočtů při druhování jednotlivých vsázek. Výpočet v programu je proveden tak, že je uživatelem programu zvolena skladba kovové vsázky – zde je možné volit surové železo, ocel, vratný materiál a případně další složky vsázky. Pro každý tento materiál jsou definované koncentrace chemického složení. Na základě sestaveného složení zvolené vsázky a chemického složení jsou stanoveny koncentrace prvků, které vzniknou smíšením jednotlivých složek. Dále jsou v programu vypočteny hodnoty množství legujících prvků a feroslitin tak, aby výsledné chemické složení kovu po dolegování odpovídalo požadavkům z předpisu. Na základě korekcí během taveb byl program podle potřeb upravován. Jednalo se o korekce např. využití modifikátoru, očkovadla nebo nauhličovadla podle výsledků z provedených taveb.

Na obr. 25 je snímek obrazovky z programu.

**Výpočet vsázky pro EN-GJS40-18LT-y3**

**Zadejte hmotnost tavby:** 60 kg

**Vypínt:**

vsázka	podíl ve vsázce [%]	%C	%Si	%Mn	%S	%P		
surové železo	30	4,4	0,4	0,13	0,022	0,05		
ocel	30	0,1	0,2	0,01	0,01	0,01	Próbat:	%
vrat (= požadované chemické složení)	40	3,6	2,5	0,2	0,001	0,03	C	0,4
další vsázka1	0							
další vsázka2	0							
celkom (musí dát 100%!!!)	100							

modifikátor	FeSiMg		%C	%Si	%Mn	%S	%P	hmotnost v kovu [kg]	vsázka [%]	účinnost
očkovač	0,6		46	6,5				1,030	0,47402517	0,55
			69					0,6	0,69	0,6
úprava chemie	Desulco		99							0,8
	FeSi									0,8
	FeMn80				80					0,8

Požadované chemické složení	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg - zbytkový
	3,6	2,5	0,2	0,03	0,001	0,03

Obsahy prvků ze vsázky	[%]	Obsahy prvků před odpichem	[%]
%C	2,79	%C	4,00
%Si	1,18	%Si	1,34
%Mn	0,179	%Mn	0,20
%S	0,01	%S	0,001
%P	0,03	%P	0,03
		%Mg zbytk.	0,03

Nauhčení:	1,515 kg na 100kg kovu
Modifikátoru:	1,030 kg na 100kg kovu
Očkovač:	1,000 kg na 100kg kovu
Dodání manganu	0,026 kg na 100kg kovu

celková hmotnost tavby:	60 kg
surové železo	18 kg
ocel	18 kg
vrat	24 kg
Nauhčení:	0,9075 kg
Modifikátoru:	0,618 kg
Očkovač:	0,6 kg
Dodání manganu	0,01575 kg
<b>součet:</b>	<b>62,14154371 kg</b>

zde je požadované chemické složení kovu	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Mg - zbytkový
	3,6	2,5	0,2	0,03	0,001	0,03

Obr. 25 Program pro výpočty při druhování vsázky (MS Excel).

Druhování vsázek pro tavby provedené na VUT v Brně jsou uvedené v *tab. 16*.

*Tab. 16* Druhování vsázky u jednotlivých taveb.

materiál	tavba č. 676 hmotnost: 60 kg	tavba č. 679 hmotnost: 60 kg	tavba č. 710 hmotnost: 130 kg	tavba č. 711 hmotnost: 130 kg
<b>základní kovová vsázka</b>				
surové železo [%]	55	30	0	0
ocelový odpad [%]	5	30	60	60
vratný materiál [%]	40	40	30	30
špony/litinové třísky (LKG) [%]	1	1	10	10
<b>legury/přísady</b>				
SiC [%]	0,3	0,3	0,3	0,3
Si – mleté [%]	0,2	0,2	0,2	0,2
Fe – Si [%]	0,15	0,15	0,15	0,15
nauhličovadlo [%]	0	1,5	~3	~3
<b>očkování, modifikace</b>				
očkovač SB 5 [%]	1	1	0,7	0,7
modifikátor VL 63 [%]	1,1	1	1,3	1,3
<b>úprava chemie [kg]</b>				
nauhličovadlo [kg]	0,06	0,1	0,35	0,4
FeSi75 [kg]	0,04	0,36	0,24	0,18
FeMn [kg]	0,05	0,15	-	-

Tavba 676 byla navržena na základě druhotného používaného ve slévárně Ernst Leopold na EOP. Jedná se o průměrné hodnoty získané statistickým sběrem dat z celkem dvanácti taveb z období října a listopadu 2021. Jak je patrné, slévárna dosud pracovala s ~55% podílem surového železa a pouze ~5% podílem ocelového odpadu ve vsázce.

V tavně 679 byl podíl surového železa snížen na ~30 %. Cílem bylo ověřit, zda dochází při změně podílu surového železa ve vsázce ke změně jakosti u prověřované značky litiny. Vedlo to ke zvýšení podílu oceli z původních ~5 % na ~30 %. Chybějící uhlík byl dodán nauhličovadlem (Ranco 9710).

Tavby 710 a 711 byly navrženy jako syntetické litiny. Jak je zřejmé z *tab. 16*, základní kovová vsázka neobsahovala žádný podíl surového železa, ale byla sestavena pouze z ocelového odpadu (~60 %), vratného materiálu vč. litinových špon (~40 %). Z takto připravené vsázky bylo v kovu pouze ~1,5 % uhlíku. Proto byl kov nauhličen na požadovanou 4 % (před modifikací) pomocí nauhličovadla (Ranco 9710).

- Očkování kovu

U všech taveb odlévaných ve školní slévárně bylo provedeno očkování do pánve. Jak uvádí literatura [3], dávkování očkovačů u této metody a pro litinu s kuličkovým grafitem je doporučeno rozmezí 0,7-1,2 %. U taveb 676 a 679 bylo zvoleno dávkování 1,0 % z hmotnosti kovu (střední hodnota z doporučeného intervalu). U taveb bylo množství sníženo na 0,7 % z hmotnosti kovu. Množství očkovačů bylo voleno tak, aby byl kompenzován negativní účinek hořčíku a případně dalších prvků (zejména manganu) a s ohledem na odeznívání očkovacího

účinku. K očkovaní byl používán očkovací přípravek SB 5, který je vhodný pro očkovaní litiny s lupínkovým i kuličkovým grafitem. Byl dodán společností ASK Chemicals s.r.o. Přibližné složení očkovačla je uvedeno v *tab. 17*. Jak z tabulky vyplývá, očkujícím prvkem je zde baryum (2,0-3,0 %). Kompletní materiálový list očkovačla je v *příloze 1*.

*Tab. 17* Chemické složení očkovačla SB 5 použitého při tavných ve školní slévárně.

chemické složení očkovačla SB 5				
prvek	Si	Al	Ca	Ba
koncentrace [%]	~70 %	1,0-1,5 %	0,8-1,5 %	2,0-3,0 %

▪ Modifikace kovu

Modifikace probíhala v pánvi polévací metodou, kdy byl modifikační přípravek překrytý cca 2 kg ocelových odstřížků. Množství modifikátoru bylo stanoveno na základě vztahu 2.1. [13]. Zbytkový hořčík ( $\%Mg_{zbyt}$ ) byl zvolen 0,03 %, což odpovídá spodní hranici přípustného intervalu (0,025-0,050 %) zbytkového hořčíku, který vychází ze síry obsažené ve vratném materiálu. Při tavně se nepředpokládá problém s odezníváním modifikačního účinku, protože byl kov modifikován ihned v pánvi a po stažení strusky byl odléván do formy. Koeficient 0,76 (ve vztahu 2.1) vychází z podílu molárních hmotností hořčíku ( $24 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) a síry ( $32 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) vynásobeného 100 (%). S ohledem na možnosti slévárny VUT i slévárny Ernst Leopold byla zvolena polévací metoda modifikace. Účinnost modifikace byla ve slévárně VUT na základě způsobu očkovaní a podmínek stanovena na 55 %. [3; 13]

$$\%VL63 = \frac{\%Mg_{zbyt} + 0,76 \% \Delta S}{(\%Mg_{využ} : 100) \times \%Mg_{VL63}} \times 100, \quad (2.1)$$

- $\%VL63$  - množství použité předslitiny [%],  
 $\%Mg_{zbyt}$  - požadovaný obsah zbytkového hořčíku [%],  
 $\Delta S$  - rozdíl obsahu síry před a po modifikaci [%],  
 $\%Mg_{využ}$  - využití hořčíku, použitého k modifikaci [%],  
 $\%Mg_{VL63}$  - koncentrace hořčíku v předslitině [%].

K modifikaci byl u všech taveb používán modifikační přípravek VL 63, který byl dodán společností ASK Chemicals s.r.o. Tato předslitina obsahuje 6,5 % hořčíku (tj.  $Mg_{VL63}$  ve vztahu 2.1). Složení modifikátoru je uvedeno v *tab. 18*. Kompletní materiálový list modifikátoru je v *příloze 2*.

*Tab. 18* Chemické složení modifikačního přípravku VL 63.

chemické složení modifikačního přípravku VL 63				
prvek	Si	Al	Ca	Mg
koncentrace [%]	~45	~1,0	~2	~6,5



### 3.4 Tavba a odlévání

Tavby 676, 679, 710 a 711 probíhaly ve školní slévárně VUT v Brně. Připravená vsázka byla roztavena v indukční peci CONSARC (viz. obr. 26) s neutrální výduskou Wedorit FM15. Po natavení byl odebrán vzorek a na základě chemického složení změřeného pomocí spektrometru Tasman Q4 (BAS®) byla provedena korekce chemického složení na požadované složení po natavení (podle tab. 19).



Obr. 26 Indukční pec CONSARC – slévárna VUT.

Tab. 19 Požadované chemické složení kovu před odpichem.

požadované chemické složení po natavení						
prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr
koncentrace [%]	~4,00	~0,20	~1,4	max. 0,1	max. 0,01	max. 0,1

Obsah uhlíku ve vyráběné litině (GJS-400-15(18)-RT) byl požadován 3,50-3,70 %. Během modifikace se předpokládalo snížení uhlíku o 0,15-0,4 %. Proto byl obsah uhlíku před modifikací požadován ~4,00 %. Obsah manganu byl požadován 0,10-0,20 %, aby byla zajištěna výroba feritické litiny. Jelikož při očkování a modifikaci dochází k navýšení křemíku (viz vztahy 2.2, 2.3, 2.4), bylo nutné udržovat hodnoty koncentrace v rozmezí 1,3-1,4 %. Celkový nárůst se předpokládal ~ 1,2 %, proto byl požadavek nastaven tak, aby byl výsledek 2,5 %.

- modifikace vnáší Si [13]:

$$[\%Si_{mod}] = \frac{\%Mg_{VL63}}{100} \times [\%Si_{FeSiMg}], \quad (2.2)$$

- očkování vnáší Si [13]:

$$[\%Si_{očk}] = 1 * [\%Si_{SB5}], \quad (2.3)$$

- bilance křemíku při odpichu [13]:

$$[\%Si_{odpich}] = [\%Si_{kov}] - [\%Si_{očk}] - [\%Si_{mod}], \quad (2.4)$$

kde:  $\%Si_{mod}$  – křemík vnesený modifikací [%],  
 $\%Si_{FeSiMg}$  – koncentrace křemíku v předslitině [%],  
 $\%Si_{očk}$  – křemík vnesený očkováním [%],  
 $\%Si_{SB5}$  – koncentrace křemíku v očkovačce SB 5 [%],  
 $\%Si_{odpich}$  – bilance křemíku při odpichu,  
 $\%Si_{kov}$  – koncentrace křemíku v kovu [%].

V tab. 20 jsou uvedeny koncentrace prvků (z pánve) ze všech provedených taveb. Je patrné, že hodnoty uhlíku byly mírně vyšší nad horní hranici požadavku (3,7 %). Zřejmě tedy nedošlo k tak výraznému úbytku uhlíku během modifikace, jak se předpokládalo.

Tab. 20 Chemické složení jednotlivých taveb – vzorek z pánve.

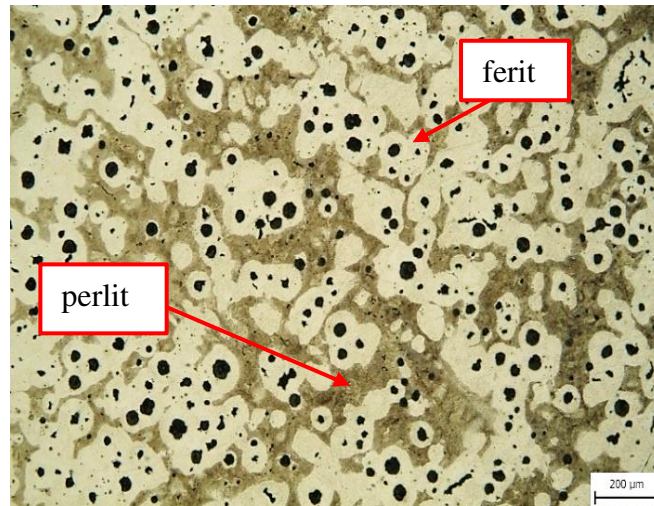
chemické složení taveb – vzorek z pánve							
prvek	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]	
číslo tavy	676	3,81	2,44	0,20	0,046	0,011	0,037
	679	3,74	2,27	0,36	0,038	0,010	0,034
	710	3,83	2,04	0,31	0,014	0,013	0,037
	711	3,84	2,22	0,29	0,019	0,017	0,034
prvek	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	Nb [%]	Pb [%]	Cr [%]	
číslo tavy	676	0,01	0,05	0,012	0,003	<0,0030	0,03
	679	0,02	0,08	0,014	0,003	<0,0030	0,04
	710	0,08	0,03	0,009	0,010	<0,0030	0,04
	711	0,03	0,03	0,009	0,010	<0,0030	0,04
prvek	V [%]	Sb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Fe [%]	Mo [%]	
číslo tavy	676	0,005	<0,0050	0,0015	0,013	93,29	0,003
	679	0,004	<0,0050	0,0025	0,007	93,34	0,006
	710	0,001	<0,0050	0,0024	0,009	93,54	<0,001
	711	0,001	<0,0050	0,0025	0,006	93,42	<0,001

V tab. 21 je uvedený skutečný pokles uhlíku. Je zřejmé, že propal uhlíku nebyl tak dramatický, jak se předpokládalo. V průměru byl úbytek cca 0,17 %.

Tab. 21 Úbytek uhlíku během jednotlivých taveb.

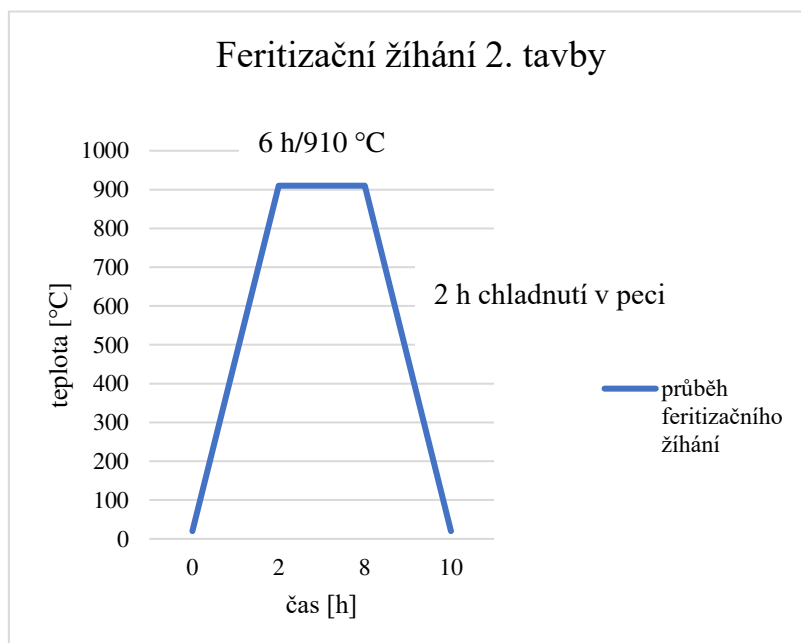
tavba	%C po natavení	%C v pánvi	předpokládaný $\Delta C$ [%]	skutečné $\Delta C$ [%]
676	4,059	3,807	0,4	0,252
679	4,014	3,740	0,4	0,274
710	3,944	3,829	0,4	0,115
711	3,862	3,835	0,4	0,027
<b>průměr</b>				<b>0,167</b>
<b>směrodatná odchylka</b>				<b>0,101</b>

Požadavek na výsledný křemík činil 2,40-2,60 %. Jak je patrné, výsledné hodnoty křemíku byly v případě tavby 676 v toleranci, u ostatních taveb byly koncentrace nižší. Nižší podíl křemíku může mít negativní vliv na menší podíl feritu ve struktuře, ale naopak pozitivní vliv na vyšší nárazovou práci za nižších teplot. Jak je také zřejmé, u taveb 679, 710 a 711 byl vyšší podíl manganu (požadavek byl max. 0,2 %). Z tohoto důvodu byl předpokládán vyšší podíl perlitu ve struktuře. To u tavby 679 potvrdil i metalografický výbrus (viz obr. 27).



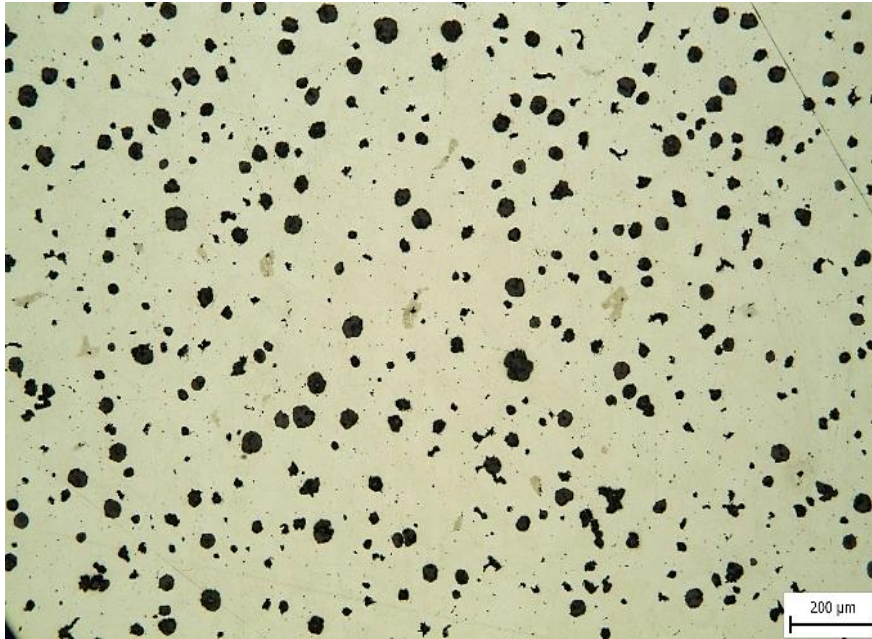
Obr. 27 Metalografický výbrus z tavby 679 (litý stav).

Jelikož zvolená značka litiny vyžaduje převážně feritickou strukturu, bylo u tavby 679 provedeno feritizační žihání. Průběh tepelného zpracování je uveden na obr. 28. Vzorky byly žihány po dobu cca 6 h na teplotě ~910 °C (kontrolováno termočlánkem). Následovalo chladnutí v peci po dobu cca 2 h.



Obr. 28 Průběh feritizačního žihání.

Výsledná vnitřní struktura po feritizačním žhání byla ověřena metalografickým výbrusem. Jak je vidět na *obr. 29* níže, po tepelném zpracování již v matrici převažuje téměř čistý ferit.



*Obr. 29* Metalografický výbrus tavby 679 – po tepelném zpracování, leptáno (nital 3%).

Obsah hořčíku byl v tavnách udržen na hodnotách 0,034-0,037 %, což bylo v toleranci 0,025-0,050 %. Při experimentech se předpokládalo využití hořčíku 55 %. Jak vyplývá z *tab. 22*, využití hořčíku bylo průměrně 58 %. Je zde však poměrně velká směrodatná odchylka hodnot. Zřejmě souvisí s podmínkami lití a hmotností taveb.

*Tab. 22* Využití hořčíku u jednotlivých taveb.

tavba	$\Delta S_{\text{skut}} [\%]$	Mg <sub>zbyt</sub> [%] (plánované)	Mg <sub>zbyt</sub> [%] (skutečné)	$\eta_{\text{Mg}} [\%]$ (plánované)	$\eta_{\text{Mg}} [\%]$ (skutečné)
676	0,009	0,030	0,037	55	61,0
679	0,010	0,030	0,034	55	65,0
710	0,011	0,030	0,037	55	53,0
711	0,014	0,030	0,034	55	53,0
				<b>průměr</b>	<b>58,0</b>
				<b>směrodatná odchylka</b>	<b>5,2</b>

Další prvky nevykazovaly výrazně vysoké hodnoty, které by zásadně ovlivňovaly vlastnosti kovu. V *tab. 23* jsou uvedeny základní podmínky odlévání. Odpichová teplota kovu byla 1520 °C. Během modifikace docházelo k poklesu teploty kovu o cca 100-150 °C, proto nebyla teplota po modifikaci měřena. Byla odhadnuta na cca 1420 °C. Teplota lití byla 1350 °C.

*Tab. 23* Teploty a časy během taveb vedených ve slévárně VUT v Brně.

parametry taveb	
odpichová teplota	1520 ( $\pm 10$ ) °C
teplota po modifikaci	cca 1420 °C
teplota při lití	1350 °C
doba tavení	55-60 minut
doba lití	45–50 sekund

Po odpichu byl kov očkován a modifikován v pánvi a přímo z modifikační pánve odléván tzv. horem – přes hubičku do připravených forem. Po odlití byl na hladinu zkušebních bloků dán exozásyp. Na *obr. 30* je zachycen proces odlévání tavby 679. Kompletní protokoly z taveb 676, 679, 710 a 711 jsou v *přílohách 3-6*.



*Obr. 30* Průběh 2. tavby (679) ve slévárně VUT v Brně: *obrázek vlevo: odpich kovu a modifikační reakce, obrázek uprostřed: odlévání, obrázek vpravo: odlité Y-bloky s exozásypem.*

### 3.5 Příprava vzorků

Po vychladnutí kovu byly bloky uvolněny z formy pomocí uvolňovacího roštu. Následně byly od zbylého písku mechanicky očištěny kladivem a ocelovým kartáčem. Poté byly bloky umístěny do stolového tryskače Škoda TMSO 2.4/2. Tryskací médium tvořily kovové kuličky s rozměry 2–4 mm. Následně byly na pile BOMAR ergonomic 320.250 DG s chlazením ze zkušební části (B) Y-bloků nařezána zkušební tělesa ve tvaru kvádrů. Fotografie strojů jsou na *obr. 31*.



*Obr. 31* Fotografie použitých zařízení: stolový tryskač škoda TMSO 2.4/2 (vlevo) a pásová pila BOMAR ergonomic 320.250 DG (vpravo).

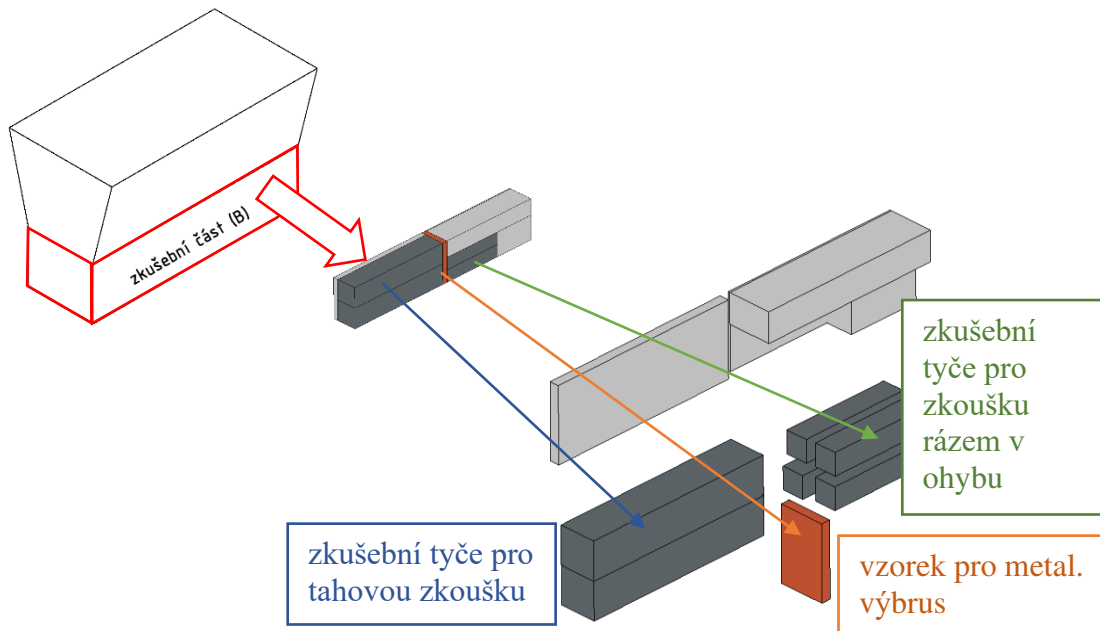
Přibližné rozměry nařezaných kvádrů jsou uvedeny v *tab. 24*. Ze zkušební části bloků byly také vyřezány kvádry, které byly následně použity pro vytvoření vzorků na metalografické výbrusy.

*Tab. 24* Shrnutí nařezaných vzorků pro mechanické zkoušky.

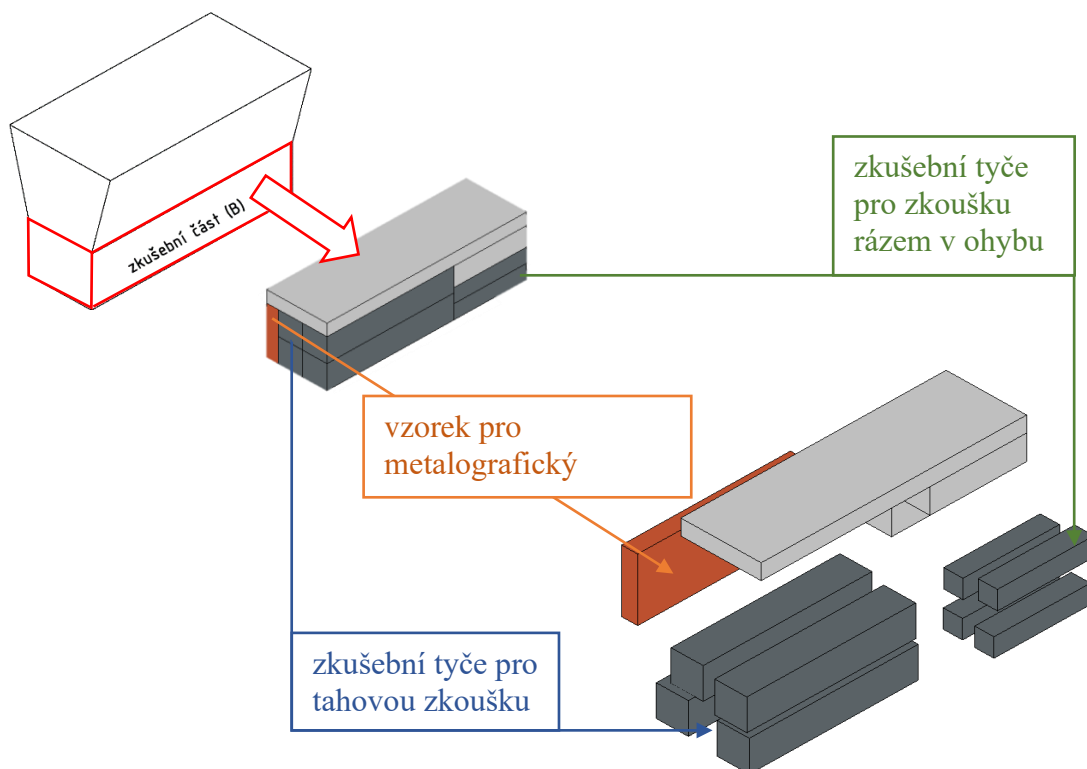
odebrané vzorky pro mechanické zkoušky						
zkouška	tavba	blok	a [mm]	b [mm]	c [mm]	počet ks
tahová zkouška	676	25	20	20	105	3
		50	20	20	105	3
	679	25	20	20	105	3
		50	20	20	105	3
	710	*	20	20	105	1
	711	*	20	20	105	1
zkouška rázem v ohybu	676	25	12	12	60	4
		50	12	12	60	4
	679	25	12	12	60	4
		50	12	12	60	4
	710	*	12	12	60	1
	711	*	12	12	60	1

\* vzorky byly z důvodu nedostatku kovu odebrány ze struskového kanálu vtokové soustavy

Níže je 3D vizualizace rozřezového plánu, podle kterého byla zkušební tělesa řezána. Na *obr. 32* je schematicky naznačen rozřezový plán pro Y-blok s tloušťkou stěny  $t=25$  mm. Na *obr. 33* je plán řezání pro Y-blok s tloušťkou zkušební části  $t=50$  mm. U *obr. 32* jsou zřejmé pouze dva zkušební vzorky pro tahovou zkoušku. Třetí kus byl nařezán stejným způsobem ze druhého odlitku Y-bloku s tloušťkou stěny 25 mm. Barevně odlišený kvádr byl dále řezán na pile Streurs s vlastním chlazením na rozměrově vhodný vzorek pro zhotovení metalografického výbrusu (popsáno v kapitole 3.7).



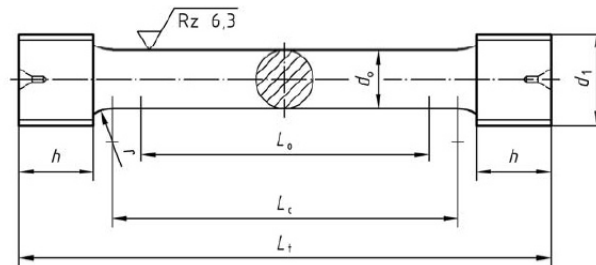
*Obr. 32* Plán rozřezání zkušební části Y-bloku tloušťky  $t=25$  mm.



*Obr. 33* Plán rozřezání zkušební části Y-bloku tloušťky  $t=50$  mm.

### 3.6 Mechanické zkoušky

Pro tahovou zkoušku byla podle normy DIN 50125:2009-07 zhotovena zkušební tělesa. Na obr.34 je schéma zkušební tyče podle předepsané normy. Významné rozměry zkušebního tělesa jsou uvedeny v tab. 25. Zkušební přístroj byl Zwick/Roell Z250. Pro měření napěťové charakteristiky byl používán extenzometr MultiXtens. V přílohách 7-9 jsou protokoly z provedených tahových zkoušek.



Obr. 34 Schéma zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [25].

- $d_0$  – průměr vzorku
- $d_1$  – metrický ISO-závit
- $h$  – výška hlavy
- $L_0$  – počáteční délka měření ( $L_0 = 5d_0$ )
- $L_C$  – zkoušená délka ( $L_C \geq L_0 + d_0$ )
- $L_T$  – celková délka zkušební tyče

Tab. 25 Významné rozměry zkušební tyče pro tahovou zkoušku dle normy DIN 50125:2009-07 [25].

Rozměry zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku; dle normy DIN 50125:2009-07						
$d_0$	$L_0$	$d_1$	r (min.)	h (min.)	$L_C$ (min.)	$L_t$ (min.)
10 mm	50 mm	M16	8 mm	12 mm	60 mm	97 mm



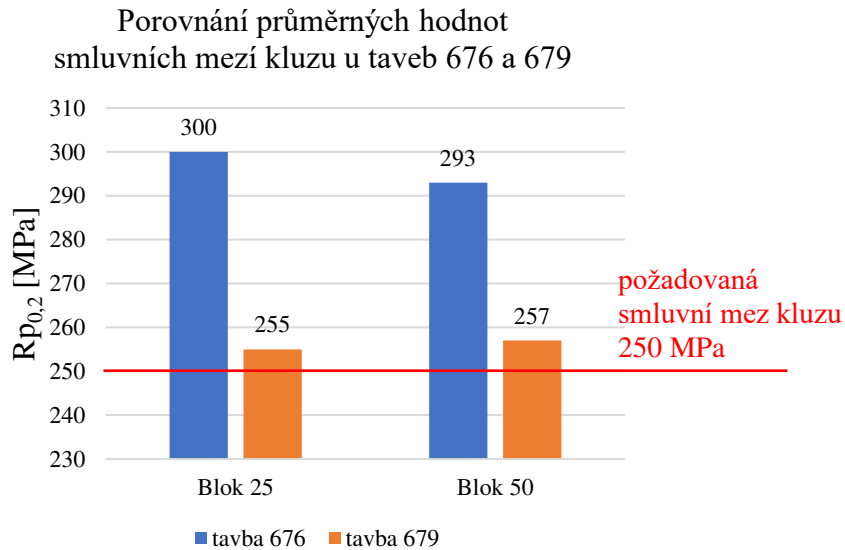
V tab. 26 jsou uvedeny výsledky z tahových zkoušek.

Tab. 26 Hodnoty mechanických vlastností u provedených tahových zkoušek.

označení: tavba-blok- a/b/c	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	E [GPa]
tavba 676 – litý stav					
676-25a	36 886	300	464	17,6	165,03
676-25b	36 982	301	464	19,8	160,38
676-25c	36 248	300	458	17,2	169,54
<b>průměr</b>	<b>36 705</b>	<b>300</b>	<b>462</b>	<b>18,0</b>	<b>165,00</b>
směrodatná odchylka	398,96	0,58	3,46	1,40	4,58
676-50a	35 497	292	447	21,5	163,00
676-50b	36 059	293	453	21,2	155,20
676-50c	35 922	294	452	18	172,30
<b>průměr</b>	<b>35 826</b>	<b>293</b>	<b>451</b>	<b>20,0</b>	<b>164,00</b>
směrodatná odchylka	239,27	0,82	2,62	1,58	6,99
tavba 679 – po tepelném zpracování					
679-25a	31589	255	397	22,9	161,90
679-25b	31350	254	395	17,0	151,80
679-25c	31688	257	399	22,8	163,10
<b>průměr</b>	<b>31542</b>	<b>255</b>	<b>397</b>	<b>20,9</b>	<b>158,90</b>
směrodatná odchylka	141,88	1,25	1,63	2,76	5,07
679-50a	31905	257	401	22,2	151,10
679-50b	31786	257	402	23,2	154,70
679-50c	31824	256	400	19,5	157,70
<b>průměr</b>	<b>31838</b>	<b>257</b>	<b>401</b>	<b>22</b>	<b>155,00</b>
směrodatná odchylka	49,63	0,47	0,82	1,56	2,70
tavba 710 – litý stav					
710	26 099	307	327	0,6	142,40
tavba 711 – litý stav					
711	39810	329	500	4,5	147,60

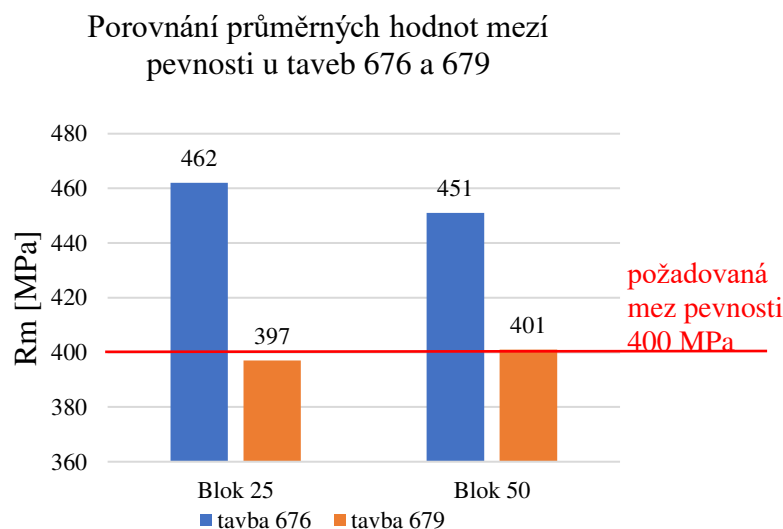
Výsledky tahových zkoušek jsou graficky zhodnoceny na obr. 35 až obr. 38.

Na obr. 35 jsou porovnány výsledky smluvních mezí kluzu z taveb 676 (cca 55 % SŽ) a 679 (cca 30 % SŽ). Jsou zde uvedeny výsledky pro bloky s tloušťkou stěny 25 mm i 50 mm. Z obrázku vyplývá, že požadované spodní hranici meze kluzu (250 MPa – dle ČSN 42 2304 [26]) vyhovují všechny zkoušené vzorky. Je patrné, že u tavby 676 jsou pro obě tloušťky stěn meze kluzu téměř srovnatelné. To stejné platí pro vzorky z tavby 679. Dále je vidět, že tavba v litém stavu (676) vykazuje vyšší hodnoty meze kluzu, než tavba po tepelném zpracování (679). Jelikož je chemické složení obou taveb téměř srovnatelné, dá se předpokládat, že rozdíly jsou způsobeny právě různým podílem perlitu a feritu u obou taveb. Z těchto výsledků vyplývá, že různý podíl surového železa ve vsázce neměl u sledovaných taveb prakticky žádný vliv na hodnoty smluvní meze kluzu.



Obr. 35 Porovnání průměrných hodnot smluvních mezí kluzu u taveb 676 a 679 (rozděleno podle velikosti Y – bloků).

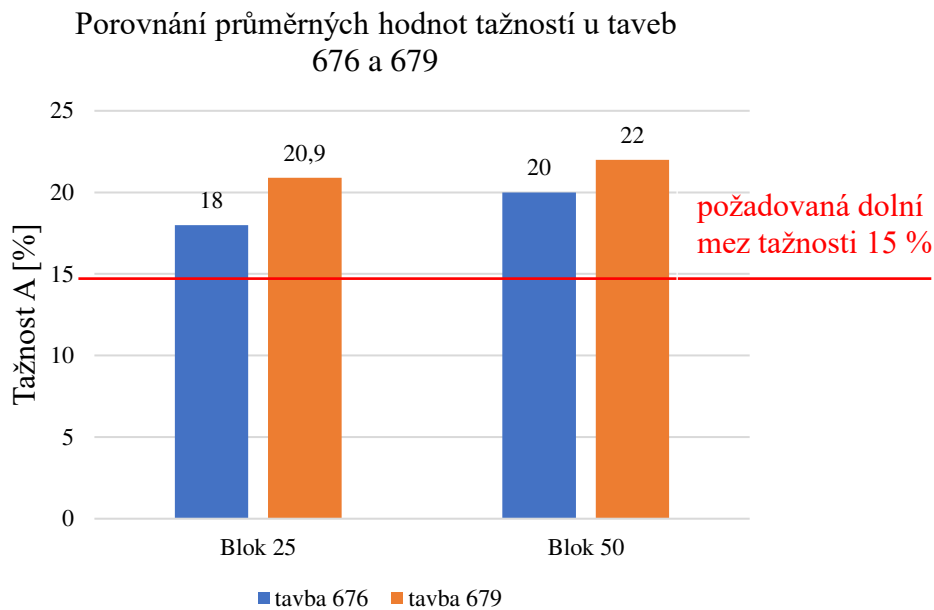
Na obr. 36 jsou porovnány výsledky mezí pevnosti z taveb 676 (cca 55 % SŽ) a 679 (cca 30 % SŽ). Jsou zde uvedeny výsledky pro bloky s tloušťkou stěny 25 mm i 50 mm. Podle



Obr. 36 Porovnání průměrných hodnot mezí pevnosti u taveb 676 a 679 (rozděleno podle velikosti Y – bloků).

normy ČSN 42 2304 je minimální hodnota meze kluzu stanovena na 400 MPa. Této hranici vyhovují výsledky z tavby 676 (obě tloušťky stěn). U tavby 679 vyhovují pouze výsledky z bloku tloušťky 50 mm. Výsledek z tavby 679 je u bloku s tloušťkou stěny 25 mm mírně pod požadovanou hranicí. Je patrné, že u tavby 676 jsou pro obě tloušťky stěn meze pevnosti téměř srovnatelné. To stejné platí pro tavbu 679. Je zřejmé, že výsledné hodnoty z tavby 676 jsou v dostatečné rezervě nad požadavkem. Hraniční hodnoty meze pevnosti u tavby 679 jsou pravděpodobně důsledkem tepelného zpracování. V zásadě je však z výsledku patrné, že rozdílné podíly surového železa ve vsázce neměly u sledovaných taveb na výsledky meze pevnosti významnou roli.

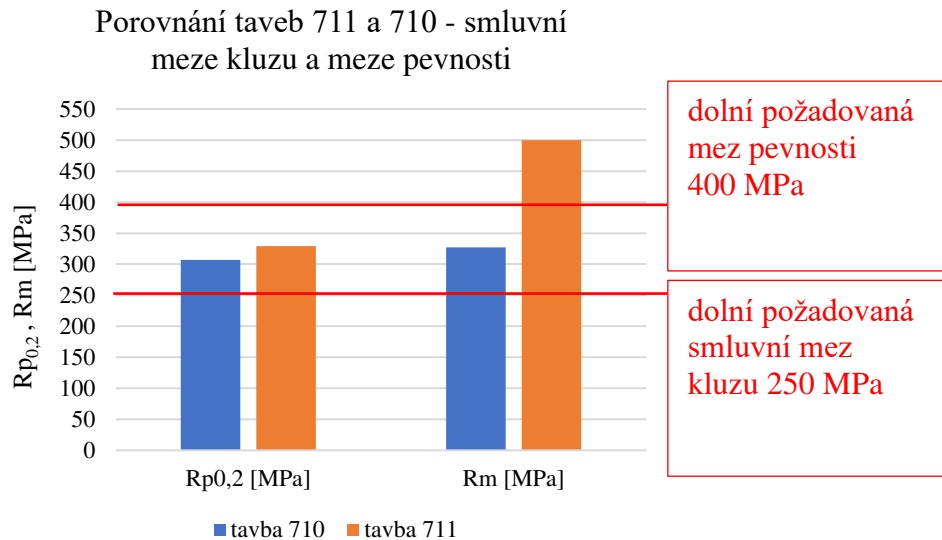
Na obr. 37 jsou porovnány výsledky tažnosti z taveb 676 (cca 55 % SŽ) a 679 (cca 30 % SŽ). Podle normy ČSN 42 2304 je požadavek minimální tažnosti u vybrané značky litiny stanoven na 15 %.



Obr. 37 Porovnání průměrných hodnot tažnosti u taveb 676 a 679 (rozděleno podle velikosti Y – bloků).

Požadavku vyhovují všechny testované vzorky. Je patrné, že vzorky odebrané z tavby 676 (lité stav) vykazují nižší hodnoty tažnosti. U vzorků z tavby 679 (po tepelném zpracování) byly naměřeny vyšší hodnoty tažnosti. Pravděpodobně je to dáno větším podílem feritu ve struktuře u tepelně zpracovaných vzorků. Z výsledků lze konstatovat, že změna podílu surového železa ve vsázce neměla u sledovaných taveb zásadní vliv na výsledky tažnosti. [26]

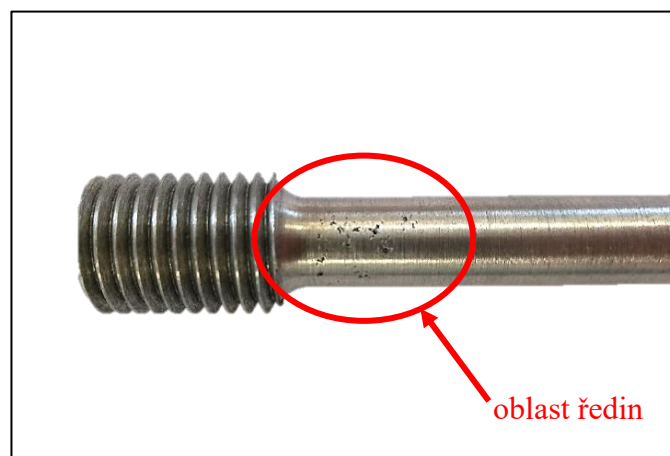
Na *obr. 38* jsou graficky porovnány výsledky mezi pevnosti a smluvních mezí kluzu naměřených u taveb 710 a 711. Tyto tavby byly z hlediska druhování i chemického složení totožné a jednalo se o synteticky vyrobené litiny (vsázka neobsahovala surové železo). U obou taveb byly vzorky odebrány ze struskového kanálu vtokové soustavy.



*Obr. 38* Zhodnocení smluvních mezí kluzu a mezí pevnosti u taveb 710 a 711.

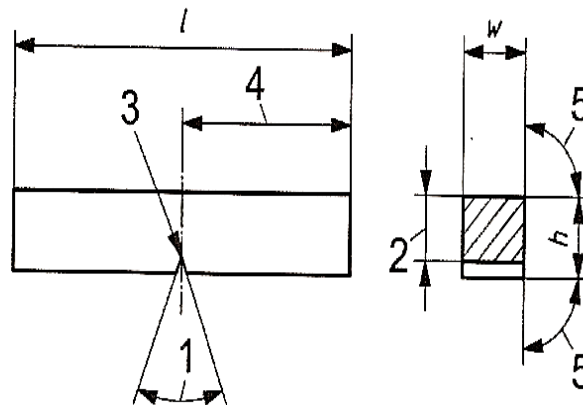
Požadovaná mez kluzu je dle normy ČSN 42 2304 stanovena na 250 MPa. Tuto hranici oba vzorky s rezervou překročily.

Spodní hranice meze pevnosti je podle normy ČSN 42 2304 stanovena na 400 MPa. Této hodnoty nebylo u tavby 710 dosaženo, jelikož došlo k předčasnému přetržení vzorku. Důvodem byly řediny ve vzorku, jak ukazuje *obr. 39*. Z tohoto důvodu byla naměřena tažnost pouze 0,6 %. U tavby 711 byla naměřena výsledná hodnota meze pevnosti 500 MPa. Tato hodnota byla zřejmě způsobena zvýšeným podílem perlitu ve struktuře, jak potvrdil i metalografický výbrus (viz kapitola 3.7.2 – hodnocení metalografických vzorků). Vyloučení perlitu bylo v matrici bylo zřejmě také podpořeno mírně vyšším obsahem manganu (0,29 % Mn). Z tohoto důvodu byla také naměřena nízká hodnota tažnosti (4,5 %). Lze předpokládat, že i u vzorku z tavby 711 mohou být hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a zejména tažnosti ovlivněny výskytem ředin.



*Obr. 39* Detail zkušebního tělesa pro trhací zkoušku u tavby 710.

Zkouška rázem v ohybu (Sharpyho zkouška) byla provedena podle normy ČSN EN ISO 148-1 [27]. Na *obr. 40* je schéma zkušební vzorku.



*Obr. 40* Schéma zkušební vzorku pro zkoušku rázem v ohybu [26].

- l – délka zkušební vzorku
- h – výška vzorku
- w – šířka vzorku
- 1 – úhel vrubu
- 2 – výška pod vrubem
- 3 – poloměr zakřivení kořene vrubu
- 4 – vzdálenost roviny symetrie vrubu od konců zkušební tělesa
- 5 – úhel mezi rovinou symetrie vrubu a podélnou osou zkušební tělesa
- 5 – úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušební tělesa

V *tab. 27* jsou uvedeny významné rozměry zkušební vzorku.

*Tab. 27* Významné rozměry vzorku pro zkoušku rázem v ohybu (ČSN ISO 148-1) [27].

Rozměry zkušební vzorku zkoušky rázem v ohybu: V-vrub; dle normy ČSN ISO 148-1							
l	h	w	1	2	3	4	5
55 mm	10 mm	10 mm	45°	8 mm	0,25 mm	27,5 mm	90°

V tab. 28 jsou uvedeny výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu. Zkouška byla provedena při pokojové teplotě. Na obr. 41 jsou výsledky graficky zhodnoceny.

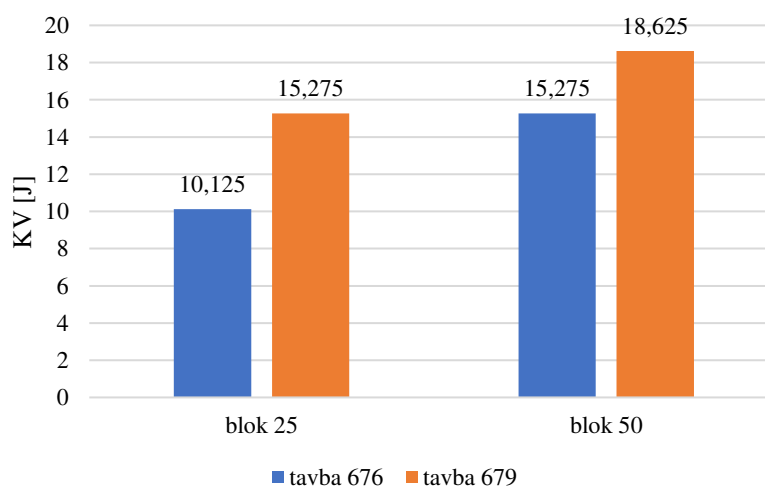
Tab. 28 Hodnoty mechanických vlastností u provedených zkoušek rázem v ohybu.

označení vzorku: tavba-blok-vzorek	KV [J]	označení vzorku: tavba-blok-vzorek	KV [J]
tavba 676 – litý stav			
676-25-V1	10,20	676-50-V1*	11,90*
676-25-V2	8,80	676-50-V2*	12,50*
676-25-V3	10,80	676-50-V3*	10,90*
676-25-V4	10,70	676-50-V4*	12,40*
<b>průměr</b>	<b>10,13</b>	<b>průměr</b>	<b>11,93</b>
směrodatná odchylka	0,798	směrodatná odchylka	0,63
tavba 679 – po tepelném zpracování			
679-25-V1	13,30	679-50-V1	18,3
679-25-V2	14,20	679-50-V2	19,00
679-25-V3	16,70	679-50-V3	18,40
679-25-V4	16,90	679-50-V4	18,80
<b>průměr</b>	<b>15,28</b>	<b>průměr</b>	<b>18,63</b>
směrodatná odchylka	1,56	směrodatná odchylka	0,29

\*zkušební vzorky byly vyrobeny v rozměru 7,5 x 10 mm – zkušební plocha činila 75 %, hodnoty v tabulce odpovídají původním hodnotám navýšených o 25 %

Z grafu na obr. 41 je patrné, že mnohem vyšších hodnot nárazové práce bylo dosaženo u vzorků odebraných z bloků s tloušťkou stěny 50 mm. Zároveň tyto výsledky vykazují nižší rozptyl zejména u vzorků po feritizačním žihání, jak naznačují směrodatné odchylky v tab. 28. Zároveň si lze všimnout, že vyšší hodnoty nárazové práce byly dosaženy u tavby 679 – po tepelném zpracování. S tím pravděpodobně souvisí vyšší podíl feritu ve struktuře. Z výsledků tedy vyplývá, že různý podíl surového železa zásadně neovlivňuje výsledky nárazové práce. Lepších výsledků nárazové práce je dle očekávání dosaženo u vzorků po tepelném zpracování.

Porovnání výsledků zkoušky rázem v ohybu u taveb 676 a 679



Obr. 41 Porovnání výsledných hodnot ze zkoušky rázem v ohybu u taveb 710 a 711.

### 3.7 Metalografie

Z provedených zkušebních taveb byly odebrány vzorky pro metalografické výbrusy. V *tab. 29* jsou shrnuty odebrané vzorky. Celkem bylo zpracováno 7 vzorků v leptaném v neleptaném stavu. Cílem bylo posoudit tvar, velikost grafitu, podíl feritu a perlitu a případný výskyt volných karbidů v matici.

*Tab. 29* Shrnutí odebraných vzorků pro metalografii.

tavba	blok 25	blok 50
676	•	•
679 – litý stav	•	-
679 – po TZ	•	•
710	vzorek byl odebrán z rozváděcího kanálu vtokové soustavy	
711	vzorek byl odebrán z rozváděcího kanálu vtokové soustavy	

#### 3.7.1 Příprava vzorků

Vzorky určené pro metalografický výbrus byly nařezány na kotoučové pile Streuers s vlastním chlazením. Velikost vzorků po nařezání byla cca 15 mm x 10 mm x 3 mm, aby byly umístitelné do lisovacího přístroje Metkon Ecopress 100 (lisovací píst má průměr cca 30 mm). Zde byly vzorky zalisovány do podoby válce o průměru cca 30 mm a výšce cca 15 mm. Okolo vzorku byla používána černá pryskyřice Metkon EPO z důvodu menšího smrštění při lisování a vyšší kvality povrchu lisovaného vzorku. Na zbytek vzorku byla používána výplňová pryskyřice Metkon NET (bílá). Fotografie připraveného zalisovaného vzorku je na *obr. 42*.



*Obr. 42* Zalisovaný vzorek.

Pro posouzení struktury na mikroskopu, byly vzorky broušeny a leštěny pomocí zařízení Struers LaboPol-5. Hrubé broušení bylo provedeno pomocí brusných kotoučů zrnitostí 80, 120 a 220, následovalo jemnější broušení na SiC brusných kotoučích o zrnitosti 800 a 1200. Na leštění byl používán kotouč DAC – 3  $\mu\text{m}$ . Během procesu broušení byly vzorky konstantě chlazeny vodou, při leštění byla použita emulze DiaDuo-2 (jedná se o suspenzi diamantových monokrystalických částic o velikosti 3  $\mu\text{m}$  na vodní bázi). Mezi operacemi byly vzorky omyty

vodou a na konci leštícího procesu následně opláchnuty lihem (kvůli zabránění koroze kovu) a popsány. Připravené vzorky byly pozorovány při stonásobném zvětšení. První pozorování proběhlo v neleptaném stavu, kdy byl hodnocen tvar a velikost grafitu. Následně byly vzorky po dobu 3 s leptány v Petriho misce v 3% roztoku kyseliny dusičné (nital) a pozorovány. Po ukončení každé operace byly vzorky omyty lihem a osušeny. Na *obr. 43* jsou snímky použitých přístrojů. [28]



*Obr. 43* Přístroje pro přípravu vzorků: vlevo: kotoučová pila Struers s chlazením, uprostřed: lis na vzorky Metkon ECOPRESS 100, vpravo: brousící zařízení Struers LaboPol-5.

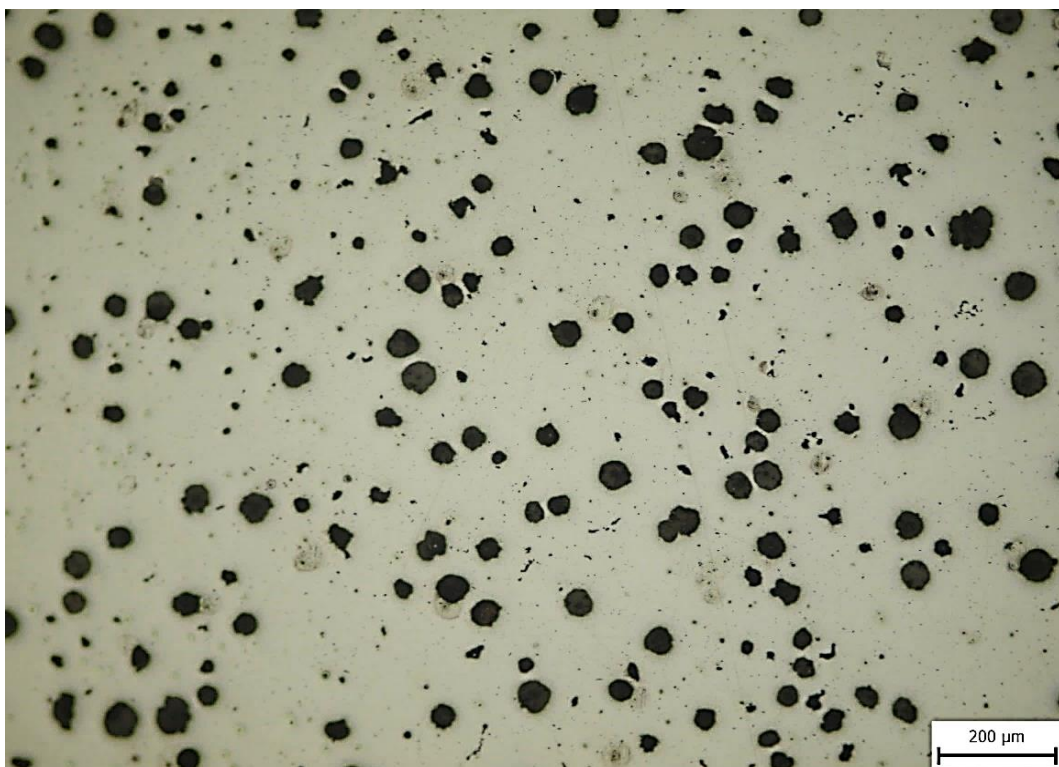
### 3.7.2 Hodnocení metalografických vzorků

Hodnocení vzorků probíhalo pomocí mikroskopu NEOPHOT 32 (Carl Zeiss) a připojeného softwaru QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.2. Pro lepší přehlednost jsou na stranách 57-63 umístěny metalografické snímky ve velkém formátu a velmi krátce okomentovány (*obr. 44* až *obr. 57*). Tyto metalografické snímky jsou až následně vyhodnoceny v *tab. 31* až *tab. 35*.

Hodnocení zahrnovalo posouzení:

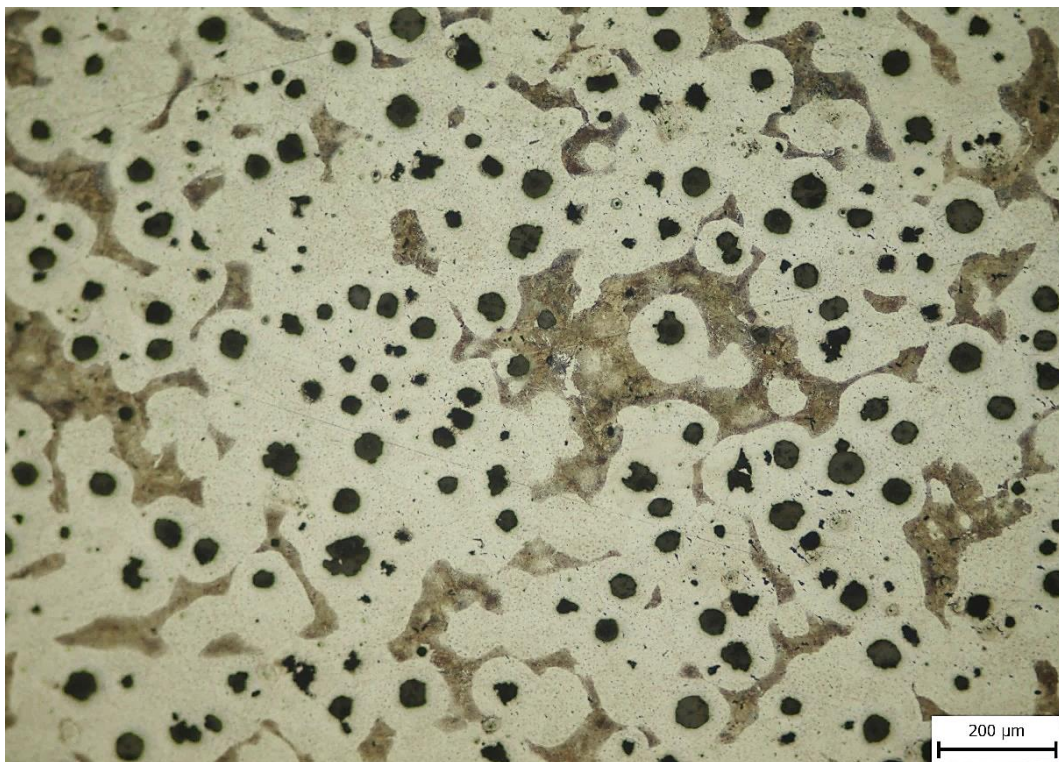
- tvaru grafitu,
- velikosti grafitu (podle etalonových řad z normy ČSN EN ISO 945-1 (420464),
- podíl feritu a perlitu (podle etalonových řad z normy ČSN EN ISO 945-1 (420464),
- výskyt volných karbidů.





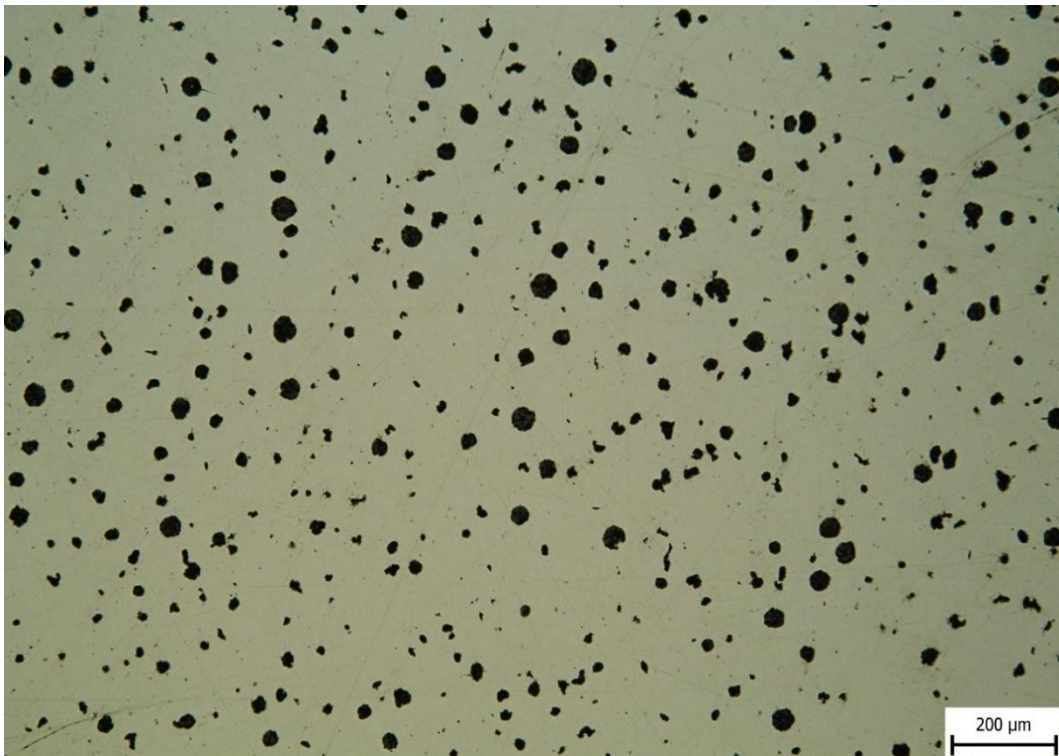
Obr. 44 Metalografický výbrus: tavba 676, blok 25, neleptáno.

Na obr. 44 je patrné poměrně rovnoměrné rozložení grafitu. Grafit je převážně pravidelně zrnitý. Místa je na snímku vidět nedokonalý tvar grafitu. Stopově se vyskytují řediny.



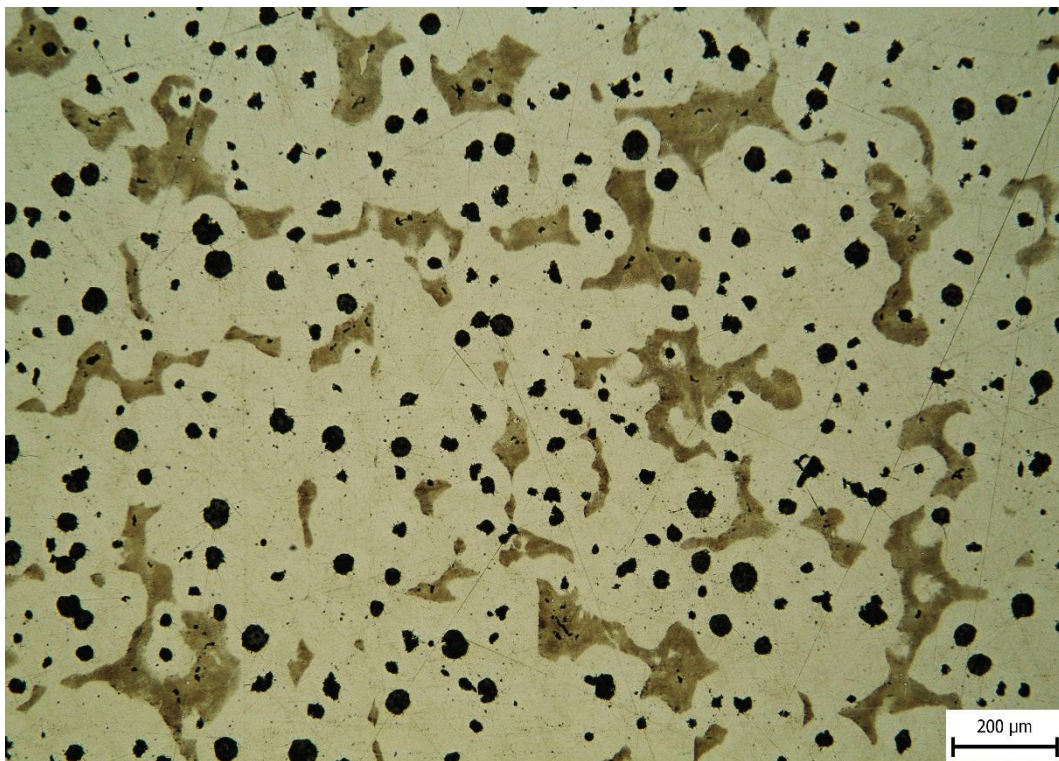
Obr. 45 Metalografický výbrus: tavba 676, blok 25, leptáno (nital 3%).

Na obr. 45 je patrná feriticko-perlitická struktura, přičemž ferit (světlá místa) zde zásadně převažuje. Místa se vyskytuje nedokonale zrnitý grafit.



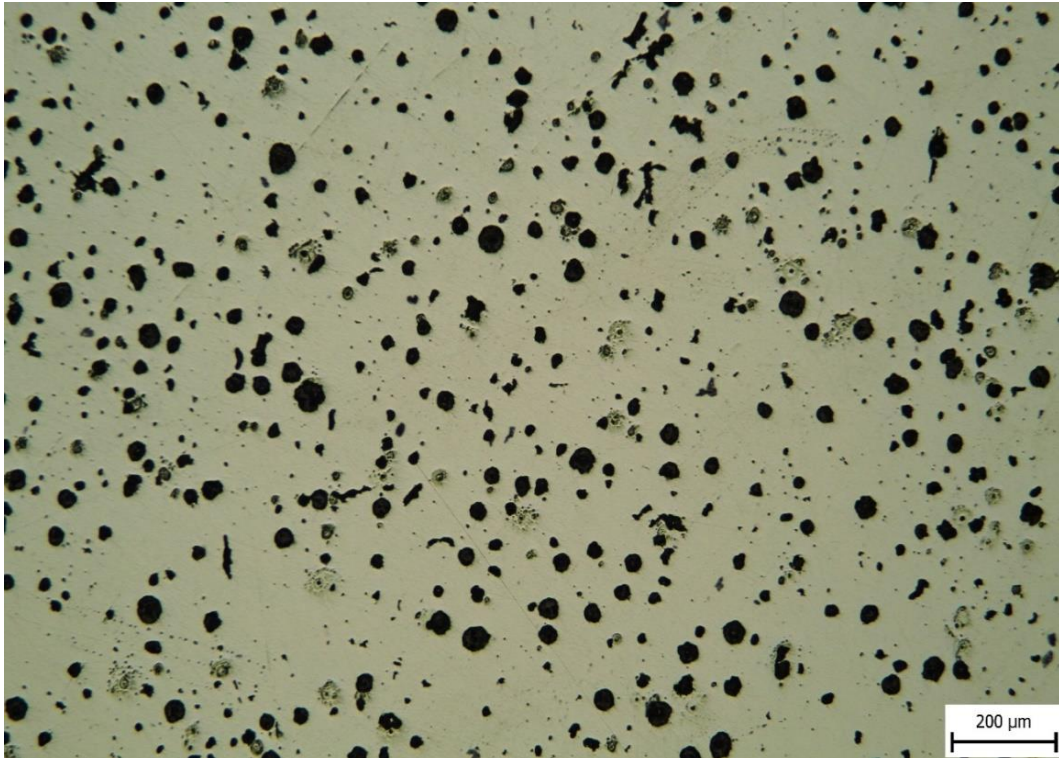
*Obr. 46* Metalografický výbrus: tavba 676, blok 50, neleptáno.

Na *obr. 46* je zřejmý jemnější grafit než u předchozích snímků. Jedná se o vzorky odebrané z Y-bloku s tloušťkou stěny 50 mm. Rozložení grafitu je převážně pravidelné. Na snímku je patrný podíl nepravidelně zrnitého grafitu.



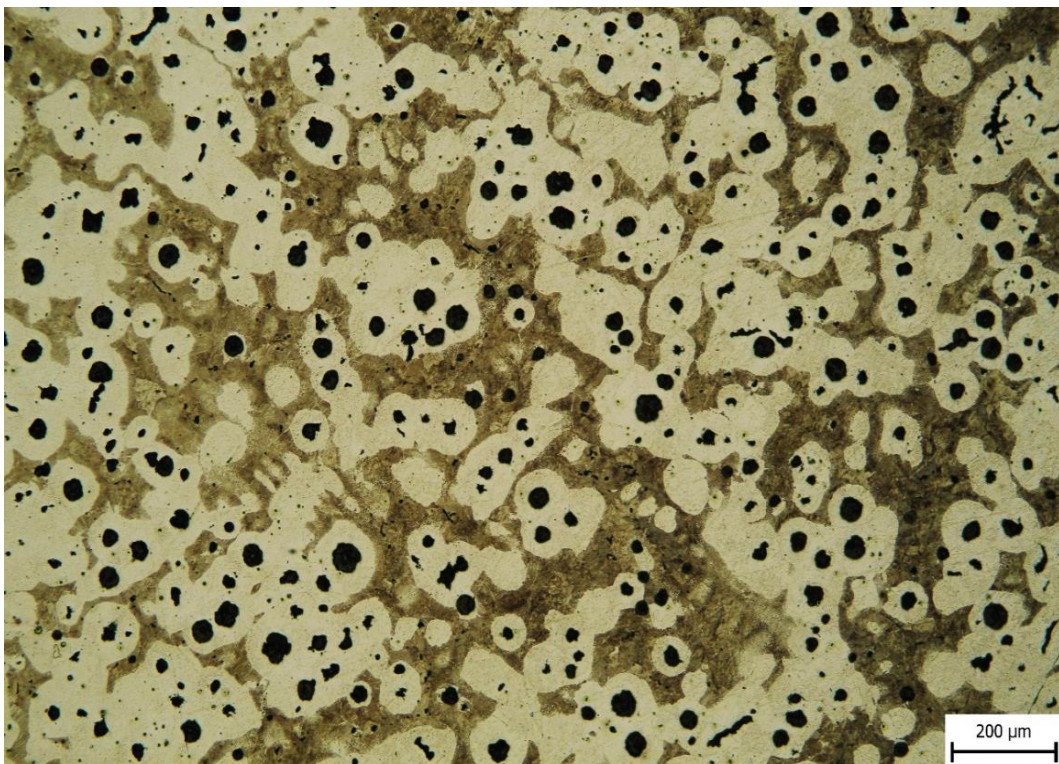
*Obr. 47* Metalografický výbrus: tavba 676, blok 50, leptáno (nital 3%).

Na *obr. 47* je vidět feriticko-perlitická struktura. Vzorek byl odebrán z bloku s tloušťkou stěny 50 mm, ochlazování kovu bylo tedy pomalejší. Následkem toho je pravděpodobně větší podíl feritické fáze než na *obr. 45* (blok tloušťky 25 mm).



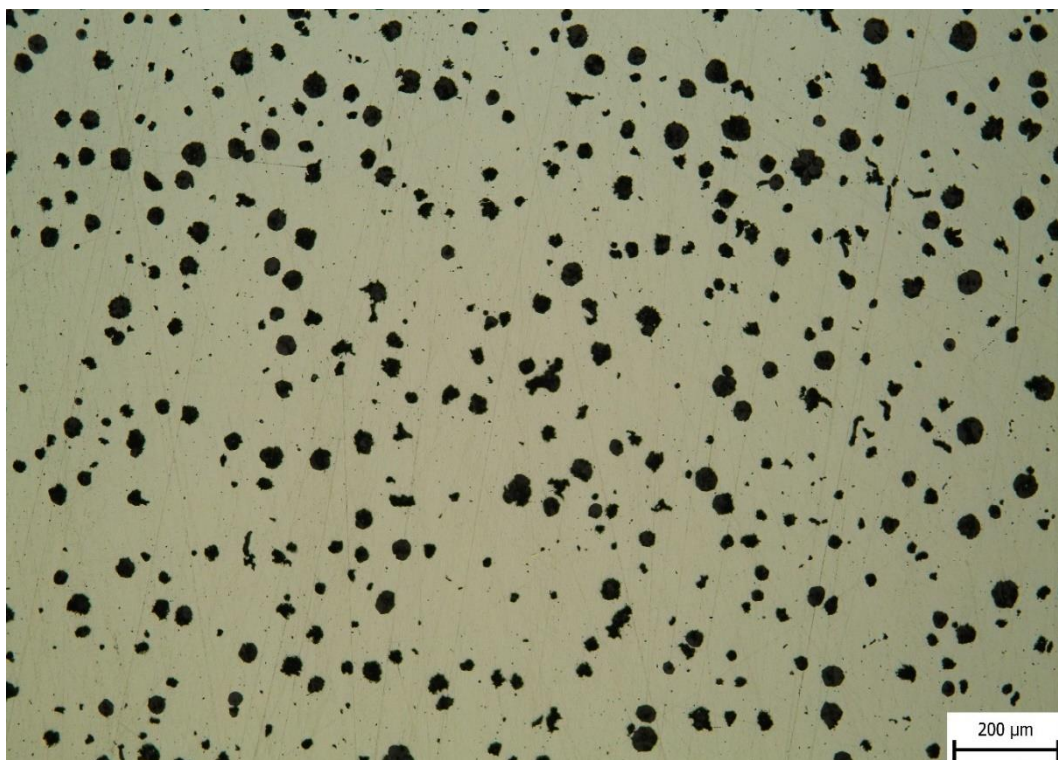
*Obr. 48* Metalografický výbrus: tavba 679 – před TZ, blok 25, neleptáno.

Na *obr. 48* je struktura LKG z tavby 679 před TZ. Je zde zřejmé větší množství vyloučeného kuličkového grafitu než u tavby 676. Místy je patrný grafit nepravidelného tvaru.



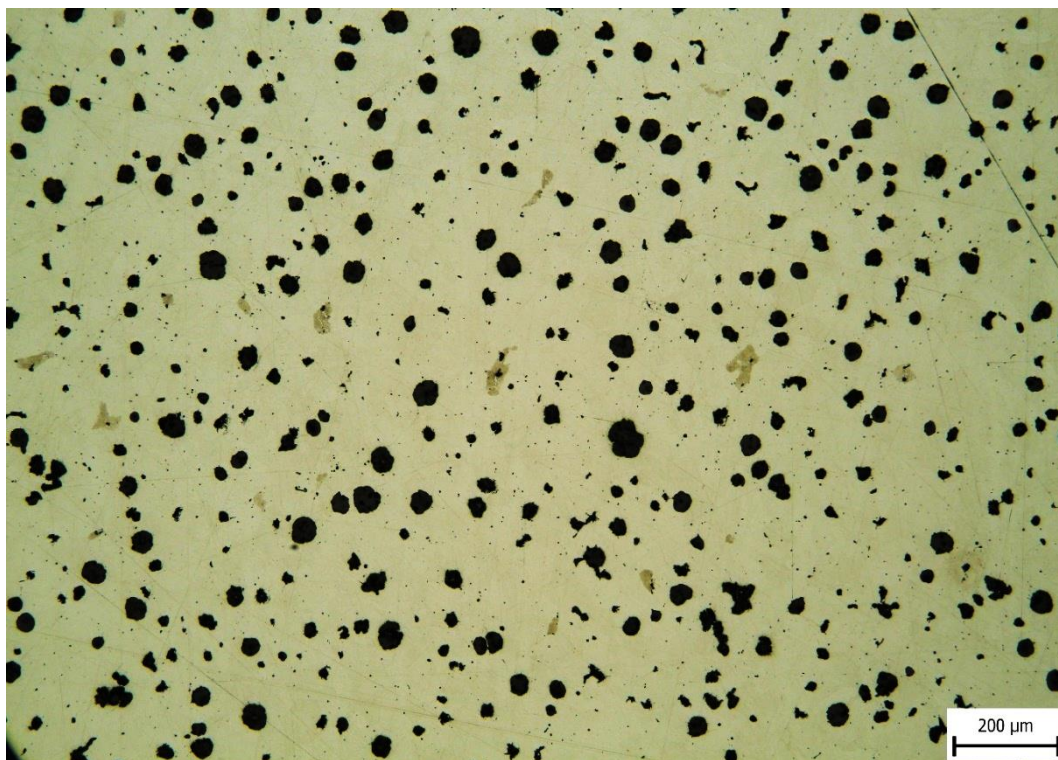
*Obr. 49* Metalografický výbrus: tavba 679 – před TZ, blok 25, leptáno (nital 3%).

Na *obr. 49* je zřejmý vysoký podíl perlitu ve struktuře. Z hlediska požadované tažnosti 15 % byly vzorky z tohoto důvodu feritizačně žihány.



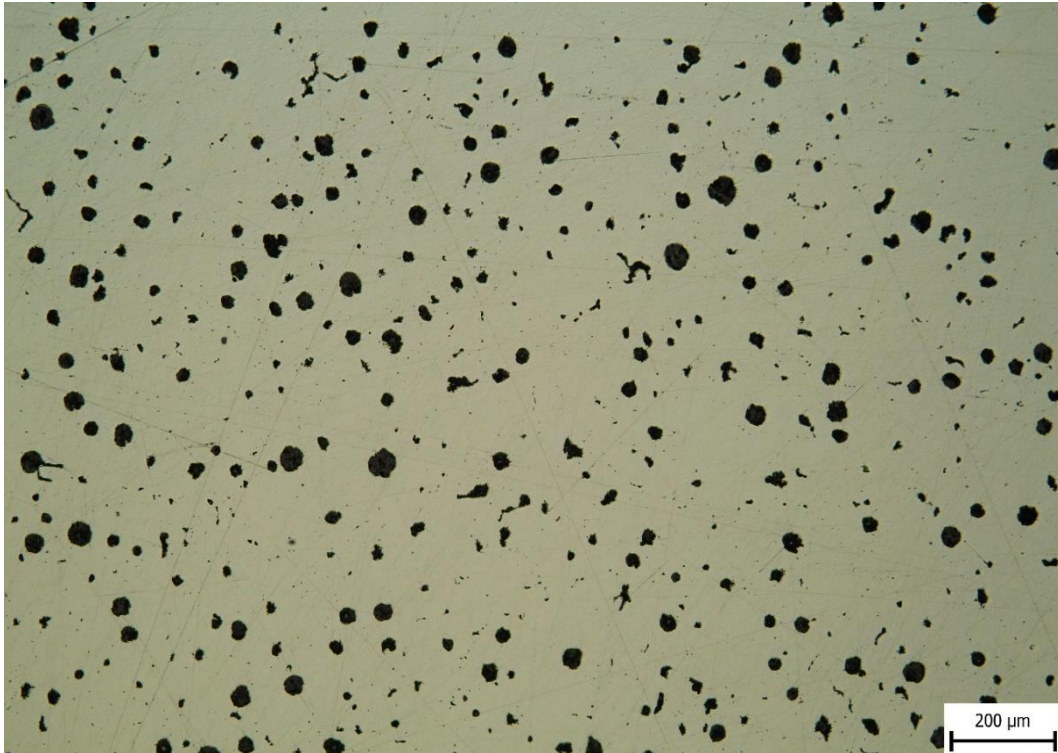
*Obr. 50* Metalografický výbrus: tavba 679 – po TZ, blok 25, neleptáno.

Na *obr. 50* je struktura LKG z tavby 679 již po TZ. Je zřejmé, že hlediska vyloučeného grafitu se jedná o téměř totožné rozložení, jako je na *obr. 48*. Rozložení grafitu je poměrně rovnoměrné, místy se vyskytuje nedokonale zrnitý grafit.



*Obr. 51* Metalografický výbrus: tavba 679 – po TZ, blok 25, leptáno (nital 3%).

Na *obr. 51* lze vidět strukturu LKG po feritizačním žíhání. Je zřejmé, že tepelným zpracováním bylo dosaženo převážně feritické struktury.



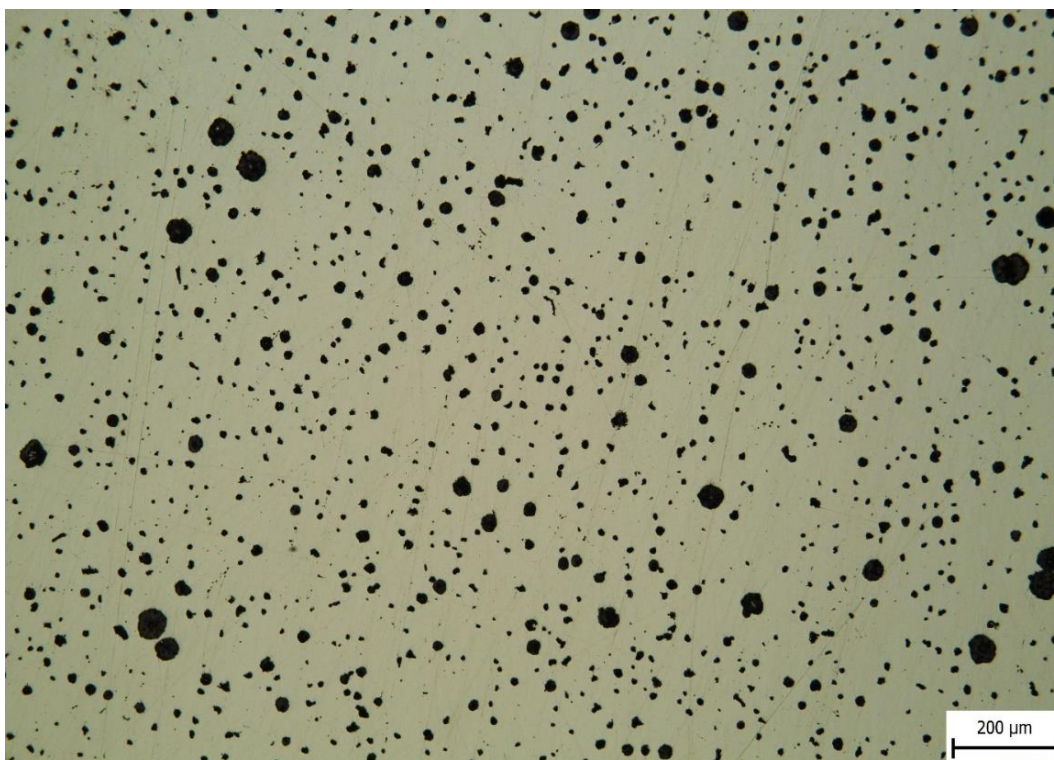
Obr. 52 Metalografický výbrus: tavba 679 – po TZ, blok 50, neleptáno.

Na obr. 52 je zřejmá menší hustota vyloučeného kuličkového grafitu, než tomu bylo u bloku s poloviční tloušťkou stěny. Zároveň je na snímku zřejmý vyšší podíl grafitu nepravidelného tvaru.



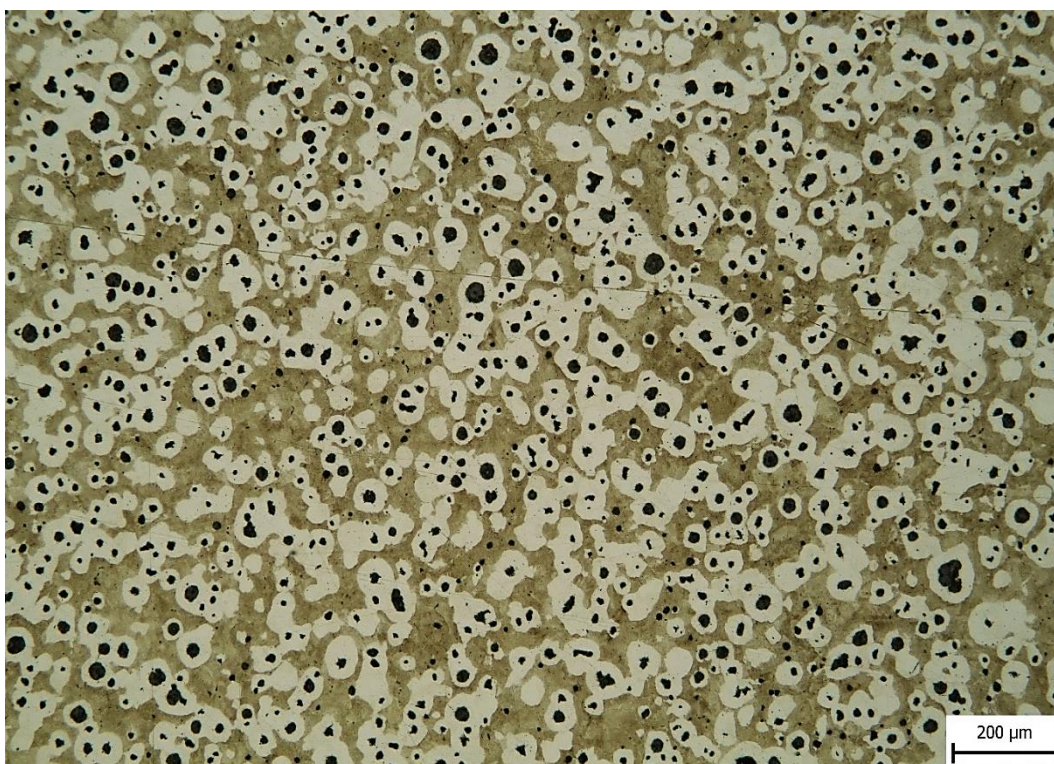
Obr. 53 Metalografický výbrus: tavba 679 – po TZ, blok 50, leptáno (nital 3%).

Na obr. 53 lze vidět čistě feritickou strukturu po tepelném zpracování. Jsou zde rovněž patrné hranice zrn.



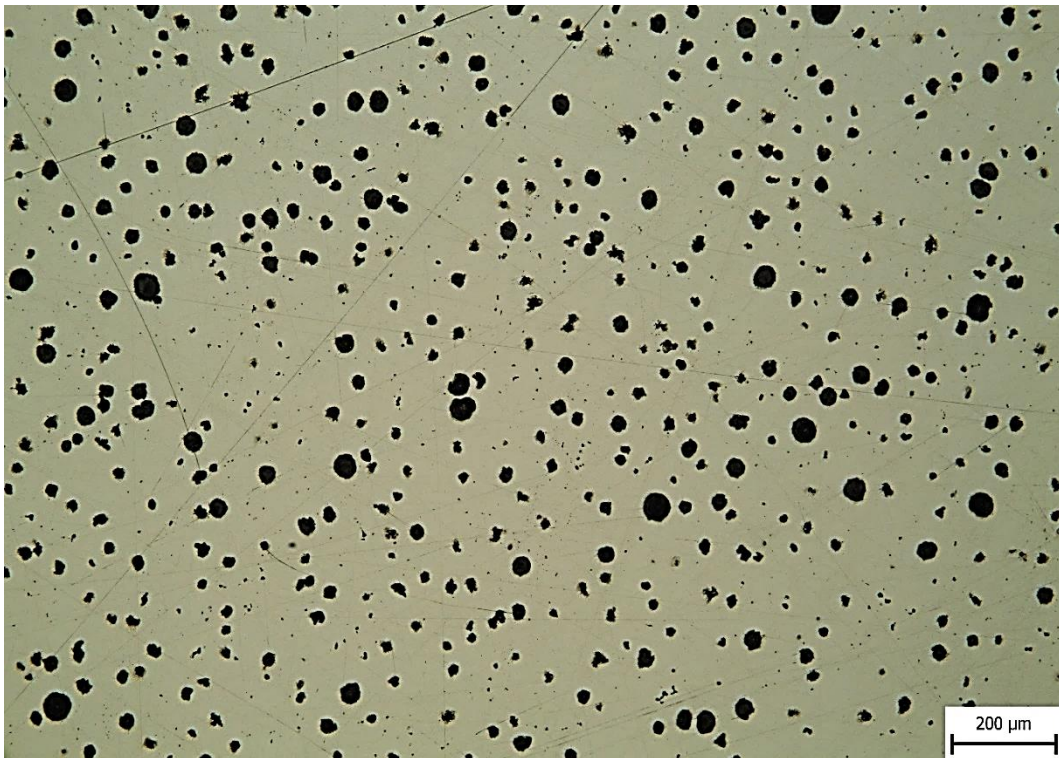
*Obr. 54* Metalografický výbrus: tavba 710, neleptáno.

Na *obr. 54* je zřejmá rozměrová nepravidelnost u kuliček grafitu.



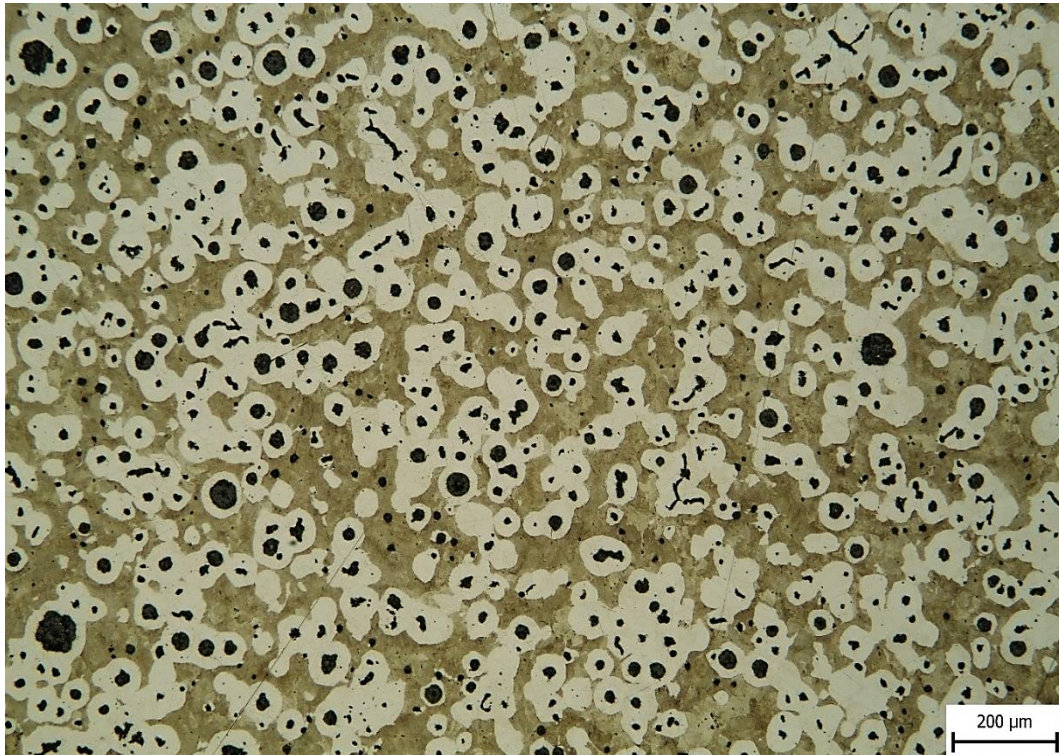
*Obr. 55* Metalografický výbrus: tavba 710, leptáno (nital 3%).

Na *obr. 55* je zřejmý velmi vysoký podíl perlitu. Pro splnění podmínek tažnosti je taková struktura nevhodná. Vzorek byl odebrán ze struskového kanálu a jednalo se o komerční výrobu, kde nebylo požadováno tepelné zpracování, proto nebyly vzorky feritizační žíhány.



*Obr. 56* Metalografický výbrus: tavba 711, neleptáno.

Z *obr. 56* je patrné poměrně rovnoměrné rozložení grafitu, zároveň jsou kuličky grafitu rozměrově podobnější, než je tomu na *obr. 54* (stejně vedená tavba). Místa jsou zřejmě vidět řediny.



*Obr. 57* Metalografický výbrus: tavba 711, leptáno (nital 3%).

Na *obr. 57* je zřejmý velmi vysoký podíl perlitu, stejně jako je tomu u *obr. 55*. Pro splnění podmínek tažnosti je taková struktura nevhodná. Ze stejných důvodů, jako je uvedeno u *obr. 57* nebylo provedeno tepelné zpracování.

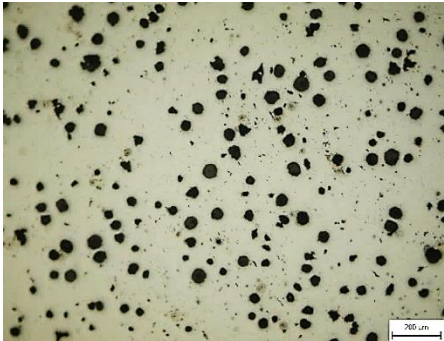
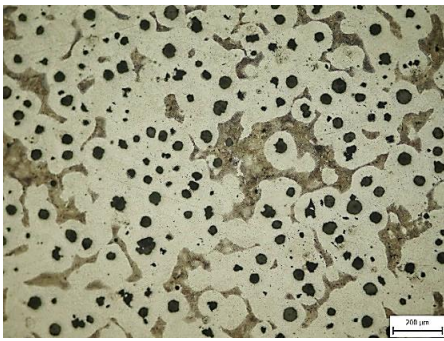
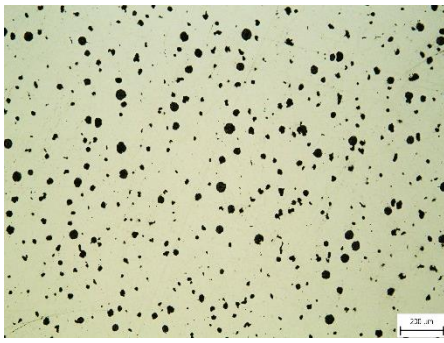
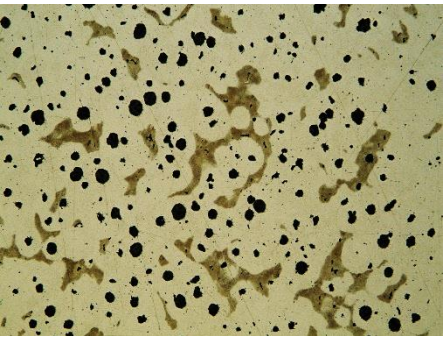
V *tab. 31 až tab. 35* jsou uvedeny jednotlivé metalografické snímky z předchozích stran (57-63) včetně jejich kompletního zhodnocení. V *tab. 30* jsou uvedena vybraná kritéria, která byla použita při hodnocení provedených metalografických snímků. Jedná se o vybrané třídy (vyskytující se na hodnocených vzorcích) velikosti grafitu, obsahy perlitu a feritu a tvary grafitu z normy ČSN EN ISO 945-1 (420464).

*Tab. 30* Vybraná kritéria pro vyhodnocení metalografických snímků [29].

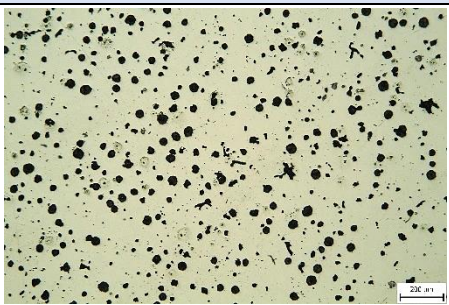
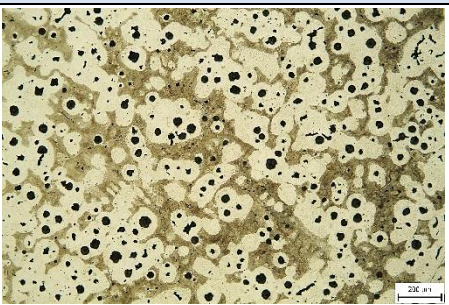
velikost grafitu			
označení třídy velikosti		velikost grafitu [ $\mu\text{m}$ ]	
6		nad 30 do 60	
7		nad 15 do 30	
obsah perlitu nebo feritu			
označení výsledku	obsah perlitu [%]	označení výsledku	obsah feritu [%]
P 45	nad 30 do 60	F 55	nad 40 do 70
P 20	nad 10 do 30	F 80	nad 70 do 90
P 6	nad 2 do 10	F 94	nad 90 do 98
P 0	do 2	F	nad 98
tvar grafitu			
označení tvaru		tvar grafitu	
V		nedokonale zrnitý	
VI		pravidelně zrnitý	



Tab. 31 Metalografické vyhodnocení tavby 676.

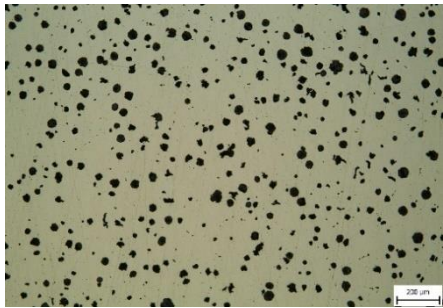


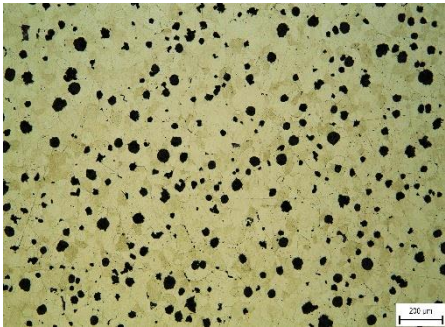
tavba 676: Y – blok s tloušťkou stěny 25 mm		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu	 <p><i>Obr. 58 Metalografie: tavba 676, blok 25, neleptaný stav.</i></p>	 <p><i>Obr. 59 Metalografie: tavba 676, blok 25 leptaný stav.</i></p>
velikost grafitu	6	
tvar grafitu	85 % VI, 15 % V	
podíl F/P	P 6, F 94	
volné karbidy	bez výskytu	
tavba 676: Y – blok s tloušťkou stěny 50 mm		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu	 <p><i>Obr. 60 Metalografie: tavba 676, blok 50, neleptaný stav.</i></p>	 <p><i>Obr. 61 Metalografie: tavba 676, blok 50, leptaný stav.</i></p>
velikost grafitu	7	
tvar grafitu	10 % V, 90 % VI	
podíl F/P	P 6, Fe 94	
volné karbidy	bez výskytu	

Tab. 32 Metalografické vyhodnocení tavby 679 – před tepelným zpracováním.

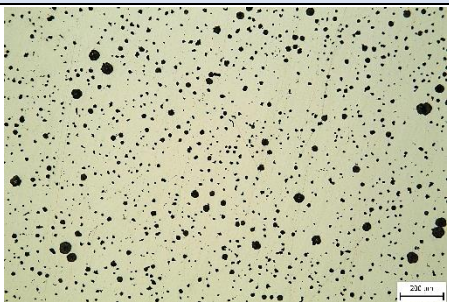
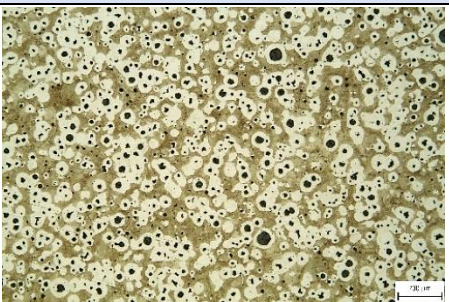
tavba 679: Y-blok s tloušťkou stěny 25 mm (před tepelným zpracováním)		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu	 <p><i>Obr. 62 Metalografie: tavba 679, blok 25, neleptaný stav, před TZ.</i></p>	 <p><i>Obr. 63 Metalografie: tavba 679, blok 25, leptaný stav, před TZ.</i></p>
velikost grafitu	7	
tvar grafitu	30 % V, 70 % VI	
podíl perlitu a feritu	P 20 Fe 80	
volné karbidy	bez výskytu	

U tavby 679 byl v kovu po natavení zvýšený podíl manganu (0,355 %, viz příloha 4.2) Na základě toho byl stanoven předpoklad, že bude v matrici zvýšený podíl perlitu, což metalografický výbrus potvrdil (*obr. 63*). Obsah perlitu byl na základě etalonů subjektivně odhadnutý na 20 %. Jelikož bylo cílem vyrobit litinu s převážně feritickou strukturou, nebyly dále prováděny další metalografické výbrusy, ale bylo nejprve provedeno feritizační žíhání (průběh je znázorněn v grafu na *obr. 28 – str. 43*). Až následně byly provedeny další metalografické výbrusy z dané tavby pro obě tloušťky stěn Y-bloků (viz *tab. 33*).

Tab. 33 Metalografické vyhodnocení tavby 679 – po tepelném zpracování.

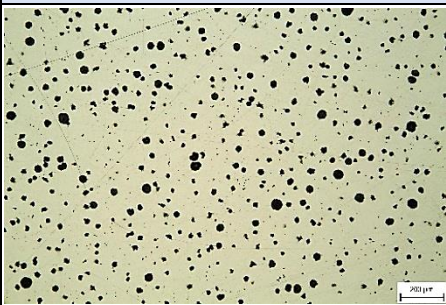
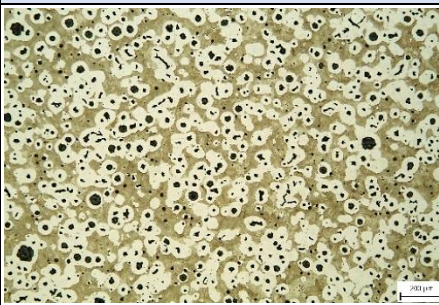
<b>tavba 679: Y – blok s tloušťkou stěny 25 mm (po tepelném zpracování)</b>		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu	 <p><i>Obr. 64 Metalografie: tavba 679, blok 25, neleptaný stav, po TZ.</i></p>	 <p><i>Obr. 65 Metalografie: tavba 679, blok 25, leptaný stav, po TZ.</i></p>
velikost grafitu	6	
tvar grafitu	15 % V, 85 % VI	
podíl F/P	P6, Fe 94	
volné karbidy	bez výskytu	
<b>tavba 679: Y – blok s tloušťkou stěny 50 mm po tepelném zpracování</b>		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu	 <p><i>Obr. 66 Metalografie: tavba 679, blok 50, neleptaný stav, po TZ.</i></p>	 <p><i>Obr. 67 Metalografie: tavba 679, blok 50, leptaný stav, po TZ.</i></p>
velikost grafitu	6	
tvar grafitu	25 % V, 75 % VI	
podíl F/P	P 0, Fe	
volné karbidy	bez výskytu	

Tab. 34 Metalografické vyhodnocení tavby 710.

tavba 710: Y-blok s tloušťkou stěny 25 mm		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu		
	<i>Obr. 68 Metalografie: tavba 710, neleptaný stav.</i>	<i>Obr. 69 Metalografie: tavba 710, leptaný stav.</i>
velikost grafitu	7	
tvar grafitu	15 % V, 85 % VI	
podíl perlitu a feritu	P 45, Fe 55	
volné karbidy	bez výskytu	

U 710 tavby byl podíl perlitu 45 %. Zřejmě to způsobil vyšší podíl manganu (0,311 %) a rychlé ztuhnutí kovu. Vzorek byl odebrán z rozváděcího kanálu vtokové soustavy. Vzorky by bylo vhodné feritizačně žíhat (nebylo provedeno).

Tab. 35 Metalografické vyhodnocení tavby 711.

tavba 711: Y – blok s tloušťkou stěny 25 mm		
vzorek	neleptaný stav	leptaný stav
snímek z mikroskopu (zvětšení 100x)		
	<i>Obr. 70 Metalografie: tavba 711, neleptaný stav.</i>	<i>Obr. 71 Metalografie: tavba 711, leptaný stav.</i>
velikost grafitu	7	
tvar grafitu	10 % V, 90 % VI	
podíl perlitu a ferit	P 45, F 55	
volné karbidy	bez výskytu	

U tavby 711 byly výsledky prakticky srovnatelné s tavbou 710. Podíl perlitu ve struktuře činil 45 %. Zřejmě to způsobil vyšší podíl manganu (0,29 %) a rychlé ztuhnutí kovu. Vzorek byl odebrán ze struskového kanálu vtokové soustavy. Stejně jako u tavby 710 se jednalo o komerční výrobu, kde zákazník nepožadoval TZ, a proto nebyly odlitky feritizačně žihány.

## 4 TAVBY PROVEDENÉ V PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH SLÉVÁRNY ERNST LEOPOLD

Experimenty provedené ve slévárně VUT v Brně byly podkladem k experimentu v provozních podmínkách blanenské slévárny EL. Ve slévárně byla vybraná značka litiny (EN GJS-400-15(18)-RT) vyráběna na elektrické obloukové peci. Jednalo se celkem o dvě zkušební tavby. První tavba vycházela ze zavedených výrobních postupů, druhá tavba byla vedena podle změn navržených v rámci vlastní diplomové práce. Hlavním cílem bylo ověřit, jaký bude vliv sníženého podílu surového železa na mechanické vlastnosti a vnitřní strukturu litiny v provozních podmínkách současně s ohledem na ekonomické hledisko.

Tavba probíhala na obloukové peci OTO 5. Její kapacita je 5–7 tun. Jedná se o pec se zásaditou vyzdívkou. Tavba probíhala podle následujícího postupu:

- nasazení vsázky,
- roztavení,
- analýza chemického složení,
- dolegování, nauhličování,
- odpich kovu.

Po ukončení tavby byl kov modifikován (modifikátor VL 63) a očkován (očkovadlo SB 5) v pánvi polévací metodou. Následně byly odlity komerční odlitky a blok tloušťky 50 mm, ze kterého byly následně provedeny mechanické zkoušky a metalografické hodnocení. Během tavby byla sledována spotřeba elektrické energie, množství použitých feroslitin a nauhličovadla. Tyto položky byly následně zahrnuty v ekonomickém zhodnocení. V *tab. 36* jsou uvedeny základní vstupní materiály pro obě prováděné tavby (019 a 020). Je zřejmé, že hmotnosti taveb byly 5,00 t a 5,35 t. V *tab. 36* je také uvedeno přibližné chemické složení po natavení a požadované chemické složení po modifikaci.

*Tab. 36* Vsázky pro tavby na EOP (stávající druhování a druhování se sníženým podílem SŽ).

tavba č. 019: stávající stav						
materiál	~ podíl [%]	hmotnost [kg]	chemické složení po roztavení			
surové železo	55	2600	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]
vratný materiál	40	2200	~3,8	~0,1	~1,3	~0,025
ocelový odpad	5	200	požadované chemické složení po modifikaci			
nauhličovadlo	-	-	~3,7	max. 0,2	~2,4	max. 0,010
<b>součet</b>		<b>5000</b>				
tavba č. 020: druhování se sníženým podílem SŽ						
materiál	~ podíl [%]	hmotnost [kg]	chemické složení po roztavení			
surové železo	35	1800	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]
vratný materiál	40	2200	~3,5	~0,15	~1,3	~0,032
ocelový odpad	25	1300	požadované chemické složení po modifikaci			
nauhličovadlo	1	55	~3,7	max. 0,2	~2,4	max. 0,010
<b>součet</b>		<b>5350</b>				

Jak z *tab. 36* vyplývá, nové druhování (tavba č. 020) počítá se sníženým podílem surového železa z 55 % na cca 35 %. Chemické složení kovu po roztavení vsázky počítalo s uhlíkem okolo 3,5 %, kov byl během tavby nauhličen na koncentraci uhlíku 3,7 %. Ve variantě se sníženým podílem SŽ a vyšším podílem ocelového odpadu se proti stávajícímu stavu

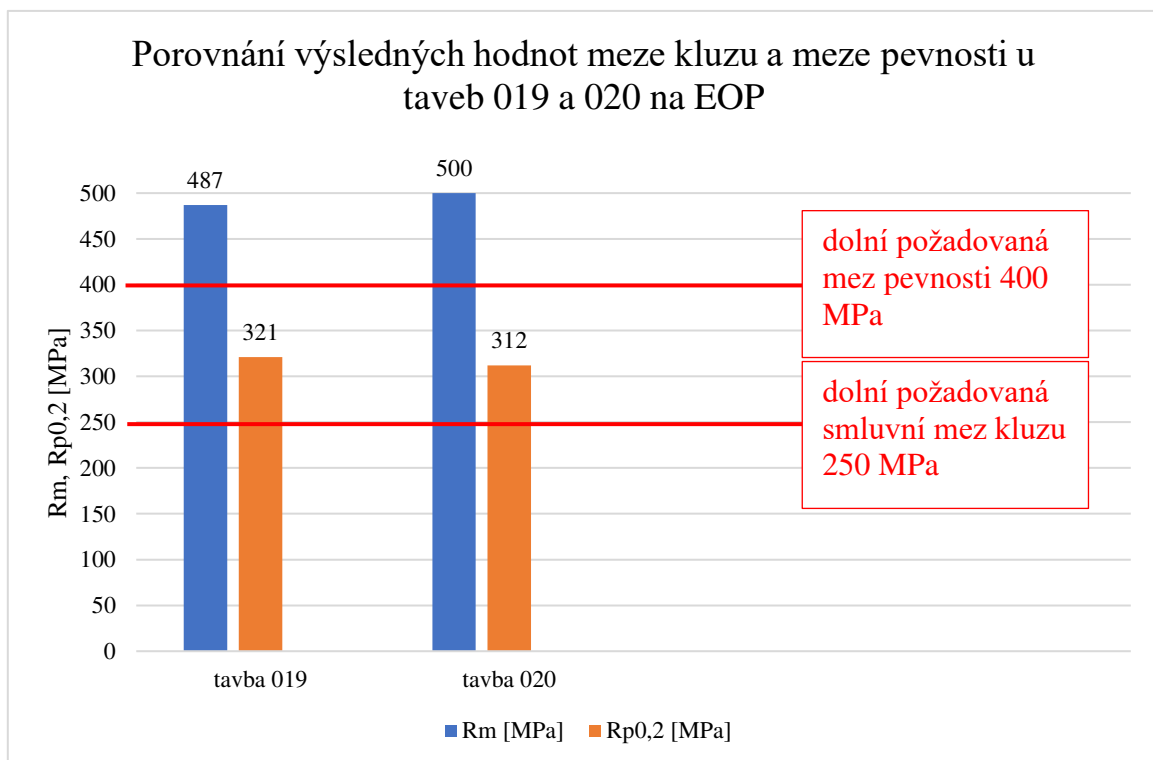
předpokládal vyšší podíl manganu a síry. Požadovaná koncentrace Mn byla max. 0,2 %, tudíž se předpokládalo, že budou obě tavby v toleranci.

Z odlitých bloků byly vyrobeny zkušební tyče pro tahovou zkoušku o průměru 20 mm. Níže jsou v *tab. 37* uvedeny výsledné hodnoty z provedených tahových zkoušek. Tahová zkouška byla provedena ve slévárně EL.

*Tab. 37* Výsledky tahových zkoušek z taveb 019 a 020.

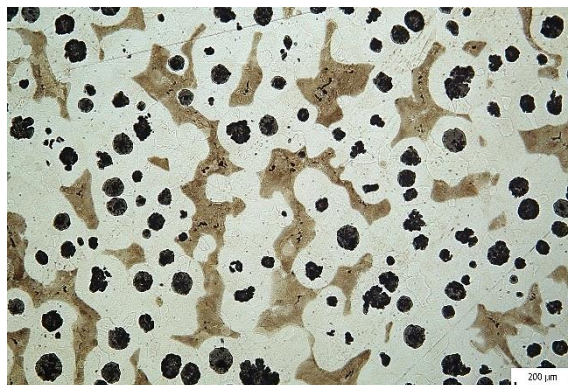
výsledky tahové zkoušky				
tavba	označení vzorku	Rm [MPa]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	A [%]
019	Y4-019	487	321	16,7
020	Y4-020	500	313	15,1

Výsledky z *tab. 37* jsou na *obr. 72* graficky porovnány a zhodnoceny. Je zřejmé, že obě tavby dosahují meze pevnosti s dostatečnou rezervou. Zřejmě je to dáno větším podílem perlitu ve struktuře, jak ukázaly metalografické výbrusy (*obr. 73* a *obr. 74*). Dolní mez kluzu u vybrané značky litiny je stanovena normou na 250 MPa. Z grafu na *obr. 72* je patrné, že i tyto hodnoty překročily požadavek s patřičnou rezervou. Z *tab. 37* také vyplývá, že minimální požadovanou tažnost 15 % obě tavby překročily, byť s minimální rezervou. To souvisí s větším podílem perlitu ve struktuře, vzorky proto vykazují nižší tažnost (a vyšší pevnost).

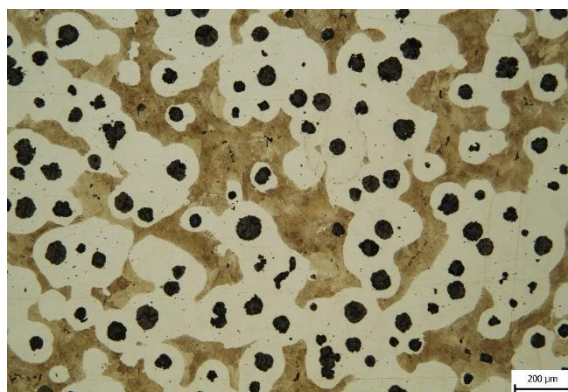


*Obr. 72* Grafické zhodnocení tahových zkoušek u taveb 019 a 020.

Na *obr. 73* a *obr. 74* jsou vnitřní struktury vyrobeného kovu. Vzorky byly odebrány ze zkušební tyče pro tahovou zkoušku. Na *obr. 73* je podíl feritu ~85 % (perlitu ~15 %), na *obr. 74* je podíl feritu ~75 % (perlitu ~25 %).



*Obr. 73* Metalografický výbrus: tavba 019, blok 50, leptaný stav (nital 3%).



*Obr. 74* Metalografický výbrus: tavba 020, blok 50, leptaný stav (nital 3%).

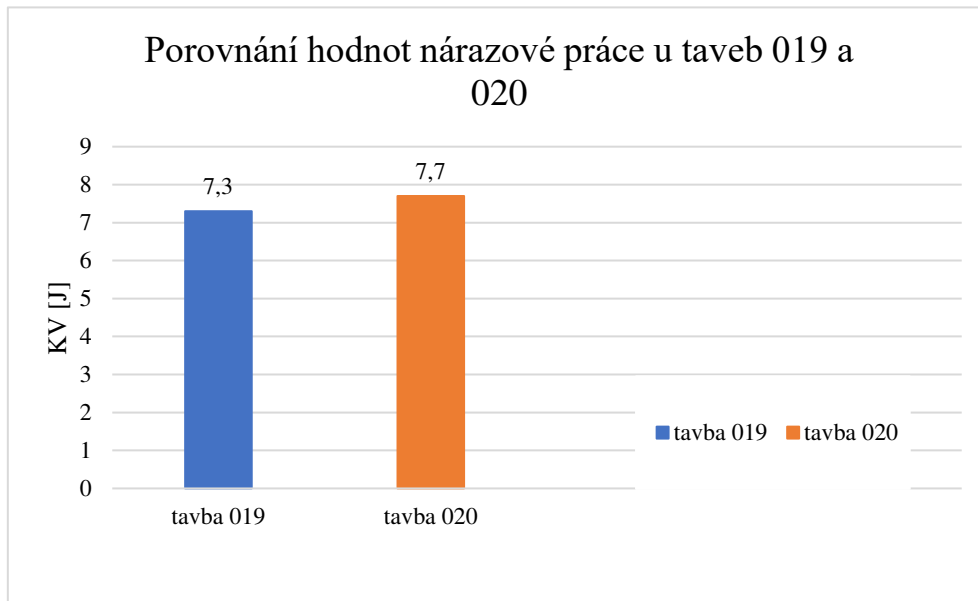
V *tab. 38* jsou uvedeny výsledné hodnoty z provedených zkoušek rázem v ohybu. Vzorky byly odebrány z odlitého zkušební bloku tloušťky 50 mm. Rozměry zkušebních tyčí byla 10 mm x 10 mm x 55 mm. zkouška byla provedena za pokojové teploty (20 °C) v laboratoři slévárny EL. Následně jsou hodnoty graficky porovnány na *obr. 75* (následující strana).

*Tab. 38* Výsledné hodnoty ze zkoušek rázem v ohybu pro tavby 019 a 020.

výsledky zkoušky rázem v ohybu			
tavba č. 019		tavba č. 020	
označení vzorku	KV [J]	označení vzorku	KV [J]
Y4-019-a	7,0	Y-020-a	7
Y4-019-b	8,0	Y-020-b	8
Y4-019-c	7,0	Y-020-c	8
<b>průměr</b>	<b>7,3</b>	<b>průměr</b>	<b>7,7</b>
směrodatná odchylka	0,5	směrodatná odchylka	0,5



Z grafického hodnocení na obr. 75 je zřejmé, že průměrné hodnoty nárazové práce z taveb 019 a 020 se lišily pouze o 0,4 J. Hodnoty nárazové práce jsou poměrně nízké, což pravděpodobně souvisí s vyšším podílem perlitu ve struktuře. Lze konstatovat, že snížený podíl SŽ ve vsázce u sledovaných taveb však neovlivňoval velikost nárazové práce.



Obr.75 Porovnání výsledných hodnot ze zkoušky rázem v ohybu u taveb 019 a 020.

## 5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Na základě dat získaných během experimentů bylo provedeno ekonomické zhodnocení taveb LKG na elektrické obloukové a indukční peci. Ekonomické zhodnocení porovnává procentuální náklady na výrobu LKG z hlediska druhování a použitých tavících agregátů.

Podobně, jako uvádí doc. Ing. Václav Kafka, CSc. ve své práci [30], byly v ekonomickém zhodnocení uvažovány tzv. neúplně vlastní náklady (NVN). V praxi to znamená, že výpočetní vzorec pro kalkulaci zahrnuje náklady na:

- spotřebovanou elektrickou energii,
- kovovou vsázku,
- feroslitiny, očkovač a modifikátor,
- nahličovadlo,
- grafitové elektrody (u EOP).

Zároveň je nutné zmínit, že nebyly v ekonomickém zhodnocení uvažovány náklady na mzdy pracovníků nebo velikost tavících agregátů (čím vyšší hmotnost tavby, tím nižší spotřeba el. energie na 1 t kovu). V tab. 39 jsou uvedeny jednotlivé vstupní položky, se kterými bylo kalkulováno v ekonomickém zhodnocení (el. energie, kovová vsázka...). V tabulce jsou dále uvedeny varianty možné výroby LKG:

- na EOP – varianta I: A – vyšší podíl SŽ (~55 %), B – snížený podíl SŽ (~35 %),
- na EIP – varianta II: A – vyšší podíl SŽ (~30 %), B – bez podílu SŽ (syntetická LKG).

*Varianta IB* přibližně odpovídá svým druhováním *variantě IIA*. Varianty s vyšším podílem SŽ nepočítají s nahličováním, jelikož uhlík je dodán do vsázky v SŽ. Je zřejmé, že u EIP nefigurují ve výpočtu grafitové elektrody a nebylo zde uvažováno ani SiC. Vypočtené úspory nákladů vycházely z cen poskytnutých firmou EL dne 12. 5. 2022. Je tedy zřejmé, že se výsledky mohou v závislosti na situaci na trhu v průběhu času měnit. Z důvodu konkurenčního prostředí je ekonomická bilance vypracována v procentuálně.

Tab. 39 Tabulka vstupních položek u jednotlivých taveb.

vstupní položky		EOP		EIP	
		varianta IA: druhování s cca 55 % SŽ	varianta IB: druhování s cca 35 % SŽ	varianta IIA: ekvivalent tavby 679	varianta IIB: ekvivalent taveb 710, 711
elektrická energie*		•	•	•	•
kovová vsázka	surové železo	•	•	•	•
	ocelový odpad	•	•	•	•
	vratný materiál	•	•	•	•
feroslitiny, očkovač, modifikátor	FeSi75	•	•	•	•
	SiC70	•	•	-	-
	modifikátor	•	•	•	•
	očkovač	•	•	•	•
nahličovadlo		-	•	-	•
grafitová elektroda		•	•	-	-

\*U EOP byla zvažována spotřeba elektrické energie při teplém a studeném startu.

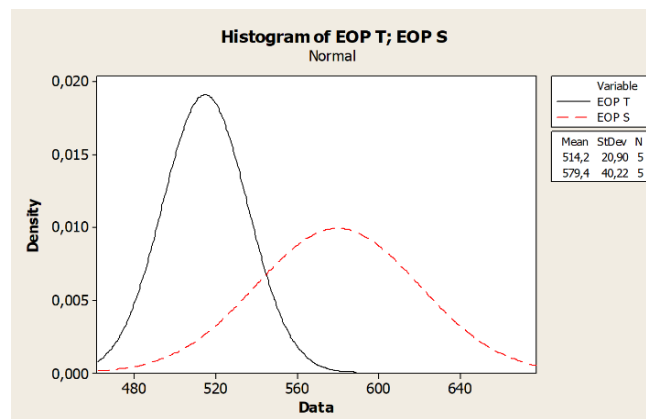
Spotřeba elektrické energie na EIP byla odhadnuta na základě spotřeb elektrické energie získaných z některých sléváren. Takto odhadnutá spotřeba činila u EIP 550 kWh/t. U výroby

syntetické litiny byla uvažována spotřeba 600 kWh/t z důvodu delší doby tavby. Do těchto hodnot by se tavby měly svou spotřebou bezpečně vejít.

Spotřeba na EOP byla určena na základě dat poskytnutých slévárnou EL. Byla provedena analýza spotřeb el. energie u taveb provedených jako:

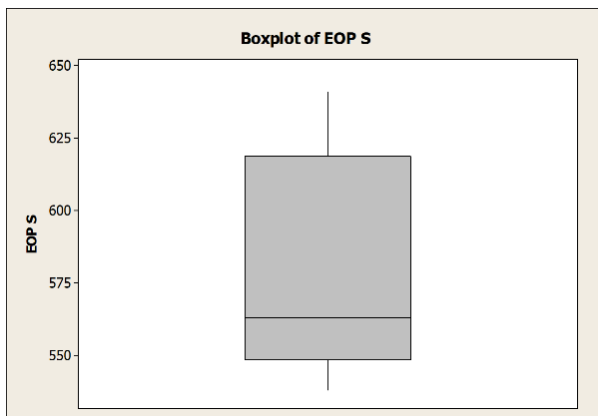
- první na peci – tzv. studený start, kde se předpokládá vyšší spotřeba el. energie z důvodu ohřevu vyzdívky,
- druhých a třetích na peci – tzv. teplé tavby, kde již nedochází k tak intenzivnímu ohřevu vyzdívky, a proto se předpokládá nižší spotřeba el. energie než u studeného startu.

Pro obě varianty byla zpracována data z pěti taveb, kdy byla z hmotnosti tavby a celkové spotřeby el. energie vypočtena spotřeba el. energie na 1 tunu litiny. Graficky jsou spotřeby porovnány na *obr. 76*.

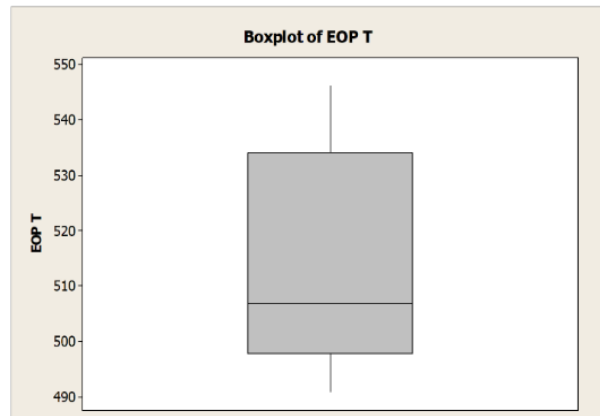


*Obr. 76* Histogram rozdělení dat u teplých taveb a studených startů.

Z histogramu je zřejmý rozptyl naměřených hodnot a také rozdíl ve spotřebě el. energie. Je zřejmé, že při teplém startu mají hodnoty nižší rozptyl. Tato data byla ještě před analýzou prověřena metodou boxplot (analýza odlehlých pozorování). V žádném ze souboru dat studených startů a teplých taveb nebyly nalezeny žádné odlehlé hodnoty, viz *obr. 77* a *obr. 78*.



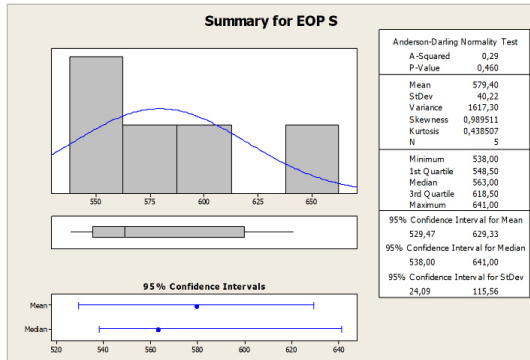
*Obr. 77* Boxplot pro data ze studených startů.



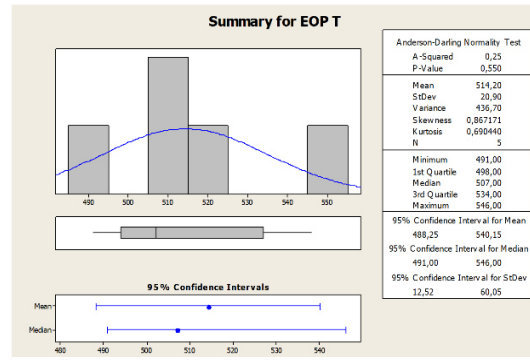
*Obr. 78* Boxplot pro data z teplých taveb.

Na *obr. 79* a *obr. 80* (následující strana) jsou uvedena sumární statistická data ke studeným startům a teplým tavnám. Jsou zde uvedeny střední hodnoty, medián a další významné statistické údaje. Při porovnání obou analýz je zřejmé, že se hodnoty intervalových odhadů průměrných spotřeb se vzájemně překrývají, a proto není mezi daty statisticky významný rozdíl. Střední hodnota spotřeby el. energie u studených startů byla 579,40 kWh/t, u teplých taveb byla střední hodnota 514,20 kWh/t. Průměrná hodnota z těchto určených středních

hodnot je přibližně 550 kWh/t. Právě s touto hodnotou bylo v ekonomickém hodnocení u *varianty IA* kalkulováno. U *varianty IB* byla doba tavby o cca 30 minut delší z důvodu nauhličování než u *varianty IA* s vyšším podílem SŽ. Z tohoto důvodu byla spotřeba el. energie pro *variantu IB* navýšena o ~7 % a bylo tedy kalkulováno se spotřebou 590 kWh/t. Lze předpokládat, že pokud by byla uvažována veškerá spotřebovaná elektrická energie týkající se obsluhy u obou typů pecí (čerpadla, chlazení, ovládání atd.), bude spotřeba u EOP vyšší než u EIP.



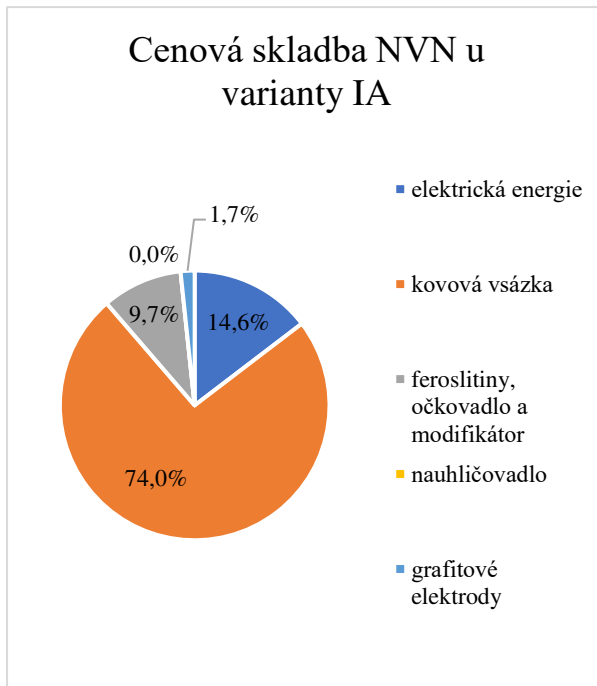
Obr. 79 Souhrnná statistická data k hodnoceným studeným tavbám.



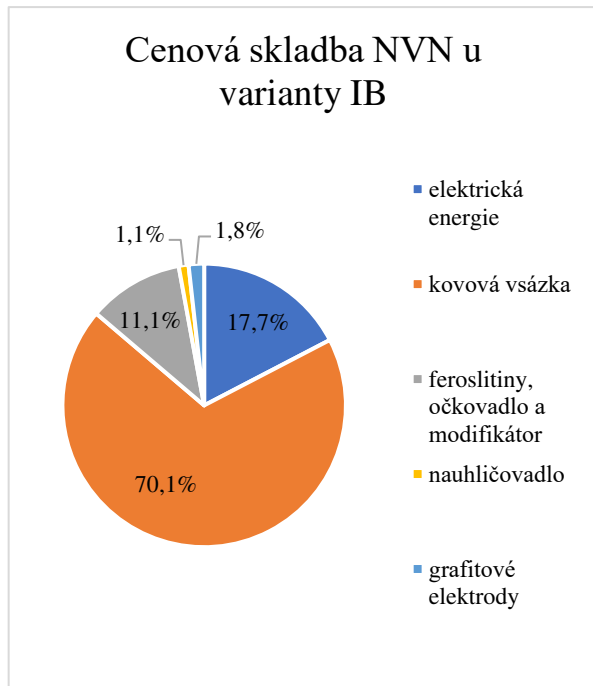
Obr. 80 Souhrnná statistická data k hodnoceným teplým tavbám.

Na obr. 81 až obr. 84 jsou jednotlivé *varianty (IA, IB, IIA, IIB)* porovnány z hlediska skladby NVN. Každý graf představuje celkové NVN u dané *varianty*. Tyto NVN jsou následně rozděleny podle podílu na celkové ceně NVN. Rozdělení v grafech vychází z tab. 39. Např.: na obr. 81 tvoří kovová vsázka (zahrnující surové železo, ocelový odpad a vratný materiál) 74 % z celkových NVN pro *variantu IA*.

Na obr. 81 a obr. 82 jsou porovnány *varianty* na EOP. Je zřejmé, že snížením podílu SŽ u *varianty IB* dojde ke snížení nákladů na kovovou vsázku o 3,9 %. Následně ale vzroste podíl nauhličovadla a elektrické energie proti *variantě I*.

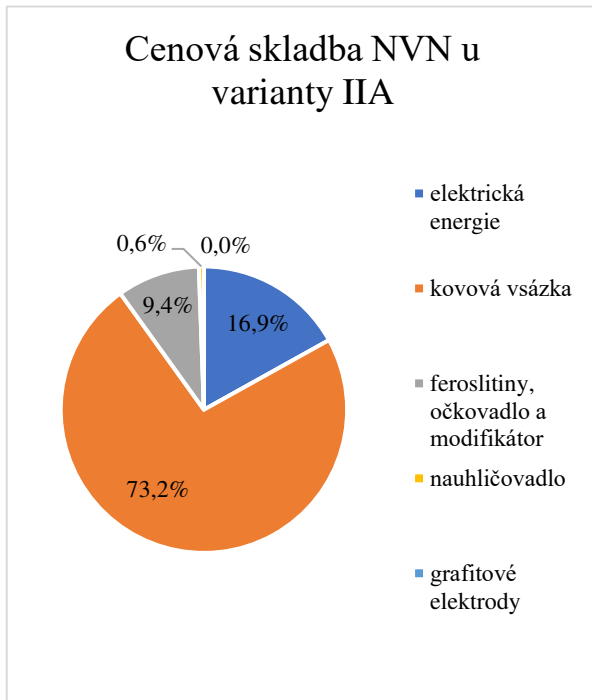


Obr. 81 Cenová skladba varianty IA.

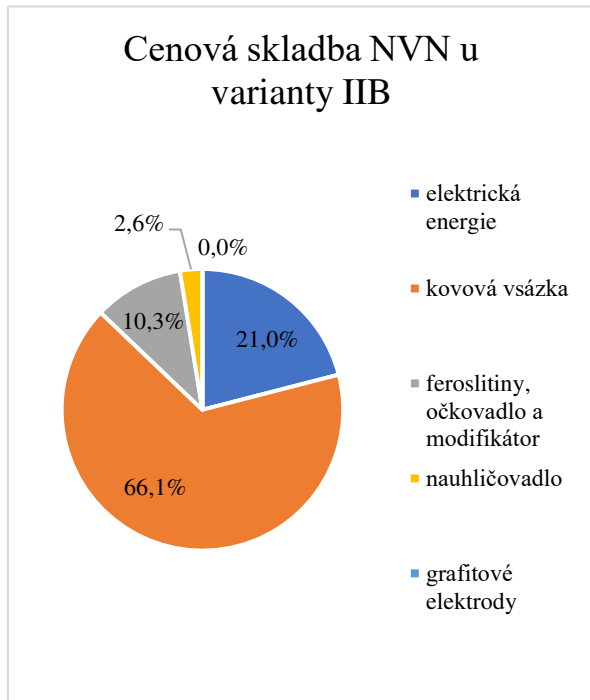


Obr. 82 Cenová skladba varianty IB.

Na obr. 83 a obr. 84 jsou porovnány varianty pro EIP. Varianta IIA je z hlediska druhování srovnatelná s variantou IB (podíl SŽ 30-35 %). U varianty IIB tvoří náklady na kovovou vsázku ~66 %, jelikož se zde neuvažuje surové železo ve sázce. Uhlík je dodáván v průběhu tavby pomocí nauhličovadla, důsledkem je tedy nárůst podílu nákladů za nauhličovadlo až na 2,6 %. Zároveň roste podíl nákladů na spotřebovanou elektrickou energii.

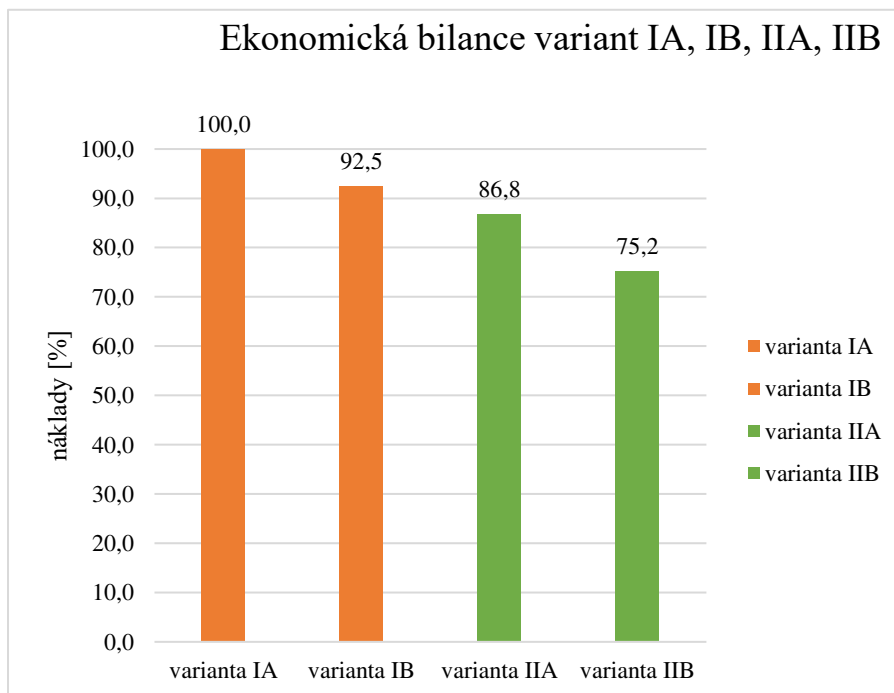


Obr. 83 Cenová skladba varianty IIA.



Obr. 84 Cenová skladba varianty IIB.

Na obr. 85 jsou porovnány NVN mezi jednotlivými variantami. Oranžově jsou rozlišeny tavby vedené na EOP, zeleně tavby na EIP. Varianta IA představuje současný způsob výroby. Jedná se tedy o 100 % vynaložených nákladů. K variantě IA jsou vztahovány náklady zbývajících variant. Níže je ekonomická bilance rozebrána.



Obr. 85 Ekonomická bilance jednotlivých variant.

---

**Variantá IA**

Jedná se o dosud užívanou variantu druhování a vedení tavby na EOP pro výrobu EN GJS-400-15. Jedná se o nejméně ekonomicky výhodnou variantu s vysokým podílem SŽ.

**Variantá IB**

Tato varianta uvažuje situaci, kdy by slévárna dále vyráběla LKG na EOP. Druhování kovové vsázky počítá se sníženým podílem SŽ z cca 55 % na cca 35 %. Tímto způsobem výroby se předpokládá snížení nákladů až o 7,5 %. Výhodou *varianty II* je, že ji lze v provozu slévárny aplikovat téměř okamžitě. Je však nutné počítat s delší dobou tavby a s tím spojenými vyššími osobními náklady. Zároveň v případě zavedení této varianty bude nutné zajistit vyšší množství jakostního ocelového odpadu, což může být logistický problém.

**Variantá IIA**

Jedná se o případ výroby LKG na EIP, kterou však slévárna EL nedisponuje. Tato varianta tedy slouží k odhadu možných úspor a případné návratnosti investice do nového tavícího agregátu. Tato varianta uvažuje podíl SŽ okolo 30 %, jako je tomu také u *varianty IB*. Z grafu vyplývá, že proti *variantě IA* (současně využívané) se jedná o úsporu nákladů až o 13,2 %. Při porovnání s *variantou IB*, kterou lze aplikovat ve slévárně prakticky ihned, se jedná o úsporu cca 5 %. Návratnost této varianty by byla dána (mj.) výší investice a následně velikostí tavícího agregátu a objemem výroby LKG ve slévárně EL.

**Variantá IIB**

Jedná se o výrobu syntetické LKG na EIP. I přesto, že nulový podíl SŽ ve vsázce vede k vyšší spotřebě nahličovadla a elektrické energie (*obr. 84*), je *varianta IIB* nejvíce hospodárným způsobem výroby GJS z hlediska finančních nákladů. V porovnání s *variantou I* úspora nákladů činí u sledované tavby až 24,8 %. Stejně jako u *varianty IIA* by byla pro použití této varianty nutná investice do nového tavícího agregátu. Návratnost investice by opět závisela jednak na její výši a následně (mj.) na velikosti tavícího agregátu a na objemu výroby LKG v EL.

---

## ZÁVĚR

Vyrábět v dnešní době standardizovanou litinu s kuličkovým grafitem s požadovanými vlastnostmi není v zásadě až tak složitá záležitost. Z hlediska cenové konkurenceschopnosti však dnešní situace na trhu klade velmi náročné překážky. Skokový nárůst cen např. u kovových materiálů, energií, dopravy a dalšího velmi negativně ovlivňuje konečnou cenu výrobků, a to nejen ve slévárnách. Tlak na konečnou cenu ze strany zákazníka vede k nižší ziskovosti. Jelikož zvyšování marží nevede vždy k oboustranné spokojenosti firmy a zákazníka, je nutné hledat úsporná řešení ze strany vstupních nákladů.

Cílem této práce bylo navrhnout technologii výroby LKG na EOP s nižšími výrobními náklady. Zároveň měly být dodrženy požadavky na vnitřní jakost i mechanické vlastnosti litiny. Tato práce přináší konkrétní řešení a porovnává mezi sebou celkem 4 aplikovatelné varianty výroby LKG.

Úspora nákladů v této práci vychází z tzv. neúplných vnitřních nákladů. Jedná se o vybrané vstupní položky. Je tedy zřejmé, že výpočet nezahrnuje např. náklady na mzdy, nakládání s odpady atd. U EIP je potřeba k obsluze menší počet pracovníků než pro obsluhu EOP, je zde tedy další prostor pro úsporu nákladů. Zároveň by bylo vhodné prověřit celkovou spotřebu elektrické energie u EOP a zaměřit se na celkovou skutečnou spotřebu pece.

Z výsledků práce vyplývá, že současný způsob výroby LKG ve slévárně EL se opravdu jeví jako nejméně ekonomicky výhodný. Výroba LKG na EOP s podílem surového železa vyšším než 50 % je zbytečně nákladná. Vyšší podíl SŽ s sebou může nést jisté výhody, metalurgicky jde o jednodušší výrobní postup, kov není nutné nauhličovat, doba tavby je kratší až o cca 30 minut.

Druhování vsázky na EOP se sníženým podílem surového železa a vyšším podílem ocelového odpadu zásadně neovlivňuje výslednou jakost litiny. LKG vyrobená touto cestou (jak na EIP, tak na EOP) splňuje požadované mechanické i strukturní požadavky. Pokud by ve slévárně EL pokračovala výroba LKG na EOP, doporučuje se změnit druhování vsázky a snížit podíl surového železa na cca 30 % (*varianta IB*). Zde by byla předpokládaná úspora až 7,5 %.

Další snižování nákladů již počítá se změnou tavicího agregátu. Slévárna by musela přejít na výrobu LKG na EIP. V tomto případě by mohly být úspory nákladů ještě vyšší.

Optimální variantou z hlediska výrobních nákladů je výroba LKG na EIP formou syntetické litiny – tj. bez podílu SŽ ve vsázce. U syntetické litiny (*varianta IIB*) se v rámci experimentálních taveb bohužel z důvodu ředin v odebraných vzorcích nepodařilo ověřit splnění mechanických vlastností. Jakost vyrobených odlitků byla zcela vyhovující, ale nebyly u tavby odlity zkušební bloky. Mechanické vlastnosti byly stanoveny ze vzorků odebraných ze vtokových částí (struskovák). A proto obsahovaly výše uvedené řediny.

Nicméně je z praxe od jiných výrobců LKG známo, že i takový způsob výroby je možný. Samozřejmě je zde větší spotřeba nauhličovadla, dále je nutné optimalizovat modifikování a očkování kovu kvůli dosažení požadované jakosti. Zejména v tenkostěnných odlitcích ze syntetické litiny by však měly být problémy se strukturou a vlastnostmi minimální.

S ohledem na snížení nákladů téměř o čtvrtinu se jedná o velmi atraktivní alternativu k dosavadnímu způsobu výroby LKG na EOP ve slévárně EL.

Zavedení takové výroby LKG by pro slévárnu znamenalo investici v podobě nového tavicího agregátu včetně potřebného příslušenství. Výsledkem by však mohla být vyšší konkurenceschopnost s relativně krátkou návratností. Ta by však samozřejmě souvisela hlavně s výší investice, dále (mj.) s velikostí tavicího agregátu a objemem výroby LKG ve slévárně Ernst Leopold.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
2. SKOČOVSKÝ, Petr a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Grafitické litiny*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině EDIS, 2005. ISBN 80-8070-390-6.
3. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: Fakulta strojní VUT v Brně, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
4. ZÁDĚRA, Antonín, a . Diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C a jeho použití ve slévárenské praxi. In: BALCAR, Martin, Jarmila MALÁ, Zdeněk CARBOL, et al. *XXI. Celostátní školení tavičů a mistrů v oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem*. Žďár nad Sázavou, Svratka, 2013, s. 26-30. ISBN 978-80-02-02479-8.
5. HLOBIL, Albert. *Vliv olova a antimonu v litině na degradaci tvaru grafitu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021.
6. PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 3. Praha: STNL, 1981.
7. ROUČKA, Jaromír a Pavel SÝKORA. Tepelné zpracování grafitických litin. In: ELBEL, Tomáš, Milan HORÁČEK, Radovan KOPLÍK, Jaromír ROUČKA, František URBÁNEK, Edita BĚLEHRADOVÁ a Milada HAASOVÁ. *Slévárenská ročenka 2000*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2000, s. 125-140. ISBN 80-238-5151-9. ISSN 0231-7087.
8. KARSAY, Stephen I. *Ductile iron II: Quebec iron and titanium corporation*. Quebec: Sorel: QIT, 1971.
9. KAŇA, Václav. *Výzkum, optimalizace a zavedení výroby těžkých odlitků z vysokolegovaných litin*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012
10. OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina: Litina s kuličkovým grafitem* [online]. 2006, 70 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/storage/73/68188000/1651511859/8zP7IJU4C9epvDOvHhEYDQ/68188000.pdf>
11. HLAVINKA, Josef. Slévárenská výroba v ČR. *Slévárenství* [online]. 2019, 67(9-10), 368 [cit. 2022-05-15]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/RV6TW1TfPXwOshDe>
12. VĚCHET, Stanislav, Jan KOHOUT a Otakar BOKŮVKA. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-910-5.
13. ROUČKA, Jaromír, František KRISTOŇ a Jaroslav ZEZULA. *Metalurgie litin: Návod do cvičení*. 2. přepracované. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. ISBN 80-214-0396-9.
14. *Tvárná litina a její použití: Příloha časopisu slévárenství srpen 1993*. 1993. Brno: Svaz sléváren, 1993. ISSN 0037-6825.
15. ŠENBERGER, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK, Antonín ZÁDĚRA, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, 2008, 311 s. : il. ISBN 978-80-214-3632-9.
16. CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení /*. Brno: CERM, 2006, 256 s. ISBN 80-7204-456-7.
17. HENYCH, Ivo. Vývojové trendy v oblasti metalurgie litiny s kuličkovým grafitem. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ve spolupráci se Státním výzkumným ústavem materiálů v Brně, 1993, 1993(4.), 173-180. ISSN 0037-6825.
18. MERTA, Pavel. Výdusky indukčních pecí a jejich vliv na vyráběný sortiment. In: KAFKA, Václav, Ludvík MARTÍNEK, Zdeněk BŮŽEK, Jirí DOKOUPIL, Karel STRÁNSKÝ, Jaroslav ŠENBERGER a František URBÁNEK. *XVII. Celostátní školení: tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem*. 17. Žďár nad Sázavou: Obor Metalurgie ŽĎAS, a.s., Celostátní odborná komise tavení oceli na odlitky



- 
- při České slévárenské společnosti, Česká vědeckotechnická společnost ŽĎAS, 2005, s. 57-62. ISBN 80-02-01764-1.
19. SÝKORA, Pavel. Výroba litiny s kuličkovým grafitem z obloukových pecí a problematika modifikace a grafitizačního očkování. In: KAFKA, Václav, Ludvík MARTÍNEK, Jaromír OŠŤÁDAL a Jiří DOKOUPIL. *Sborník XIV. celostátního školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny na odlitky*. Žďár nad Sázavou: Divize Metalurgie, ŽĎAS, 1999, s. 34-46.
  20. ZEMÁNEK, Roman a Milan JÁNSKÝ. Základy teorie a praxe výroby LKG technologií injektáže plněných profilů. In: MARTÍNEK, Ludvík, Jarmila MALÁ, Martin BALCAR, et al. *XVIII. celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem*. Žďár nad Sázavou: Česká slévárenská společnost, 2007, s. 96-108. ISBN 978-80-02-01966-4.
  21. ROUČKA, Jaromír a Václav KAŇA. Očkování grafitických litin metodou in mould. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2019, 2019(9-10), 304-308. ISSN 0037-6825.
  22. *Ernst Leopold: O nás* [online]. Blansko, 2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://ernstleopold.cz/cs/#o-nas>
  23. KARSAY, Stephen. *Ductile Iron I: Quebec iron and titanium corporation*. Quebec: Sorel: QIT, 1967.
  24. *GEOPOL®: Technologie GEOPOL® – Ekologické a ekonomické řešení problémů ve slévárství* [online]. Holubice: SandTeam, 2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandteam.cz/technologie-geopol/?fbclid=IwAR3fJTFxmbzb6R28QfQOxHNgGV19PPq1M-wW0gWhnHmGVyVmeEMVXaKxkl0>
  25. DIN 50125. *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: DIN Deutsches Institut, 2009.
  26. *Tvárná litina 42 2304 feritická: Kategorie: 4223 - Litiny s kuličkovým grafitem. Materiálové listy*. 3. Praha: Československá státní norma, 1994.
  27. ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály: Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1.: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
  28. *DiaDuo-2, 1 µm barva bílá, 500 ml (40600036): Struers Spotřební materiál* [online]. Detroit Rd. Westlake: Struers, 2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: - [shop.struers.com/CZ/CS/products/Polishing/Diamond\\_Suspensions/DiaDuo-2\\_1\\_m\\_White\\_500\\_ml\(40600036\).aspx](http://shop.struers.com/CZ/CS/products/Polishing/Diamond_Suspensions/DiaDuo-2_1_m_White_500_ml(40600036).aspx)
  29. ČSN EN ISO 945-1 (420464). *Mikrostruktura litin: Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
  30. KAFKA, Václav, Jaroslav ŠENBERGER, František URBÁNEK a Radim URBAN. *Možnosti nákladových úspor při výrobě tekuté fáze oceli a litin v českých slévárnách*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2006. ISBN 80-02-01807-9.
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symboly/zkratky

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
A <sub>1,1</sub> , A <sub>1,2</sub>	kritické teploty	[°C]
C <sub>E</sub>	uhlíkový ekvivalent	[-]
E	elasticita	[GPa]
EIP	elektrická indukční pec	[-]
EL	Ernst Leopold s.r.o.	[-]
EOP	elektrická oblouková pec	[-]
F	ferit	[-]
FCC	plošně středěná kubická mřížka	[-]
F <sub>m</sub>	síla zatížení	[N]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
HCP	šesterečná mřížka	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
KV	nárazová práce	[J]
KVZ	kovy vzácných zemin	[-]
L <sub>0</sub>	počáteční délka měření	[mm]
L <sub>c</sub>	zkoušená délka	[mm]
LKG	litina s kuličkovým grafitem	[-]
LLG	litina s lupínkovým grafitem	[-]
L <sub>t</sub>	celková délka zkušební tyče	[mm]
NVN	neúplné vlastní náklady	[-]
OC	ocelový odpad	[-]
P	perlit	[-]
R <sub>m</sub>	mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	smluvní mez kluzu	[MPa]
SŽ	surové železo	[-]
VR	vratný materiál	[-]
VUT	Vysoké učení technické v Brně	[%]
d <sub>0</sub>	průměr vzorku	[mm]
d <sub>1</sub>	metrický ISO-závit	[-]
h	výška hlavy	[mm]
l	délka	[mm]
r	poloměr/rádus	[mm]
t	tloušťka	[mm]
v	výška	[mm]
w	šířka vzorku	[mm]
α-Fe	tuhý roztok železa α	[-]
γ-Fe	tuhý roztok železa γ	[-]
ΔC	pokles uhlíku	[MPa]
ΔS	rozdíl obsahu síry před a po modifikaci	[%]
η <sub>Mg</sub>	využití hořčíku	[%]
%i	koncentrace i-tého prvku	[%]

$\%Mg_{VL63}$	koncentrace hořčíku v předslitině	[%]
$\%Mg_{využ}$	využití hořčíku, použitého k modifikaci	[%]
$\%Mg_{zbyt}$	požadovaný obsah zbytkového hořčíku	[%]
$\%Si_{FeSiMg}$	koncentrace křemíku v předslitině	[%]
$\%Si_{mod}$	křemík z modifikace	[%]
$\%Si_{očk}$	křemík z očkování	[%]
$\%Si_{SB5}$	koncentrace křemíku v očkovadle	[%]
$\%VL 63$	množství použité předslitiny	[%]

---

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 atestový list – očkovač SB 5 (ASK Chemicals)  
Příloha 2 atestový list – modifikátor VL 63 (ASK Chemicals)  
Příloha 3 protokol o tavnosti 676  
Příloha 3.1 úvodní list  
Příloha 3.2 chemické složení po natavení  
Příloha 3.3 chemické složení v pánvi  
Příloha 4 protokol o tavnosti 679  
Příloha 4.1 úvodní list  
Příloha 4.2 chemické složení po natavení  
Příloha 4.3 chemické složení v pánvi  
Příloha 5 protokol o tavnosti 710  
Příloha 5.1 úvodní list  
Příloha 5.2 chemické složení po natavení  
Příloha 5.3 chemické složení v pánvi  
Příloha 6 protokol o tavnosti 711  
Příloha 6.1 úvodní list  
Příloha 6.2 chemické složení po natavení  
Příloha 6.3 chemické složení v pánvi  
Příloha 7 protokol s výslednými hodnotami a grafy z tahové zkoušky – vzorky z tavnosti 676 (bloku 25)  
Příloha 8 protokol s výslednými hodnotami tahové zkoušky – vzorky z tavnosti 676 (blok 50), 679 (blok 25 a 50)  
Příloha 8.1 výsledky:  
- vzorky z tavnosti 676, blok 50  
- vzorky z tavnosti 679, blok 25 a blok 50  
Příloha 8.2 grafy:  
- vzorky z tavnosti 676, blok 50  
- vzorky z tavnosti 679, blok 25 a blok 50  
Příloha 9 protokol s výslednými hodnotami tahové zkoušky – vzorky z tavnosti 710 a 711  
Příloha 9.1 výsledky:  
- vzorky z tavnosti 710 a 711  
Příloha 9.2 grafy:  
- vzorky z tavnosti 710 a 711

Příloha 1  
 atestový list – očkovačlo SB 5 (ASK Chemicals)

**ASKCHEMICALS**  
 We advance your casting



ASK Chemicals Metallurgy GmbH Fabrikstraße 6 D-84379 Untereufkirchen

ASK Chemicals Czech s.r.o.  
 Továrni 7  
 CZ-643 00 BRNO-CHRLICE

08.04.2021

**C e r t i f i k á t**  
 v souladu s mezinárodními normami jakosti (např. DIN EN 10204, 3.1)

Položka dodávky 80182221 000007 z 08.04.2021  
 21010689 SB 5 2-6 MMBIG01000

Šarže 192121  
 Množství 3 BIG

Atribut		Jednotka	Hodnota	Dolní mez	Horní mez
SI	Obsah křemíku v %	%	69	65	73
AL	Obsah hliníku v %	%	1,4	1,0	1,5
CA	Obsah vápníku v %	%	1,2	0,8	1,5
BA	Obsah bária v %	%	2,4	2,0	3,0

Příloha 2  
 atestový list – modifikátor VL 63 (ASK Chemicals)

**ASKCHEMICALS**  
 We advance your casting



ASK Chemicals Metallurgy GmbH Fabrikstraße 6 D-84379 Unsenmueckichen

ASK Chemicals Czech s.r.o.  
 Tovární 7  
 CZ-643 00 BRNO-CHRLICE

05.11.2021

**C e r t i f i k á t**  
 v souladu s mezinárodními normami jakosti (např. DIN EN 10204, 3.1)

Položka dodávky 80203680 000001 z 04.11.2021

21010668

**VL 63 (O) BC/1 - 10 MMBIG01000**

Šarže 215387\_02  
 Množství 3 BIG

Atribut		Jednotka	Hodnota	Dolní mez	Horní mez
SI	Obsah křemíku v %	%	46	43	47
AL	Obsah hliníku v %	%	0,9	0,0	1,1
CA	Obsah vápníku v %	%	1,8	1,5	2,1
MG	Obsah hořčíku v %	%	6,5	6,0	6,6

Příloha 3 – protokol o tavně 676

Příloha 3.1 - úvodní list



PROTOKOL O TAVBĚ

Datum	Pec	Č. tavby	Materiál	vyzdívka	Počet taveb na vyzdívce	Tavič
02.02.2022	vakuová	676	LKG	Wedorit FM15	59	Ing. Pernica

Požadované chemické složení: [hm. %]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mg	Co	Ti	V	N
min	3,6	0,15	2,4					0,025				
max	3,8	0,20	2,60	0,1	0,01	0,1		0,050				
Pozn. ke složení												

Vsázka:

Pří sada	[kg]	Složení přísad v hm. %											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Fe	Al	
Vrat LKG	24												
sž	33												
Špony LKG	0,5												
Ocel kul	3												
C	0,22												
Očko SB 5	0,6												
Modif. VL63	0,66												
<b>celkem</b>	<b>62</b>												

Záznam průběhu tavnby:

čas	
9:45	Start na 20 kW
	Výkon na 100kW
	Tavící výkon
	Vše roztaveno
	T=1340°C
	Vzorek
	Výsledek OK –
	1430°C
10:40	Odpich T= 1540°C a lití 1387°C(mínus cca 5°C)

2.2.2022 10:27:04

# Atest - Q4 TASMAN

## Popis vzorku

SampleNo

LKG Tvrdoň t. 1 - po natav.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>4.059</b>	<b>1.245</b>	<b>0.119</b>	<b>0.051</b>	<b>0.020</b>	<b>0.029</b>	<b>0.0026</b>	<b>0.012</b>	<b>0.048</b>	<b>&lt;0.0010</b>
σ	0.051	0.0023	0.0016	0.0016	0.0025	0.00071	0.00041			
υ	1.256	0.185	1.345	3.137	12.50	2.448	15.77			
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.00041</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0015</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0024</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.00085</b>
σ		0.00003					0.00026			0.00005
υ		7.317					10.83			5.882
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.010</b>	<b>0.0049</b>	<b>0.0051</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>94.35</b>	<b>4.487</b>	<b>1.051</b>
σ		0.00071	0.00025	0.00023				0.050	0.050	0.013
υ		7.100	5.102	4.510				0.053	1.114	1.237

Σ 60 kg

[kg]

+ mouhl.

0,06

FeS,75

0,04

FeMnC

0,05



2.2.2022 11:06:54

## Atest - Q4 TASMAN

### Popis vzorku

LKG Tvrdoň t. 1 - z pánve

SampleNo

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.807</b>	<b>2.442</b>	<b>0.201</b>	<b>0.046</b>	<b>0.011</b>	<b>0.033</b>	<b>0.0030</b>	<b>0.014</b>	<b>0.046</b>	<b>0.012</b>
σ	0.075	0.036	0.0016	0.0015	0.0010		0.00030	0.00100	0.00071	0.00071
υ	1.970	1.474	0.796	3.261	9.091		10.00	7.143	1.543	5.917
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.00042</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0015</b>	<b>0.037</b>	<b>0.0025</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0015</b>
σ		0.00005				0.0012	0.00007			0.00010
υ		11.90				3.243	2.800			6.667
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.013</b>	<b>0.0050</b>	<b>0.0059</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>93.29</b>	<b>4.628</b>	<b>1.087</b>
σ			0.00019	0.0013				0.063	0.069	0.020
υ			3.800	22.03				0.068	1.491	1.840



PROTOKOL O TAVBĚ

Datum	Pec	Č. tavby	Materiál	vyzdívka	Počet taveb na vyzdívce	Tavič
<del>08.02.2022</del> 23.2.2022	vakuová	679	LKG	Wedorit FM15	5	Ing. Pernica

Požadované chemické složení: [hm. %]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mg	Co	Ti	V		N
min	3,6	0,15	2,4					0,025					
max	3,8	0,20	2,60	0,1	0,01	0,1		0,050					
Pozn. ke složení													

Vsázka:

Přísada	[kg]	Složení přísad v hm. %											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co		Fe	Al
Vrat LKG	24												
sž	18												
Špony LKG	0,5												
Ocel	18												
C	0,9												
Očko SB 5	0,6												
Modif. VL63	0,66												
<b>celkem</b>	<b>62,6</b>												

Záznam průběhu tavby:

čas	
6:50	Start na 20 kW
8:25	Výkon na 100kW
	Tavící výkon
8:55	Vše roztaveno
	T=1340°C
9:00	Vzorek
9:09	Výsledek a dolegování 0,1kg c, FeSi75=0,36kg, FeMnC=0,15kg
9:18	Odpich T= 1545°C
9:23	lití 1380°C (mínus cca 5°C)

23.2.2022 9:08:41

### Atest - Q4 TASMAN

SampleNo	Popis vzorku									
	Tvrdoň LKG - po natav.									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>4.014</b>	<b>0.907</b>	<b>0.153</b>	<b>0.043</b>	<b>0.020</b>	<b>0.039</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.025</b>	<b>0.086</b>	<b>0.0012</b>
σ	0.014	0.010	0.0025	0.0012	0.00071	0.00071	0.00021	0.00100	0.0041	0.00035
υ	0.349	1.103	1.634	2.791	3.550	1.821	3.443	4.000	4.767	29.17
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>0.0024</b>	<b>0.00039</b>	<b>0.0097</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0022</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0026</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0020</b>
σ	0.00007	0.00005	0.0030		0.00016		0.00016			0.00010
υ	2.917	12.82	30.93		7.273		6.154			5.000
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>0.0014</b>	<b>0.0058</b>	<b>0.0043</b>	<b>0.0091</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0013</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>94.64</b>	<b>4.328</b>	<b>1.012</b>
σ	0.00038	0.00017	0.00023	0.0022		0.00026		0.010	0.011	0.0032
υ	27.14	2.931	5.349	24.18		20.00		0.011	0.254	0.316

261kg

+ moull.

FeSi75

FeInC

[kg]

0,1

0,36

0,15

23.2.2022 9:45:13

## Atest - Q4 TASMAN

SampleNo	Popis vzorku									
	Tvrdost LKG - z pánve									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.740</b>	<b>2.269</b>	<b>0.355</b>	<b>0.038</b>	<b>0.010</b>	<b>0.038</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.023</b>	<b>0.077</b>	<b>0.014</b>
σ	0.051	0.017	0.0042	0.00058	0.0021	0.00058	0.00006	0.00082	0.0019	0.00082
υ	1.364	0.749	1.183	1.526	21.00	1.526	1.053	3.565	2.468	5.857
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>0.0021</b>	<b>0.00037</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0023</b>	<b>0.034</b>	<b>0.0027</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0025</b>
σ	0.00010	0.00005			0.00017		0.00012			0.00016
υ	4.762	13.51			7.391		4.444			6.400
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0073</b>	<b>0.0040</b>	<b>0.0072</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>93.34</b>	<b>4.502</b>	<b>1.051</b>
σ		0.00008	0.00029	0.00076				0.055	0.051	0.014
υ		1.096	7.250	10.56				0.059	1.133	1.332



## PROTOKOL O TAVBĚ

Datum	Pec	Č. tavně	Materiál	vyzdívka	Počet tavně na vyzdívce	Tavič
31.3.2022	vakuová	710	LKG 40	Wedorit FM15	28	Ing. Pernica

Požadované chemické složení: [hm. %]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	V		N
min	3,6		2										
max	3,8	0,3	2,2	0,02	0,02								
Pozn. ke složení													

Vsázka:

Přísada	[kg]	Složení přísad v hm. %											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co		Fe	Al
Vrat LKG	39												
Ocel plechy Mn03	75												
Špony LKG	10,5												
C	3,75												
Očko inocast	0,8												
Mod VL63	1,5												
<b>celkem</b>	<b>130</b>												

Záznam průběhu tavně:

čas	
	kontrola pece, nasazení vsázky
9:20	Start pece, 20 kW
	Ohřev vsázky
10:12	Tavící výkon
11:05	Vše roztaveno
11:23	Vzorek
11:45	Výsledek
	Dolegování C=0,35kg FeSi75= 0,24kg
	Ohřev a rozpouštění uhlíku na hladině
11:55	Odpich 1540°C v pánvi přes 1400, na lití si počkali na 1360°C

31.3.2022 11:45:19

## Atest - Q4 TASMAN

### Popis vzorku

SampleNo

LKG víko Král 1 - po natav.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.944</b>	<b>1.059</b>	<b>0.303</b>	<b>0.014</b>	<b>0.024</b>	<b>0.041</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.082</b>	<b>0.031</b>	<b>&lt;0.0010</b>
σ	0.101	0.011	0.0025	0.0016	0.0029			0.0025	0.00071	
υ	2.561	1.039	0.825	11.43	12.08			3.049	2.290	
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>0.0022</b>	<b>0.00059</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0041</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0021</b>
σ	0.00029	0.00012			0.00025		0.00071		0.00098	0.00025
υ	13.18	20.34			6.098		7.100		17.50	11.90
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0072</b>	<b>0.0015</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0017</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>94.43</b>	<b>4.298</b>	<b>1.004</b>
σ		0.00016	0.00021			0.00035		0.082	0.098	0.025
υ		2.222	14.00			20.59		0.087	2.280	2.490

*Železo*

*+ mohl.*

*FeSi75*

*[kg]*

*0,35*

*0,24*

23.2.2022 9:45:13

## Atest - Q4 TASMAN

SampleNo	Popis vzorku									
	Tvrdost LKG - z pánve									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.740</b>	<b>2.269</b>	<b>0.355</b>	<b>0.038</b>	<b>0.010</b>	<b>0.038</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.023</b>	<b>0.077</b>	<b>0.014</b>
σ	0.051	0.017	0.0042	0.00058	0.0021	0.00058	0.00006	0.00082	0.0019	0.00082
υ	1.364	0.749	1.183	1.526	21.00	1.526	1.053	3.565	2.468	5.857
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>0.0021</b>	<b>0.00037</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0023</b>	<b>0.034</b>	<b>0.0027</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0025</b>
σ	0.00010	0.00005			0.00017		0.00012			0.00016
υ	4.762	13.51			7.391		4.444			6.400
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0073</b>	<b>0.0040</b>	<b>0.0072</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>93.34</b>	<b>4.502</b>	<b>1.051</b>
σ		0.00008	0.00029	0.00076				0.055	0.051	0.014
υ		1.096	7.250	10.56				0.059	1.133	1.332



### PROTOKOL O TAVBĚ

Datum	Pec	Č. tavby	Materiál	vyzdívka	Počet taveb na vyzdívce	Tavič
31.3.2022	vakuová	711	LKG 40	Wedorit FM15	29	Ing. Pernica

Požadované chemické složení: [hm. %]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	V		N
min	3,6		2										
max	3,8	0,3	2,2	0,02	0,02								
Pozn. ke složení													

Vsázka:

Přísada	[kg]	Složení přísad v hm. %											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co		Fe	Al
Vrat LKG	39												
Ocel plechy Mn03	75												
Špony LKG	10,5												
C	3,75												
Očko inocast	0,8												
Mod VL63	1,5												
<b>celkem</b>	<b>130</b>												

Záznam průběhu tavby:

čas	
	kontrola pece, nasazení vsázky
12:10	Start pece, 20 kW
	Ohřev vsázky a obědovka
12:45	Tavící výkon
	Vše roztaveno
13:45	Vzorek
	Výsledek
13:52	Dolegování C=0,4kg FeSi75= 0,18kg
	Ohřev a rozpouštění uhlíku na hladině
14:08	Odpich 1535°C v pánvi přes 1400, na lití si počkali na 1360°C



## Atest - Q4 TASMAN

### Popis vzorku

SampleNo

LKG víko Král 2 - po natav.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.862</b>	<b>1.202</b>	<b>0.286</b>	<b>0.021</b>	<b>0.031</b>	<b>0.033</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.031</b>	<b>0.037</b>	<b>&lt;0.0010</b>
σ	0.019	0.0079	0.0050	0.0016	0.0064	0.0012		0.0010	0.0010	
υ	0.492	0.657	1.748	7.619	20.65	3.636		3.226	2.703	
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>0.0025</b>	<b>0.00063</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0037</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.010</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>0.0065</b>	<b>0.0024</b>
σ	0.00050	0.00012			0.00016		0.00071		0.0016	0.00017
υ	20.00	19.05			4.324		7.100		24.62	7.083
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>0.0012</b>	<b>0.0041</b>	<b>0.0019</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0014</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>94.43</b>	<b>4.266</b>	<b>0.994</b>
σ	0.00029	0.00020	0.00041			0.00031		0.0071	0.020	0.0051
υ	24.17	4.878	21.58			22.14		0.0075	0.469	0.513

Σ 130 kg

[kg]

+ mohl.

0,4

FeSi75

0,18




**Atest - Q4 TASMAN**

SampleNo	Popis vzorku									
	LKG víko Král 2 - v pánvi									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>3.835</b>	<b>2.217</b>	<b>0.290</b>	<b>0.019</b>	<b>0.017</b>	<b>0.036</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.029</b>	<b>0.034</b>	<b>0.0085</b>
σ	0.062	0.013	0.0032	0.00071	0.0016	0.00071				0.00025
υ	1.617	0.586	1.103	3.737	9.412	1.972				2.941
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	Nb	Pb	Sb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
□	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.00051</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0039</b>	<b>0.034</b>	<b>0.0097</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0025</b>
σ		0.00003			0.00016	0.00071	0.00025			0.00020
υ		5.882			4.103	2.088	2.577			8.000
	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	Cekv.	Seut.
	%	%	%	%	%	%	%	%	[I]	[I]
□	<b>0.0023</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0014</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0012</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>93.42</b>	<b>4.573</b>	<b>1.072</b>
σ	0.00021	0.00010	0.00012			0.00016		0.066	0.063	0.018
υ	9.130	1.786	8.571			13.33		0.071	1.378	1.679

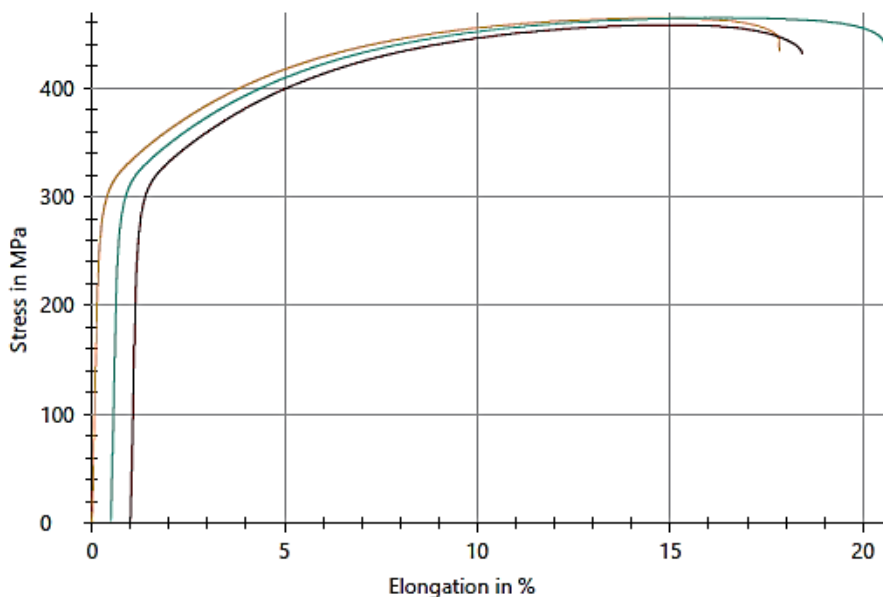
**Test report**

Customer : Doc. A. Záděra, Ph.D.  
Test standard : CSN EN ISO 6892-1 (2021)  
Material : LKG, DIN 50125, Form "B" 10x50 mm  
Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D.  
Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens  
Pre-load : 2 MPa  
Speed, Youngs Modulus : 0,00007 1/s  
Test speed : 0,001 1/s

**Test results:**

Legend	Specimen ID	d <sub>0</sub> mm	L <sub>0</sub> mm	E GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>B</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	A %	Z %
	676.25.T1	0,06	50,00	165,03	300	36886	464	434	14,5	17,6	21,0
	676.25.T2	0,07	50,00	160,38	301	36982	464	439	15,4	19,8	20,1
	676.25.T3	0,04	50,00	169,54	300	36248	458	432	13,7	17,2	22,1

**Series graph:**



Příloha 8 – protokol s výslednými hodnotami tahové zkoušky – vzorky z taveb 676 (blok 50) a 679 (blok 25 a 50)

### Příloha 8.1

výsledky

- vzorky z tavy 676, blok 50

- vzorky z tavy 679, blok 25 a blok 50

# Zwick / Roell

31.03.22

## Test report

Customer : Tvrdň DP

Test standard : ČSN EN 1563, ČSN EN ISO 6892-1 (2021)

Material : LKG, DIN 50125, form B, 10x50mm

Tester : Dr. J. Zapletal










Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 2 MPa

Speed, Youngs Modulus : 0,00007 1/s

Test speed : 0,002 1/s

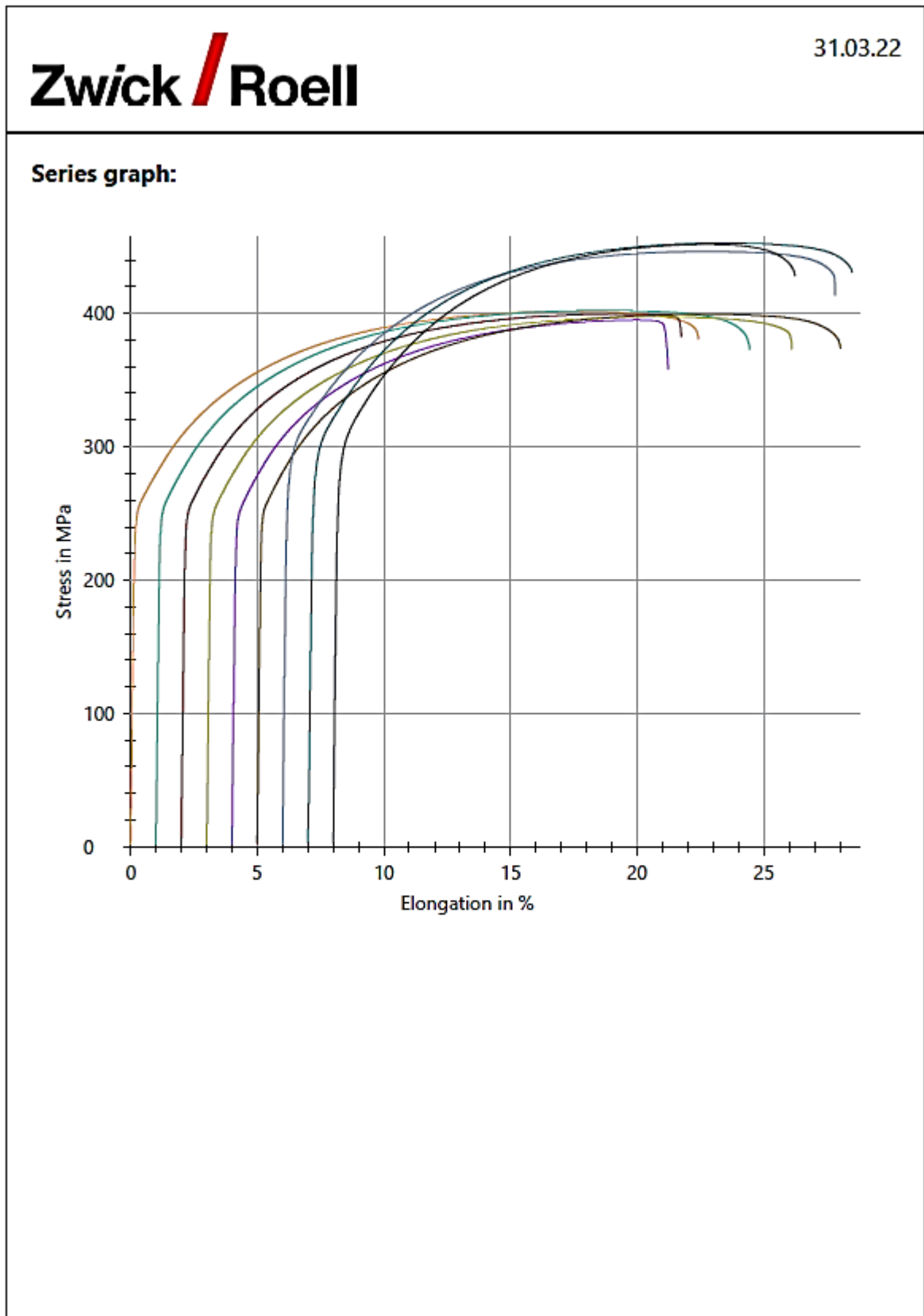
### Test results:

Legend	Specimen ID	do mm	Lo mm	mE GPa	Rp0.2 MPa	Fm N	Rm MPa	Rb MPa	Ag %	A50mm %	Z %
	679.50.T1	10,06	50,02	151,1	257	31905	401	381	17,1	22,2	21,7
	679.50.T2	10,03	50,02	154,7	257	31786	402	373	17,5	23,2	23,7
	679.50.T3	10,07	50,02	157,7	256	31824	400	382	17,0	19,5	17,4
	679.25.T1	10,06	50,02	161,9	255	31589	397	374	17,5	22,9	23,7
	679.25.T2	10,05	50,03	151,8	254	31350	395	358	15,6	17,0	12,9
	679.25.T3	10,05	50,02	163,1	257	31688	399	374	17,6	22,8	21,9
	676.50.T1	10,06	50,02	163,0	292	35497	447	414	16,5	21,5	20,9
	676.50.T2	10,07	50,02	155,2	293	36059	453	431	16,1	21,2	21,2
	676.50.T3	10,06	50,02	172,3	294	35922	452	428	14,4	18,0	20,9

Příloha 8.2

grafy:

- vzorky z tavby 676, blok 50
- vzorky z tavby 679, blok 25 a blok 50



## Test report

Customer : Doc. A. Záděra

Test standard : ČSN EN 1563, ČSN EN ISO 6892-1 (2021)

Material : LKG, DIN 50125, form B, 10x50mm

Tester : Dr. J. Zapletal









Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 2 MPa

Speed, Youngs Modulus : 0,00007 1/s

Test speed : 0,002 1/s

### Test results:

Legend	Specimen ID	d <sub>0</sub> mm	L <sub>0</sub> mm	mE GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>B</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	A %	Z %
	11-SA-1	10,06	50,01	158,6	545	63343	797	797	3,4	3,4	3,0
	11-SA-2	10,07	50,01	174,3	541	63572	798	777	3,5	3,5	3,0
	1.2	10,09	50,00	160,0	335	38839	486	468	7,4	7,6	6,6
	1.3	10,07	50,02	158,1	335	39608	497	487	13,3	14,5	9,9
	2.2	10,07	50,02	158,9	347	42534	534	530	12,4	13,7	11,2
	2.3	10,08	50,01	156,1	346	42342	531	520	10,9	11,1	8,3
	710	10,08	50,01	142,4	307	26099	327	250	0,4	0,6	1,8
	711	10,07	50,01	147,6	329	39810	500	487	4,4	4,5	3,0

Příloha 9.2

grafy:

- vzorky z tavby 710 a 711

