



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE ZPŮSOBU OČKOVÁNÍ LITINY S  
KULIČKOVÝM GRAFITEM**

OPTIMIZATION OF INOCULATION PROCESS OF DUCTILE IRON

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Daniel Ulm**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Daniel Ulm**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Slévárenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

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:

## **Optimalizace způsobu očkování litiny s kuličkovým grafitem**

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

Předmětem práce je analýza způsobu očkování litiny s kuličkovým grafitem a vliv očkování na strukturu a kvalitu litiny. Sleduje se vliv druhu a množství očkovačla a doby jeho aplikace na strukturu, stahování a mechanické vlastnosti.

### **Cíle diplomové práce:**

Optimalizace procesu metalurgického zpracování litiny, kterou by byla zaručena stabilita struktury a vlastností. Návrh musí reflektovat i finanční náročnost metalurgického zpracování.

### **Seznam doporučené literatury:**

ROUČKA, J. Metalurgie litin. PC-DIR Real, s.r.o. Brno, 1998. ISBN 80-214-1263-1.

ALAGARSAMY, A. Ductile Iron Handbook. AFS, Inc, Des Plaines, Illinois, USA, 1992. ISBN 0-87-4-3-124-2.

GRUZLESKI, J.E. Microstructure Development During Metalcasting. AFS, Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 2000. ISBN 0-87433-204-4.

WALTON, CH.F. Iron Castings Handbook. Gray and Ductile Iron Founder's Soc. Inc, Cleveland, USA, 1971. Library of Congress Catalog Number 70-165866.

LUX, B. editor. The Metalurgy of Cast Iron. Proceedings of the 2nd Int. Symp. on Metallurgy of Cast Iron, Geneva, Switzerland, 1974. ISBN 2-604-00001-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se v teoretické části zabývá klasifikací litin, výrobou litiny s kuličkovým grafitem, jejím očkovaním a modifikací a hodnocením kvality za pomoci termické analýzy, obrazové analýzy a zkoušek mechanických vlastností. Cílem praktické části bylo otestovat účinky preconditioningu na vlastnosti litiny a zjistit, zdali je schopen z části nahradit stávající způsob očkování nebo zvýšit mechanické vlastnosti odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Stav litiny byl kontrolován spektrální a termickou analýzou. Mechanické vlastnosti a obrazová analýza byly kontrolovány na hotovém odlitku.

### **Klíčová slova**

Litina s kuličkovým grafitem, grafitizační očkování, preconditioning, termická analýza, obrazová analýza, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The master's thesis deals in theoretical part with the casting classification, ductile iron casting, its inoculation and modification and quality evaluation using thermal analysis, image analysis and testing of mechanical properties. The aim of the practical part was to test the effects of preconditioning on the properties of ductile iron and to find out whether it is able to replace the current method of inoculation or to increase the mechanical properties of ductile iron castings. The state of the ductile iron was under control by spectral and thermal analysis. The mechanical properties and image analysis were checked on finished casting.

### **Key words**

Ductile iron, inoculation, preconditioning, thermal analysis, image analysis, mechanical properties

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ULM, Daniel. *Optimalizace způsobu očkování litiny s kuličkovým grafitem*. Brno 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 80 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace způsobu očkování litiny s kuličkovým grafitem** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Bc. Daniel Ulm

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jaromírovi Roučkovi CSc. za odbornou konzultaci, za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce, společnosti KASI spol. s.r.o. za financování experimentů a zaměstnancům této společnosti za pomoc a praktické rady při vykonávání experimentů.

---

**OBSAH**

Úvod .....	8
1 Definice litin.....	9
1.1 Druhy litin.....	10
1.2 Strukturní složky litin .....	11
2 Krystalizace litin .....	12
2.1 Nukleace zárodků .....	12
2.1.1 Homogenní nukleace.....	12
2.1.2 Heterogenní nukleace.....	13
2.2 Krystalizace a růst eutektika .....	14
2.2.1 Růst eutektika s lupínkovým grafitem .....	14
2.2.2 Růst eutektika s kuličkovým grafitem.....	15
3 Očkování .....	16
3.1 Princip očkování .....	16
3.2 Účel očkování .....	16
3.3 Druhy a princip působení očkovadel .....	17
3.4 Očkování litiny s kuličkovým grafitem .....	18
3.5 Způsoby očkování.....	19
3.6 Odeznívání očkovacího účinku.....	20
4 Modifikace .....	21
4.1 Druhy modifikačních prostředků .....	21
4.2 Reakce vedoucí ke ztrátám hořčíku .....	22
4.3 Aplikace modifikačního prostředku.....	22
4.3.1 Modifikace plněným profilem.....	23
5 Preconditioning .....	25
6 Provozní kontrola litiny.....	26
6.1 Kontrola chemického složení.....	26
6.2 Zákalková zkouška .....	27
6.3 Termická analýza.....	28
7 Experimentální část.....	31
7.1 Cíl experimentu.....	31
7.2 Příprava tekutého kovu .....	31
7.3 Volba odlitku .....	33
7.4 Zkoušky .....	34
7.4.1 Termická analýza (ATAS) .....	35
7.4.2 Obrazová analýza pro vyhodnocení struktury.....	36
7.4.3 Tahová zkouška.....	37
7.4.4 Zkouška plného zatížení.....	37
7.4.5 Kontrola chemického složení .....	38
7.5 Varianty úpravy kovu .....	38
7.5.1 Varianta 1 – Základní stav .....	38
7.5.2 Varianta 2 – Preconditioning do pece .....	43
7.5.3 Varianta 3 – Preconditioning do pánve bez 1. fáze.....	49
7.5.4 Varianta 4 – Preconditioning do pánve s 1. fází (1,5 kg).....	56
7.5.5 Varianta 5 – Preconditioning do pánve s 1. fází (1,5 kg) + 2 min .....	61
7.6 Vyhodnocení a porovnání jednotlivých variant.....	67
Závěr.....	75

## ÚVOD

První tavba litiny se datuje již několik set let před naším letopočtem. Nejvíce informací o tomto materiálu a postupu jeho výroby bylo ovšem objeveno až v nedávné době. Tyto poznatky jsou dále prohlubovány a dochází také k vývoji nových materiálů spolu s postupy jejich výroby. Litina má stále velmi vysoké uplatnění zejména v automobilovém průmyslu, ale také v mnoha jiných odvětvích.

Výrobou litiny s kuličkovým i lupínkovým grafitem se zabývají i ve společnosti KASI spol. s.r.o., která je největším českým výrobcem kanalizační litiny. Vhodným bodem k průzkumu se stalo očkování litiny s kuličkovým grafitem, neboť bylo potřeba zajistit standartní stav litiny při všech směnách, kterého se ve slévárně, i přes moderní technologie výroby, které jsou zde aplikovány, nedosahovalo. Tyto výkyvy nutí společnost snižovat garantované pevnostní vlastnosti.

Očkováním se rozumí vnášení takových látek do taveniny, které podporují vznik heterogenních zárodků pro krystalizaci a následný růst grafitu. Čím více zárodků se v tavenině vyskytuje tím jemnější a rovnoměrněji rozložený je grafit v odlité litině. Zajímavou technologií zajišťující stabilní kvalitu kovu by se mohlo stát přidávání těchto látek již před modifikací kovu, označované jako preconditioning. Modifikací se rozumí vnášení látek vhodných ke globulitizaci grafitu.

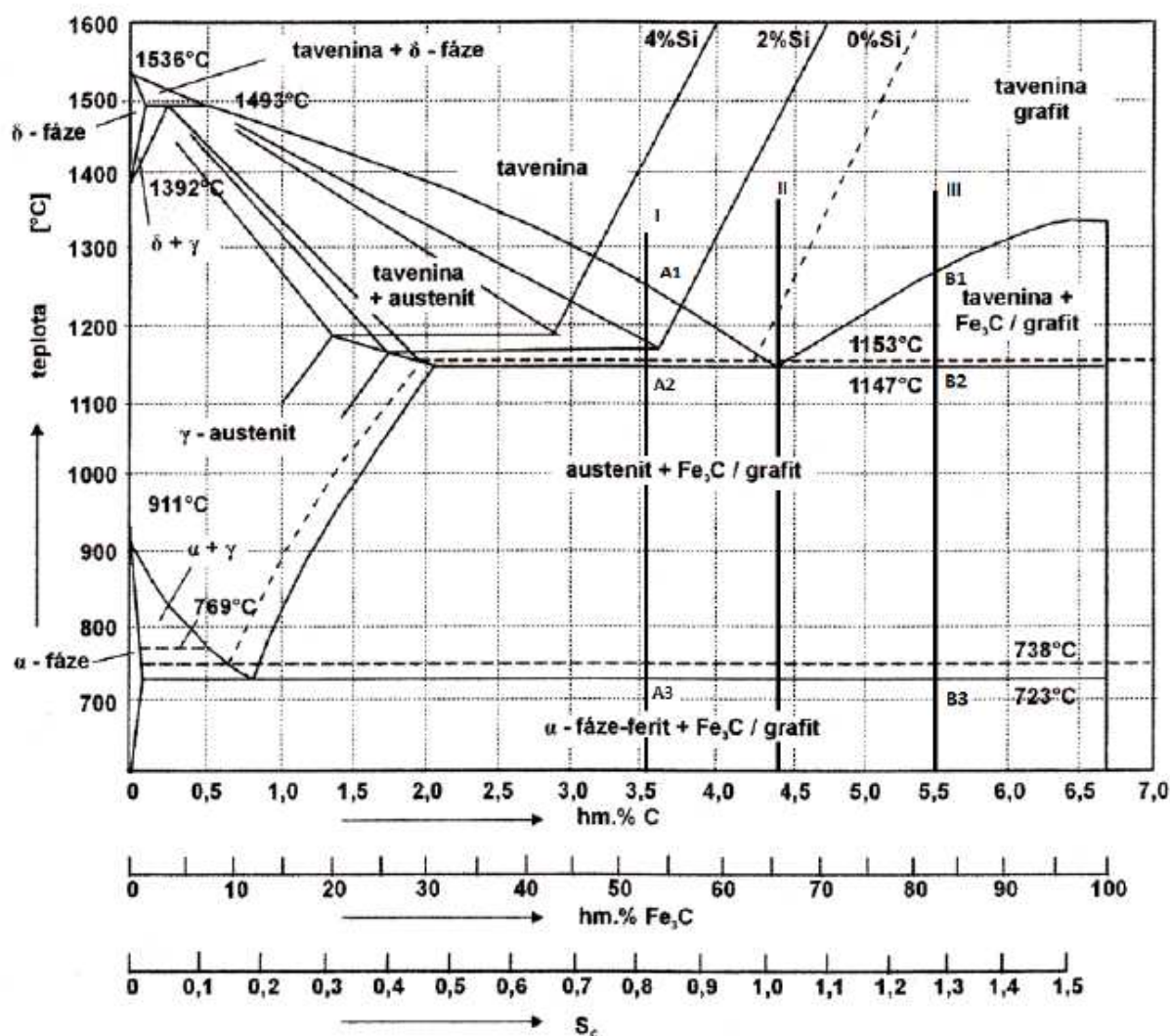
Cílem mé práce bylo zjistit, jaké účinky bude preconditioning na litinu s kuličkovým grafitem mít a jakým nejvhodnějším způsobem tyto látky aplikovat. Důležitým faktorem byl, z důvodu odeznívání účinku očkovacích látek, čas aplikace vzhledem k taktu formovací linky. To vše bylo zapotřebí otestovat za běžného provozu slévárny. Veškeré zkoušky byly prováděny na zařízeních ve společnosti KASI spol. s.r.o. a dále mi bylo umožněno využít pro kontrolu očkovacího účinku zapůjčenou termickou analýzu – ATAS (Adaptive Thermal Analysis System).

Všechna měření bylo třeba vyhodnotit nejen z hlediska kvality kovu, ale také ze stránky ekonomické, neboť bylo důležité najít rovnováhu mezi dosaženými mechanickými vlastnostmi a cenou odlitku.

## 1 DEFINICE LITIN

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, ve kterých je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo vázán jako karbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ , popřípadě karbid jiného prvku. Obsah uhlíku je vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu ( $\text{C} > 2,08\%$ ) bez uvažování vlivu ostatních prvků. Této podmínce odpovídají i surová železa, která se používají jako část vsázky pro výrobu litin. [1, 2]

Litiny krystalizují dle metastabilního nebo stabilního diagramu. Dle metastabilního Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramu (obr. 1) krystalizují bílé litiny, u nichž je uhlík vázán ve formě karbidu. Eutektikum, které se skládá z austenitu a cementitu v daném poměru, se nazývá ledeburit. Druhým diagramem popisujícím krystalizaci je stabilní Fe-C diagram. Zde vzniká grafitické eutektikum složené z grafitu a kovové hmoty. Kombinací stabilního a metastabilního tuhnutí vzniká tzv. maková litina. [1, 2]



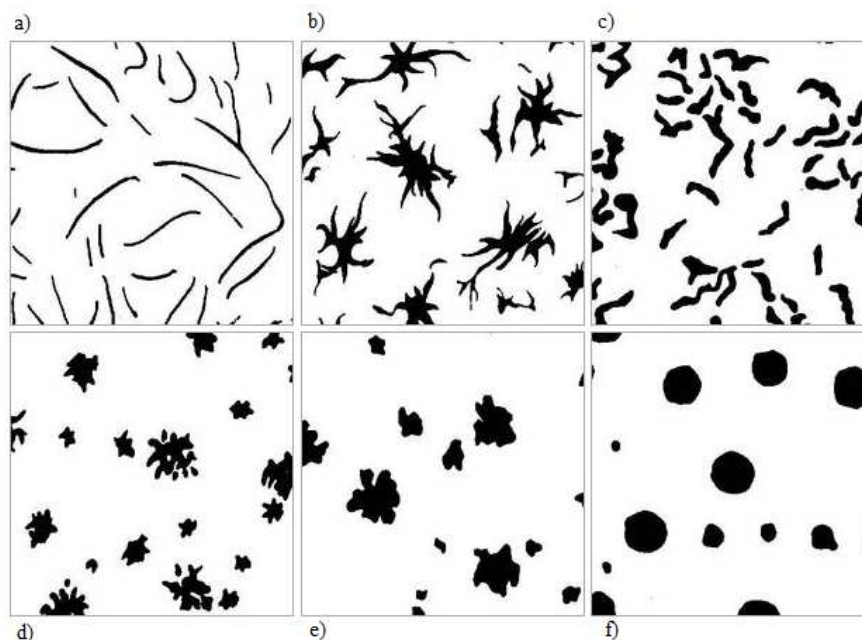
Obr. 1 Diagram Fe-C-Fe<sub>3</sub>C. [3]

## 1.1 Druhy litin

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. U grafitických litin vzniká grafitické eutektikum tvořené austenitem a uhlíkem, který je vyloučený v některé morfologické formě grafitu. Pokud není ve struktuře přítomen volný grafit, jedná se o karbidické litiny, jinak nazývané jako litiny bílé, kde eutektikum tvoří ledeburit.

Litiny můžeme dělit do čtyřech základních skupin dle základního kritéria, kterým je tvar vyloučeného grafitu. Tři z těchto druhů litiny tuhnu dle stabilního systému Fe-C. Jedinou výjimkou je temperovaná litina, která tuhne metastabilně. [1, 2]

1. **Litina s lupínkovým grafitem – LLG** – tzv. šedá. Šedá litina je stále nejčastěji vyráběným druhem litin. Uhlík je zde vyloučen ve formě lupínkového grafitu (obr. 2a), dodávajícím lomu šedou barvu. Lupínky mají délkový rozměr podstatně větší, než je jejich tloušťka, a konce lupínků jsou ostré. [1]
2. **Litina s kuličkovým grafitem – LKG** – tzv. tvárná. Grafit má tvar kuliček (obr. 2f). Oblast připadající jednomu útvaru grafitu, kuličce, se nazývá eutektická buňka. Ideálním tvarem je dokonalá kulička. [1]
3. **Litina s červíkovitým grafitem – LČG** – tzv. vermikulární. Tvar grafitu je nejvíce podobný lupínkovému, ale útvary grafitu jsou kratší, tlustší a mají zaoblené konce (obr. 2c). Tato litina je přechodem mezi LLG a LKG a ve struktuře mohou být obsaženy i útvary kuličkového nebo lupínkového grafitu, který je ovšem nežádoucí. [1]
4. **Temperovaná litina – TL** – tuhne podle metastabilního systému Fe-Fe<sub>3</sub>C. Typický vločkový tvar grafitu nevzniká po odlití, ale až následným tepelným zpracováním. Žiháním dojde k rozpadu cementitu. Dělí se na litinu s bílým a černým lomem. [1]

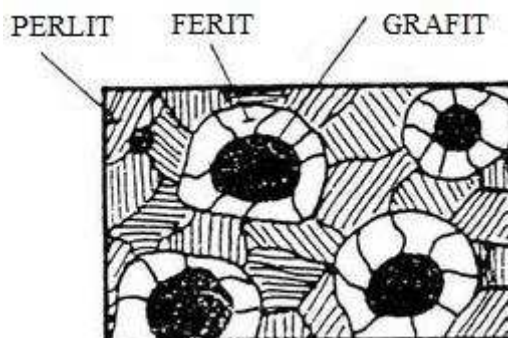


**Obr. 2** Etalony tvarů grafitu dle ČSN EN 1560: a) lupínkový, b) vločkový, c) červíkovitý neboli vermikulární, d) povoučkový, e) nedokonale zrnitý f) zrnitý. [4]

## 1.2 Strukturní složky litin

Litina má strukturu tvořenou základní kovovou hmotou a grafitem, který se nevyskytuje u bílé litiny. Grafítické litiny jsou nejčastěji tvořené feritem a perlitem (viz obr. 3) a dle poměru jejich složek se označují jako feritické, perlitické nebo ferito-perlitické. [1]

1. **Grafit** – je krystalickou formou uhlíku. Krystalizuje v hexagonální soustavě. Vyskytuje se jako grafit eutektický, vznikající při tuhnutí eutektika, nebo primární, vznikající jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických litin, popřípadě rozpadem metastabilních složek při použití tepelného zpracování. U grafitu hodnotíme jeho tvar, rozložení a velikost, neboť tyto parametry mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti.
2. **Ferit** –  $\alpha$ -Fe – vzniká eutektoidní transformací austenitu dle stabilního systému. Krystalizuje v kubické prostorově centrované mřížce. Ferit je nositelem houževnatosti, neboť je měkký, tvárný, dobře obrobitelný a má nízkou pevnost, ale přesto vysokou tažnost.
3. **Perlit** – je eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. V litinách je nositelem pevnosti a tvrdosti.
4. **Austenit** –  $\gamma$ -Fe – krystalizuje v kubické plošně centrované mřížce. V litinách se vyskytuje jako zbytkový, nejčastěji při tepelném zpracování, nebo u legovaných litin
5. **Cementit** – se skládá z karbidů železa  $Fe_3C$ . Krystalizuje v rhombické mřížce. Cementit je velmi tvrdý a křehký, a proto při vyšším obsahu dělá litinu neobrobitelnou.
6. **Ledeburit** – je jednou ze základních složek bílých litin. Tvoří ho austenit a ledeburitický cementit. V grafítických litinách je nežádoucí a tvoří se zejména na místech s rychlým odvodem tepla jako tzv. zákalka.
7. **Martenzit** – vzniká rozpadem austenitu a je velmi tvrdý a křehký.
8. **Bainit** – vzniká u legovaných litin (Mo, Ni) nebo při tepelném zpracování. Litina má při zachování relativně dobrých plastických vlastností vysokou pevnost a tvrdost.



**Obr. 3** Schéma litiny s kuličkovým grafitem s obsahem feritu a perlitu. [4]

## 2 KRYSTALIZACE LITIN

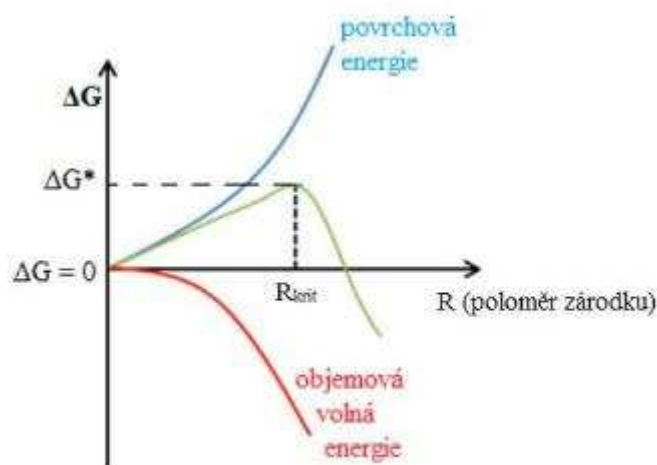
Tuhnutí litin se skládá ze dvou po sobě následujících dějů, krystalizace primární fáze a krystalizace eutektika. Tyto děje na sobě nejsou přímo závislé, ale můžou se vzájemně ovlivňovat. Například primární fáze vymezuje prostor pro tvorbu eutektika. Krystalizace primární fáze i krystalizace eutektika se skládá z nukleace a následného růstu.

### 2.1 Nukleace zárodků

Nukleací zárodků označujeme tvorbu stabilních zárodků pro následný růst nové fáze. Podmínkou krystalizačního procesu je, že volná entalpie, neboli Gibsova energie, tuhé fáze musí být menší než volná entalpie taveniny. To znamená že tuhá fáze musí být energeticky stabilnější než fáze tekutá. Gibsova energie musí být dostatečně vysoká, aby docházelo k vytvoření zárodků na cizích částicích. Tento jev se nazývá heterogenní nukleace. Dalším jevem je homogenní nukleace, která je ovšem energeticky náročnější. Při tomto jevu dochází k vytvoření vlastních stabilních zárodků. Dostatečné energie pro jednu z nukleací se dosahuje přechlazením původní tekuté fáze. [1]

#### 2.1.1 Homogenní nukleace

Aby mohl vzniknout zárodek nové fáze, který by byl stabilní a byl schopen vytvořit krystal, je nutné, aby jeho volná entalpie byla nižší než u roztaveného kovu. Zárodek může trvale růst jen tehdy, dochází-li k snižování volné entalpie, tj. je-li jeho velikost větší než kritický poloměr zárodku (obr. 4). Takovým zárodkům říkáme aktivní zárodky. Při růstu až do poloměru „ $R_{krit}$ “ se naopak volná entalpie zvyšuje. Dokud je zárodek menší jak „ $R_{krit}$ “, není stabilní a dochází k jeho zpětnému rozpouštění v tavenině. Se zvětšujícím se podchlazením se zmenšuje kritická velikost zárodku, takže stále větší počet se stává aktivním. Homogenní nukleace je velmi energeticky náročná, a proto dochází prakticky pouze k nukleaci heterogenní. [1, 2]



Obr. 4 Závislost volné entalpie ( $\Delta G$ ) na velikosti zárodku. [5]

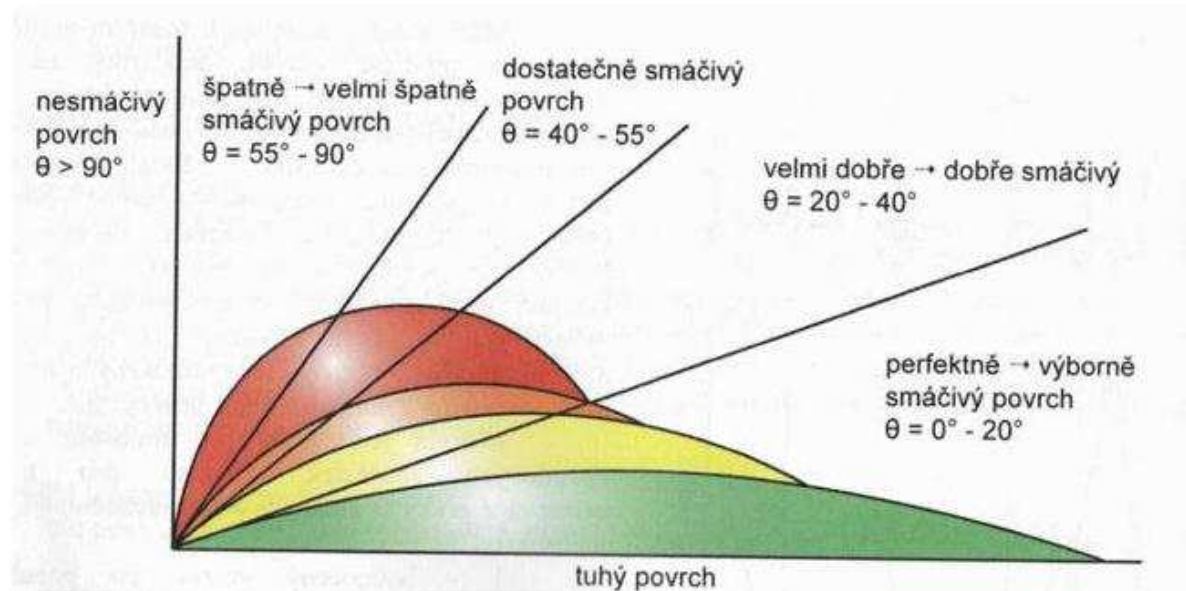
## 2.1.2 Heterogenní nukleace

K usnadnění nukleace napomáhají cizí částice přítomné v tavenině. Cizími částicemi mohou být vměstky nebo stěny dutiny formy. Stabilní zárodek pak vzniká již při podstatně menší kritické velikosti zárodku, než u homogenní nukleace.

Nukleace na cizím zárodku může proběhnout jen v tom případě, jestliže kapalný kov cizí zárodek smáčí. Úhel smáčení mezi kovem a zárodkem je proto důležitým faktorem heterogenní nukleace. Čím lepší smáčivost, tím vhodnější cizí částice jako krystalizační zárodek (obr. 5). Při nulovém úhlu smáčení, dokonalém smáčení, je mezifázové napětí malé a zárodek snadno vzniká již při malém podchlazení. Tento stav nastává v případě, kdy jsou mřížky obou komponent podobné. Při velkém úhlu, blízkému  $180^\circ$ , je tomu naopak a energie potřebná ke krystalizaci se blíží energii potřebné pro homogenní nukleaci. [1, 2]

Při malém podchlazení taveniny se aktivuje malý počet větších zárodků, což vede ke vzniku hrubozrnné struktury. To vede k horším mechanickým vlastnostem litiny. Přechlazení se při nepřítomnosti vhodných zárodků zvětšuje až do té doby, kdy dojde k aktivaci menších, méně vhodných zárodků. Při velkém podchlazení, vlivem rychlého ochlazování, dojde k aktivaci většího množství malých zárodků za vzniku jemnozrnné struktury. Do taveniny je proto vhodné vnášet krystalizační zárodky s nízkým mezifázovým napětím, za účelem zjemnění struktury, a tím zvýšení mechanických vlastností. Tento proces se nazývá grafitické očkování litin. [1]

Proces nukleace se týká austenitu, grafitu i karbidů, ale hybnou silou krystalizace austenitu je rozdíl volné entalpie tuhé a tekuté fáze. Oproti tomu u nukleace grafitu jde o vylučování zcela nové fáze z přesyceného roztoku uhlíku v železe, aktivita uhlíku je větší než jedna. Aktivita je ovlivněna teplotou a obsahem prvků v litině. Pro podporu vzniku grafitu je zapotřebí využít prvků zvyšujících aktivitu uhlíku (Si, Al, P, ...). Prvky snižující aktivitu uhlíku (Mn, Cr, V, ...) grafitizaci omezují. [1]



**Obr. 5** Rozdělení smáčivosti na povrchu tuhé částice dle úhlu smáčení. [6]

## 2.2 Krystalizace a růst eutektika

Krystalizace a růst eutektika jsou podmíněny vznikem krystalického zárodku vedoucí fáze a jeho následným růstem. Nižší hodnotu podchlazení má vedoucí fáze, která následně může mít schopnost podporovat růst druhé fáze. Dle schopnosti podnítit krystalizaci druhé fáze se eutektika dělí na normální a anomální eutektikum.

Při krystalizaci normálního eutektika vedoucí fáze podnítí krystalizaci druhé fáze při stejné hodnotě přechlazení. Eutektikum je následně tvořeno střídavě z lamel vedoucí a druhé fáze, které k sobě mají určitý orientační vztah.

Anomální eutektikum je typické pro složky s rozdílnou krystalickou mřížkou, kde obě fáze rostou nezávisle na sobě. Vedoucí fází eutektické krystalizace je nejčastěji složka s vyšší teplotou tuhnutí. Tímto druhem eutektika se vyznačují litiny s nízkým podchlazením. [1]

V litinách se vyskytuje eutektický grafit. Základními typy jsou lupínkový a kuličkový grafit. Přechodnými stavy jsou dále korálový a červíkovitý grafit. O typu grafitu rozhodují zejména:

- Poměr teplotního gradientu na mezifázovém rozhraní ku rychlosti růstu tohoto rozhraní,
- chemické složení litin, obsah modifikačních prvků, nečistot a jejich vliv na růst fází.

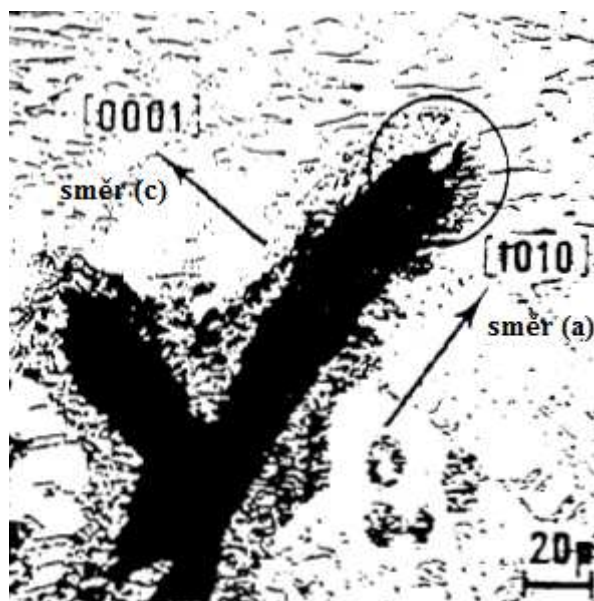
Prvky, které se v litině nacházejí, lze z hlediska jejich vlivu na tvar grafitu rozdělit na globulitisační a antiglobulitisační. Globulitisační prvky zvyšují povrchové napětí na rozhraní mezi grafitem a taveninou. Tohoto jevu se využívá při výrobě litiny s kuličkovým grafitem. Mezi globulitisační prvky můžeme zařadit například: Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Ce. Antiglobulitisační prvky (Sb, Pb, Bi, Ti, O, S a další) naopak povrchové napětí snižují a je jimi možné kompenzovat účinky globulitisačních prvků. [1]

### 2.2.1 Růst eutektika s lupínkovým grafitem

Vznik lupínkového grafitu je způsoben vysokým obsahem kyslíku a síry, koncentrovaných na prizmových rovinách mřížky grafitu. Tyto prvky zde snižují povrchové napětí, čímž usnadňují růst v těchto rovinách, který je méně energeticky náročný než tvorba nových bazálních rovin. Růst lupínkového grafitu tedy probíhá připojením atomů uhlíku ve směru (a) (viz. obr. 6). [1]

Z uvedeného vyplývá, že při malém podchlazení taveniny je rychlost růstu grafitu větší než rychlost růstu austenitu. Lamela grafitu roste v přímém kontaktu s taveninou, vyčnívá do ní a ve směru (c) (obr. 6) je ohraničena austenitem. Grafit roste ze zárodku radiálním směrem a k větvení lupínků dochází vlivem nečistot a krystalických poruch. Grafit má v eutektické buňce tvar „hlávky“. [1]

Při rychlejší ochlazení dochází k větvení častěji. Čím větší přechlazení, tím jemnější grafit dostaneme. Tato závislost platí pouze do určité meze, kdy může dojít k předbírání austenitu před mezifázové rozhraní, neboť s vyšším přechlazením roste rychlost růstu austenitu více než rychlost růstu grafitu. Tato skutečnost vede k oddělení grafitu od taveniny a jeho následný růst může probíhat pouze difuzí přes obálku austenitu. Výsledkem je tzv. přechlazený grafit. [1]



Obr. 6 Směr růstu lupínkového grafitu. [1]

### 2.2.2 Růst eutektika s kuličkovým grafitem

Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem je zapotřebí využití globulitizačních prvků. Nejčastěji a téměř výhradně používaný modifikační prvek je hořčík. Případně se nabízí možnost využití céru nebo kovů vzácných zemin. Hořčík v tavenině reaguje se sírou a kyslíkem. Po proběhnutí těchto reakcí, desoxidace a odsíření, zbyde v tavenině část hořčíku, kterou nazýváme zbytkový. Pro dosažení kuličkového grafitu je nutný obsah zbytkového hořčíku vyšší než cca 0,025 %. Obvykle se jeho koncentrace udržuje nad hodnotou 0,03 %. [1]

Reakcí hořčíku se sírou a kyslíkem se tyto prvky vyváží z prismatických rovin a tím se zvýší povrchové napětí na prismatických plochách. Dochází k zhoršení podmínek pro růst ve směru (a) (obr. 6), a tím ke zvýšení přechlazení. Zvýšením přechlazení se zvyšuje i rychlost růstu ve směru (c) (obr. 6). [1]

O mechanismu vzniku kuličkového grafitu vypovídají dvě základní teorie. První teorie hovoří o spirálovém růstu grafitu sbalováním lamel rostoucích ve směru (a) po obvodu kuličky. Druhá teorie předpokládá, že hořčík a cér se koncentrují na mezifázovém rozhraní a blokují růst v prismatických rovinách. Další růst grafitu je dle této teorie možný pouze vytvářením nových bazálních rovin ve směru (c) mechanismem šroubových dislokací. Dle výzkumných prací mohou kuličky vznikat oběma mechanismy. [1]

---

## 3 OČKOVÁNÍ

### 3.1 Princip očkovaní

Jedná se o vnášení cizích částic do roztavené litiny, které vedou k tvorbě krystalických zárodků potřebných pro heterogenní nukleaci. Dle teorie tvorby oxidačního zárodku dochází díky očkovaní k vylučování zárodků  $\text{SiO}_2$ , na kterých poté nastává růst grafitu. Pro správnou funkci očkovačla je ovšem nezbytné, aby obsahovalo též aktivní prvky. Očkovací složka je obsažena v očkovačle v malé koncentraci. Aktivní prvky reagují zejména s kyslíkem a sírou za vzniku sloučenin s vyšší teplotou tuhnutí, než je teplota tuhnutí litiny. Zárodek je složen z jádra a obálky. Jádro zárodku tvoří oxidy ( $\text{MgO.SiO}_2$ ) nebo sirníky ( $\text{CaS}$ ,  $\text{MgS}$ ,  $\text{CeS}$ , ...). To je následně obalováno oxidy obvykle obsahujícími zejména vápník a hliník. Tyto oxidy ( $\text{CaO.SiO}_2$ ,  $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) mají hexagonální mřížku vhodnou pro krystalizaci grafitu. [1,7]

Očkovaní je složitý proces závisící na mnoha faktorech. Je ovlivněno zejména teplotou taveniny, jejím chemickým složením a typem očkovačla. U očkovačel se zabýváme zejména chemickým složením, ale důležitým faktorem je i jeho zrnitost. Tu volíme dle způsobu očkovaní. Problémy působí proces odeznívání očkovačeho účinku, protože je nutné kontrolovat dobu odlití po naočkovaní, nebo také rozdílná tloušťka odlitku, se kterou úzce souvisí doba tuhnutí. [8]

### 3.2 Účel očkovaní

Očkovaní litin provádíme za účelem ovlivnění průběhu tuhnutí a tvorby požadované struktury v odlitku. Očkovaní nemá velký vliv na chemické složení, ale velmi významně ovlivňuje množství, velikost a tvar vyloučeného grafitu. U výroby grafitických litin se používá téměř vždy, neboť zvýšením počtu aktivních zárodků dochází ke krystalizaci grafitu již při menším přechlazení pod stabilní eutektickou teplotou. Teplota nukleace se dostane na úroveň vyšší, než je metastabilní eutektická teplota. To vede ke zmenšení zákalky, neboť ledeburit nevzniká. [1]

Očkovaní dále vede ke zrovnoměnění struktury v závislosti na šířce stěn odlitku a podporuje vyloučení grafitu typu A v celém průřezu odlitku. Zjemňuje strukturu, neboli dává větší počet menších lupínek u litiny s lupínkovým grafitem, a kuliček u litiny s grafitem kuličkovým. V neposlední řadě napomáhá vzniku eutektických buněk. Jedná se o oblast litiny, která přísluší jednomu útvaru grafitu. [1]

Největší význam dostává očkovaní při nepříznivých podmínkách pro grafitizaci. Mezi tyto podmínky lze řadit rychlé ochlazování odlitku a nepříznivé chemické složení, čímž může být například nízký uhlíkový ekvivalent nebo malý obsah grafitizačních a naopak velký obsah karbidotvorných prvků. Tyto faktory mohou mít za následek špatné mechanické vlastnosti a vysokou tvrdost. [1]

### 3.3 Druhy a princip působení očkovaadel

Očkovadlo se skládá z nosiče a aktivní složky. Jako nosič je v praxi používáno převážně ferosilicium, protože splňuje všechny požadavky. Mezi ně lze zařadit:

- Snadnou rozpustnost v litině,
- soulad se složením kovu,
- tvorbu slitiny s aktivní složkou,
- zvýšení aktivity uhlíku v litině,
- nízkou cenu.

Po jeho použití vzniká v litině chemická heterogenita. To znamená, že v místech použití očkovaadla se zvyšuje aktivita uhlíku vlivem vyšší koncentrace křemíku, což podporuje nukleaci grafítu. [1]

Očkovací složkou jsou příměsi účinných očkovaacích látek s vysokou afinitou ke kyslíku, neboť očkování je spojeno se snížením obsahu kyslíku rozpuštěného v tavenině. Nejčastěji se jedná o vápník a hliník, ale může být použito i barium, zirkon, stroncium nebo kovy vzácných zemin. [7]

**Očkovadlo na bázi křemíku** – je nejběžnějším druhem očkovaadla. Základní složkou je ferosilicium s obsahem přibližně 65-75 % křemíku, 1-2 % hliníku a 0,2-1 % vápníku. Nejlepšího očkovaacího účinku je dosahováno právě za současného použití vápníku a křemíku. Dodavatelé nejčastěji nabízí tzv. komplexní očkovaadla na bázi ferosilicia, která obsahují i jiné krystalizačně aktivní prvky, jejichž výčet je uveden v tab. 1. Tyto prvky jsou přidávány za účelem zlepšení očkovaacího účinku, zpomalení rychlosti odeznívání nebo zlepšení rozpustnosti za nižších teplot. [1, 7]

**Očkovadlo na bázi uhlíku** – vnáší navíc kromě vznikajících oxidů i zárodky grafítu. Obsahují přibližně 30 % krystalického uhlíku a asi 40-50 % křemíku. Dávkují se obvykle do pánve v množství 0,3-0,6 %. Nízká rozpustnost očkovaadel na bázi uhlíku za nižších teplot je velkou nevýhodou, neboť je nutné očkovat při teplotách vyšších než 1400 °C. Tato očkovaadla nelze použít pro litinu s kuličkovým grafitem, neboť má tavenina nízký obsah síry. [1]

**Silikokalcium** – je charakteristické silným desoxidačním a desulfuračním účinkem, proto se při výrobě litin téměř nepoužívá a je vhodnější pro oceli. Obvyklé obsahy jsou 30 % vápníku a 65 % křemíku. Dávkuje se v množství 0,2-0,4 %. Nevýhodou je také tvorba značného množství strusky. [1]

**Karbid křemíku** – má teplotu tavení nad 1700 °C a v litině se tedy netaví, ale postupně rozpouští. Jeho očkovaací účinek je tedy dlouhodobý, což umožňuje očkovat již do lázně v tavicí peci. Endotermický charakter rozpouštění SiC zvyšuje stabilitu zárodků při vyšších teplotách taveniny. Používá se při vysokém podílu oceli ve vsázce, s dávkováním kolem 0,5 %. [1]

**Tab. 1** Obvyklé aktivní prvky v komplexních očkovaadlech [1]

Prvek	Obsah [%]	Účinek aktivního prvku
Al	1,0 – 2,0	Zlepšuje očkovací účinek, nadměrný obsah – vznik bodlin
Ca	0,2 – 1,0	Zlepšuje očkovací účinek, nadměrný obsah – vznik struskových vměstků, velmi vysokou dezoxidační schopnost
Sr	0,5 – 1,0	Zvyšuje rychlost rozpouštění očkovaadla, lehce zvyšuje počet eutektických buněk, prodlužuje dobu účinnosti očkovaadla
Ba	1,0 – 6,0	Tvoří chemicky stálé zárodky s vysokou hustotou – pomalu vyplouvají – prodlužuje dobu očkovacího účinku, snižuje nebezpečí vzniku bodlin, má vysokou dezoxidační schopnost
Zr	1,0 – 6,0	Má dobrou dezoxidační schopnost, dobrý očkovací účinek, zpomaluje odeznívání
Mn	do 10,0	Zlepšuje rozpustnost očkovaadla při nízkých teplotách
Ce	0,5 – 1,0	Tvoří stabilní oxidy a sulfidy, snižuje rychlost odeznívání, při výrobě LKG se používá v modifikátorech – kompenzuje antiglobulitisační účinek nečistot
Ti	do 10,0	U LKG se nepoužívá – zamezuje vzniku kuličkového grafitu, snižuje nebezpečí vzniku bodlin (navázáním N), zřídka používaný

### 3.4 Očkování litiny s kuličkovým grafitem

Očkování litiny s kuličkovým grafitem je nezbytnou operací, neboť hořčík, kterým se provádí modifikace, zvyšuje sklon k tvorbě karbidů. Jeho účinky jsou tak silné, že bez použití očkovaadla by litina ztuhla bíle. K tomuto jevu přispívá i velmi nízký obsah síry v tavenině, při kterém stačí pro dobrou strukturu malý obsah zbytkového hořčíku (nad 0,025 %). [1]

Nejčastěji se pro očkování používá ferosilicium, a není tomu jinak ani u litiny s kuličkovým grafitem (viz. kap. 3.3). Limitováno je použití očkovaadla s obsahem stroncia, které se nehodí pro litinu modifikovanou přípravkem s obsahem céru nebo vápníku. Cér se vyznačuje příznivým účinkem na grafitizaci hlavně v tenkostěnných odlitcích. U céru nezáleží, zda byl dodán modifikovadlem či očkovaadlem, ale jeho optimální množství se pohybuje v rozmezí 0,0045-0,008 %. Dávkování očkovaadla záleží na tloušťce stěn odlitku a na času očkování vzhledem k době lití. [1]

Očkování může být prováděno jednostupňově, nebo dvoustupňově. Při jednostupňovém očkování se modifikační a očkovací prostředky přidávají do taveniny současně. Vhodné způsoby pro tuto aplikaci jsou metody typu Sandwich, Tundisch atp. Nevýhodou těchto

metod je vysoké dávkování očkovačla (0,5-1,0 %) z důvodu poměrně dlouhého intervalu mezi očkovaním a litím. [1]

Dvoustupňový způsob zpracování kovu je vyznačován postupným přidáváním přípravků, a to nejprve modifikovačla, a až následně očkovačla. Provádí se způsoby popsány v kap. 3.5. Výhodou je možnost nižšího dávkování očkovačla, neboť čím později se očkuje, tím méně očkovačla je možné dávkovat. Při očkování do proudu kovu plněným profilem nebo očkovačlami tělisky je možné snížit dávkování až na hodnotu 0,1-0,2 %. Tyto metody lze využívat též k pozdnímu doočkování, při anomálii v procesu přípravy taveniny nebo při záměrném podočkování. [1]

### 3.5 Způsoby očkování

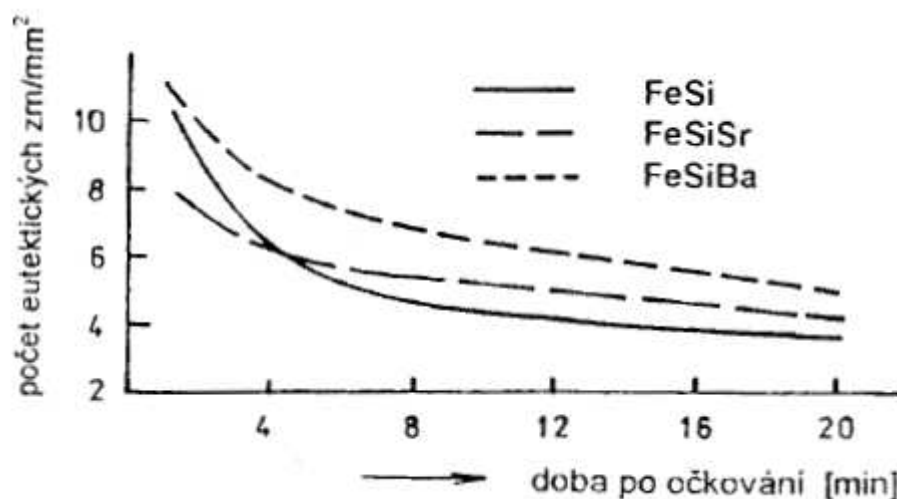
Před samotným procesem očkování je nutné zajistit dostatečnou teplotu kovu, která umožní rozpuštění očkovačla. Dalšími důležitými faktory potřebnými pro úspěšné naočkování jsou homogenizace taveniny a také doba očkování. Nejvhodnější je zkrátit dobu mezi očkovaním a litím na co nejkratší úsek, neboť je třeba brát ohled na odeznívání očkovačlů účinku. Tato skutečnost vedla k zařazení procesu očkování při lití do čtyřech následujících základních způsobů očkování: [1]

1. **Očkování do pánve** – je klasickou metodou očkování, při které se očkovačlo přidává do lící pánve během odpichu nebo při přelévání z transportní pánve. Očkovačlo se nepřidává do prázdné ani plné pánve, neboť by hrozilo jeho nalepení na stěnu pánve, popřípadě jeho zachycení ve strusce nebo nehomogenita v celém objemu kovu. Obvyklým způsobem je tedy přidávání očkovačla po zaplnění přibližně čtvrtiny pánve. Dávkování je v porovnání s ostatními metodami poměrně vysoké z důvodu dlouhého času mezi samotným očkovaním a litím. Přidává se 0,2-0,4 % očkovačla u LLG a 0,7-1,2 % u LKG. Jeho zrnitost se pohybuje od 2-4 mm u malých pánví až po 30 mm u velkých. Menší frakce zvyšuje riziko nalepování a zachycování. [1, 7]
2. **Očkování plněným profilem** – se aplikuje také do lící pánve, dále do proudu kovu nebo v mezipánvi. Zrnité očkovačlo je uzavřeno v plněném profilu, neboli drátu, o průměru nejčastěji 9-13 mm. Jeho přidávání se uskutečňuje podavačem, díky kterému je zajištěno přesné dávkování, dané délkou profilu a rychlostí odvíjení. V lící pánvi se dávkuje v množství přibližně 0,1 % u LLG a 0,2 % u LKG. V mezipánvi může být dávkování o 0,02-0,05 % nižší. [1, 7]
3. **Očkování do proudu kovu** – je velmi zajímavým způsobem očkování, protože přináší řadu výhod oproti ostatním metodám. Jedná se o přidávání očkovačla přímo do proudu tekutého kovu po celou dobu lití. Obvykle používaná zařízení pracují s injektáží očkovačla, o zrnitosti 0,2-0,7 mm, do proudu pomocí stlačeného vzduchu nebo plněným profilem. Mezi hlavní výhody patří eliminace vlivu odeznívání očkovačlů účinku, neboť očkování probíhá těsně před plněním formy. S tím souvisí také snížení dávkování na hodnotu do 0,15 %. Dávkování by nemělo být vyšší, aby došlo k dokonalému rozpuštění očkovačla v krátkém čase lití. Dále se kvůli kontinuálnímu dávkování snižuje riziko vzniku nerovnoměrně rozloženého grafitu typu D a E. Tento způsob je používán zejména u automatických formovacích linek, neboť spojení dávkovače s odlévacím zařízením umožňuje ideální kontinuální dávkování. [1, 7]
4. **Očkování ve formě** – probíhá přidáním očkovačla v samotném závěru procesu odlévání. Tím je snížen efekt odeznívání na minimum. Očkovačlo se ve formě tělísek nebo bloků umísťuje na dno lící jamky, do vtokového systému, nejčastěji pod vtokový

kůl, nebo před filtr. Volba tělíska je pro každý odlitek jiná, neboť záleží na hmotnosti kovu ve formě. Tělísko se rozpouští ideálně po celou dobu lití bez přítomnosti vzduchu. Použitím litých bloků se zabraňuje strhávání zrn očkovadla do objemu kovu. Dávkování očkovadla se pohybuje okolo hodnot 0,1 % u LLG a do 0,3 % u LKG. [1, 7]

### 3.6 Odezňování očkovacího účinku

Účinek očkování trvá pouze po omezenou dobu udržování taveniny a je znám pod pojmem odezňování. Největší účinek má očkovadlo ihned po přidání a rozpuštění v tavenině. V tomto účinném stavu přetrvává po dobu 10-15 minut. U některých druhů očkovadel, jako je například očkovadlo s přídavkem Ba, přetrvává až 30 minut. Účinek však s časem neustále klesá (obr. 7), na kterém je znázorněna závislost počtu eutektických zrn na době po naočkování u tří očkovadel s různým složením. [1, 9]



Obr. 7 Odezňování očkovacího účinku. [1]

Odezňování je důsledkem hrubnutí heterogenních zárodků, ke kterému dochází zejména jejich koagulací. Dále může docházet k hrubnutí vlivem difuzního procesu, růstem velkých zárodků na úkor malých. Tomuto jevu napomáhá zmenšení celkového mezifázového rozhraní částice-tavenina, přičemž se snižuje celková energie soustavy. Dále dochází ke snížení hustoty vměstků, při stejném celkovém objemu v tavenině a snižování míst vhodných pro nukleaci grafitu. [9]

Celý proces je ovlivňován mnoha faktory, jako je teplota udržované taveniny. Různé časy odezňování můžeme pozorovat u jiných druhů očkovadel s různou zrnitostí a chemickým složením. Očkovadlo s přídavkem prvků s nízkou atomovou hmotností vyplouvá na hladinu rychleji, než očkovadlo obsahující prvky s vysokou atomovou hmotností. [8]

Důsledkem odezňování může být snižování grafitizační schopnosti, kde vlivem zmenšování počtu heterogenních vměstků dochází ke snížování počtu eutektických buněk, kuliček grafitu u LKG. Zmenšením povrchu heterogenních zárodků dojde i ke zmenšení objemové nukleační rychlosti a může se objevovat ledeburit, neboli zákalka. [1, 9]

## 4 MODIFIKACE

Modifikace se provádí z důvodu zvýšení povrchového napětí na prismatických rovinách grafitu a vzniku kuličkového grafitu, jak bylo blíže popsáno v kap. 2.2.2. Modifikační účinek má stejně jako účinek očkování určitou dobu odeznívání. Tato doba je obvykle delší než doba odeznívání očkovadla. To může vést ke vzniku metastabilní struktury. Doba odeznívání modifikačního účinku je ovlivněna zejména:

- **počátečním obsahem hořčíku** – při vyšším obsahu je doba odeznívání delší,
- **pohybem hladiny** – pohyb hladiny urychluje odeznívání,
- **přeléváním kovu** – výrazně urychluje odeznívání modifikačního účinku,
- **teplotou kovu** – při vyšší teplotě dochází k rychlejšímu odeznívání,
- **povrch hladiny** – větší povrch zvyšuje reakční plochu a tím urychluje odeznívání.

Dávkování modifikátoru závisí na více faktorech, mezi které lze zařadit druh modifikátoru, velikost pánve, z důvodu probíhajících reakcí, metody modifikace a další. [1]

Teplota taveniny před modifikací je dána teplotou lití. Teplota lití u litiny s kuličkovým grafitem se pohybuje v rozmezí 1380-1480 °C, kde horní hranice je používána pro tenkostěnné odlitky. Spodní hranice je problematická z důvodu vyšší intenzity tvorby sekundární strusky. Vyšší teplota zlepšuje zabíhavost a snižuje pravděpodobnost výskytu povrchových vad, ale také zvyšuje stahování a tepelné namáhání forem. Z uvedeného vyplývá, že lící teplota bude vyšší o ztráty při manipulaci s kovem a o ztráty při modifikaci. Kvůli kvalitě kovu by ale neměla překročit hodnotu 1520 °C. [1]

### 4.1 Druhy modifikačních prostředků

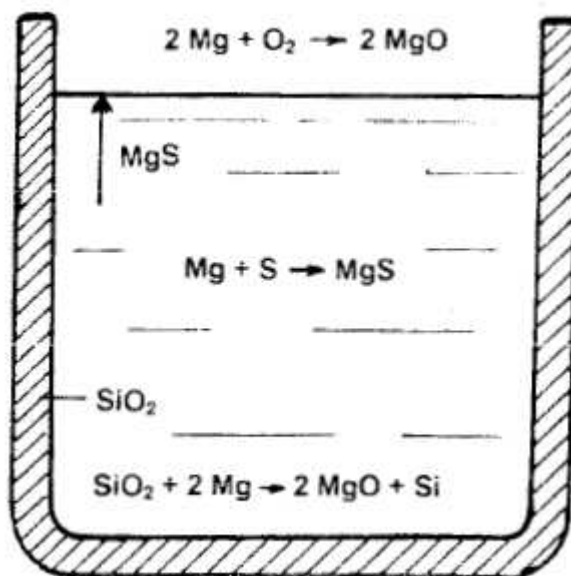
Hořčík je možné do taveniny přidávat jako kovový hořčík nebo předslitin hořčíku. [1]

- **Kovový hořčík** - je z důvodu velmi bouřlivé reakce s taveninou, kde dochází k prudkému vypařování a rozstříkávání kovu, možné používat pouze u metod modifikace v tlakových pánvích, sferoklávu nebo konvertoru. Díky čistému kovovému hořčíku se nevnáší do taveniny další prvky, nezvyšuje se křemík a nevzniká větší množství strusky, je však zapotřebí zvýšit očkování. Další výhodou je možnost odsíření při vysokém obsahu síry. Značnou nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady.
- **Předslitiny hořčíku s křemíkem** – jsou nejpoužívanějším typem, obsahují přibližně 5-25 % Mg, 43-48 % Si, 0,5-1,5 % Ca, méně jak 1,2 % Al a zbytek tvoří Fe. Dále lze přidávat i kovy vzácných zemin. Předslitiny s křemíkem mají nižší hustotu než tavenina, a proto je nutné zajištění proti vyplouvání na hladinu. Nezbytné je také správné sestavení vsázky s přihlédnutím na zvýšení obsahu křemíku v průběhu modifikace.
- **Předslitiny hořčíku s niklem** – jsou těžší a nemusí se tudíž zajišťovat proti vyplavání. Předslitiny obsahují přibližně 4-6 %, nebo 14-17 % Mg. Díky potopení ke dnu se snižuje oxidace na hladině a dochází ke klidnější reakci. Nevýhodou jsou vyšší náklady, a proto se používají zejména u austenitických litin s kuličkovým grafitem, nazývané Niresist.

## 4.2 Reakce vedoucí ke ztrátám hořčíku

Po namodifikování litiny začínají reakce hořčíku v tavenině zejména s okolím. Kvůli těmto reakcím dochází ke ztrátám až do odlití kovu. Jednotlivé procesy ztráty hořčíku jsou naznačeny na (obr. 8). Mezi tyto reakce lze zařadit:

- **Oxidaci hořčíku na hladině** – lze pozorovat v důsledku reakcí se vzdušným kyslíkem. Tyto ztráty rostou s rostoucím povrchem hladiny, jejím intenzivnějším pohybem a s rostoucí teplotou taveniny. Největší ztráty jsou pozorovány při přelévání kovu, kde se při jednom přelití ztratí přibližně 0,007-0,01 % hořčíku. Účinky tohoto jevu lze výrazně snížit použitím ochranné atmosféry.
- **Reoxidaci sekundární strusky** – je možné poznat pomocí stoupajícího bílého dýmu z taveniny, ke kterému dochází únikem MgO, při reakci sekundární strusky se vzdušným kyslíkem ( $2(\text{MgS}) + \{\text{O}_2\} = 2 \{\text{MgO}\} + [\text{S}]$ ). Síra se vrací zpět do kovu, kde dochází k dalším ztrátám vlivem navázání na další hořčík.
- **Reakci hořčíku s vyzdívkou a struskou** – obsahující  $\text{SiO}_2$  za vzniku křemičitanu hořečnatého ( $\text{MgSiO}_3$ ) nebo jiných. Tyto křemičitany tvoří sekundární strusku a vyplouvají na hladinu. Zároveň dochází k tvorbě vrstvy na hranici taveniny a vyzdívkových materiálů, čímž dochází k omezení odeznívání modifikačního účinku. Z uvedeného vyplývá, že u nově vyzděných pánví je rychlost odeznívání vyšší než u pánví již používaných. [1]



Obr. 8 Reakce související se ztrátami hořčíku. [1]

## 4.3 Aplikace modifikačního prostředku

Metod modifikace litiny s kuličkovým grafitem je mnoho. Volba vhodné metody záleží na dané slévárně a jejím sortimentu či vybavení. Slévárny pro velkosériovou produkci výrobků z LKG budou používat jiná zařízení, než slévárny s občasnými zakázkami na odlitky z LKG. Metody používané pro modifikaci jsou pestré, co se týče způsobu dávkování modifikovačů do taveniny, jejich druhem a využitím, kapacitou zařízení a také investičními

nároky. Mezi investiční nároky patří nejen počáteční náklady, ale také náklady na provoz. Velkou roli můžou hrát také tepelné ztráty při modifikaci. Metody se dají zjednodušeně dělit na polévací a ponořovací. [1]

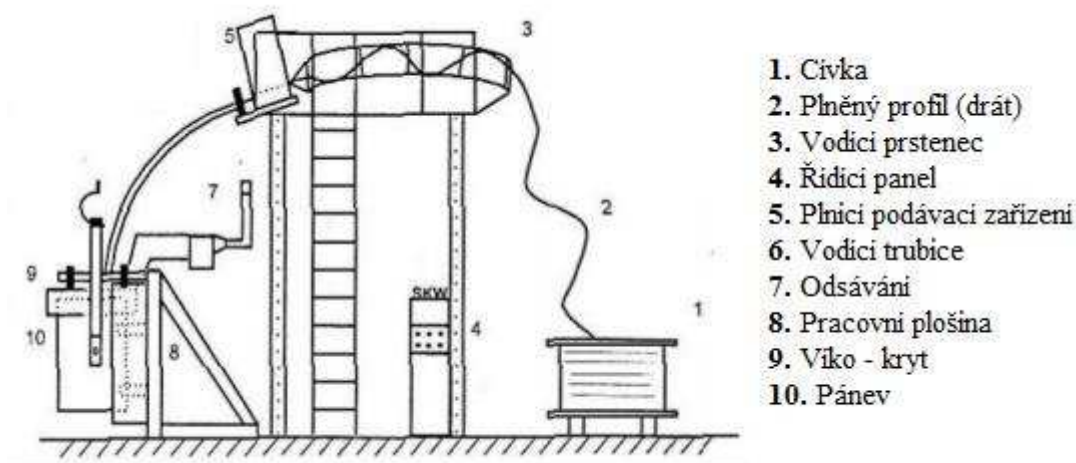
Polévací metody fungují na principu umístění modifikačního prostředku na dně modifikační pánve a následným přelitím kovem. Po této aplikaci je kov přelit zpět do transportní pánve nebo rovnou do pánve licí. Tyto metody patří k jednodušším a obvykle probíhají při atmosferickém tlaku nad hladinou taveniny. Mezi neznámější se řadí metody Sandwich a Tundish, případně modifikace v konvertoru. [1]

Ponořovací metody pracují na principu ponoření modifikačního prostředku do kovu. K ponoření je možné využít ponorný zvon, plněný profil, nebo jiný způsob. Tato zařízení často pracují za zvýšeného tlaku okolní atmosféry, čímž snižují bouřlivost reakce. Obecně jsou tyto metody nákladnější. Patří sem například metody modifikace plněným profilem, v tlakové pánvi, metoda MAP a investičně nejnáročnější modifikace ve sferoklávu. [1]

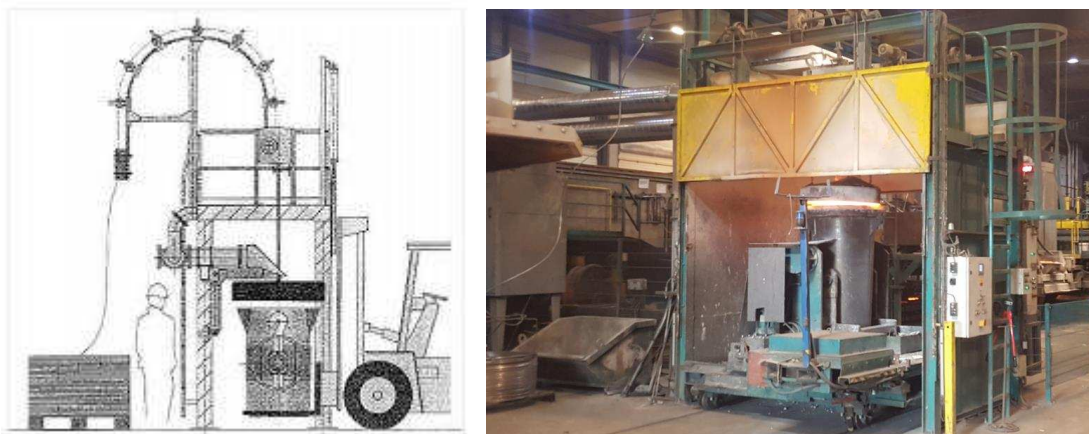
### 4.3.1 Modifikace plněným profilem

Metoda modifikace plněným profilem (obr. 9, obr. 10) je výhodná u formovacích linek z důvodu jednoduché automatizace procesu. Modifikační prostředek je obsažen v plněném profilu. K dávkování dochází odvíjením plněného profilu danou rychlostí přímo do taveniny. Stejně jako u očkování plněným profilem je množství modifikátoru dáno délkou profilu. Důležitým faktorem je rychlost odvíjení, která musí být dostatečná, aby k reakci docházelo u dna pánve, ale drát do pánve nenarážel. Mezi další faktory patří obsah síry v litině, obsah hořčíku v drátu, tvar pánve, teplota kovu, a další. [1, 10]

Hlavními částmi zařízení je soustava poháněných kladek, mezi kterými prochází drát, a vodící trubice zavádějící profil do taveniny. Drát, skládající se z nízkouhlíkaté ocelové trubky, naplněné hořčíkovou slitinou a dalšími přísadami, má průměr 5-13 mm a je do sléváren dodáván ve formě cívek. Obsah hořčíku ve slitině se pohybuje obvykle v rozmezí 13–25 % Mg, 20-40 % Si, 10-20 % Ca, 1 % KVZ, doplněno čistým Fe. Nevýhodou procesu může být vyšší cena plněného profilu. [1, 10]



**Obr. 9** Schéma zařízení pro modifikaci plněným profilem. [10]



**Obr. 10** Zařízení využívající pro modifikaci plněným profilem a) vysokozdvížné vozíky, b) pojezdové tratě. [10]

---

## 5 PRECONDITIONING

Preconditioning je u litin, jak napovídá název, proces úpravy tekutého kovu předcházející úpravám, jako je modifikace či očkování. Výsledkem použití těchto přísad se dosahuje stabilnější kvality kovu, zvýšení počtu nukleačních zárodků, snížení smršťování, snížení spotřeby surového železa a v neposlední řadě i zlepšení mechanických vlastností litiny. [11]

Po přidání látek preconditioningu dochází ke zlepšení podmínek pro nukleaci grafitu a zároveň ke stabilizaci klíčových vlastností kovu tak, aby poskytovaly dlouhodobý účinek až do ztuhnutí kovu. Díky lepším podmínkám pro nukleaci, které se projevují při následném očkování, není nutné spoléhat pouze na přidávaná očkovadla, jež nemusí při výrobě bez předúpravy kovu dostačovat k vytvoření kovu s požadovanými vlastnostmi. [11]

Pro výrobu litiny se, mimo jiné, často používá šrot o neznámém chemickém složení a vratný materiál, který může být z různých taveb o rozdílném chemickém složení. Tato skutečnost se projevuje rozdílnými vlastnostmi kovu u jednotlivých taveb. Pro stabilizaci kovu se může použít větší procento surového železa. Surové železo je však drahý vsázkový materiál, a proto je snaha jeho spotřebu nezvyšovat, ale dosáhnout stabilizace kovu právě užitím preconditioningu. [11]

Na trhu se vyskytuje spousta různých látek pro předúpravu litin. Některé lze přidávat přímo do pece při tavení kovu, zatímco další látky, jako je karbid křemíku, ferosilicium nebo ferosilicium s vysokým obsahem bária, jsou vnášeny do taveniny v pozdějším stádiu výroby, neboť se u nich projevuje odeznívací účinek. Tyto látky mohou být považovány za pre-inoculanty, neboli předočkování. [11]

## 6 PROVOZNÍ KONTROLA LITINY

Jako vsázka u litiny se používá zejména ocelový odpad, vratný materiál a surové železo. Z tohoto důvodu je po natavení třeba udělat kontrolu chemického složení. Výsledky kontrol musí být k dispozici před odlitím. Chemické složení se může měnit též s propalem či přípalem prvků nebo reakcí a ztrátou prvků.

Dále se ke zjištění kvality tekutého kovu, v čase od natavení do odlití, používají kontroly metalurgických vlastností, z nichž je velmi důležitá kontrola grafitizační schopnosti. Jedná se o kontrolu tendence litiny tuhnout dle stabilní rovnováhy. Grafitizace je ovlivněna chemickým složením litiny, stavem krystalizačních zárodků, teplotou přehřátí kovu a vlivy způsobené očkovaním a modifikací. Grafitizační schopnost se nejčastěji pozoruje na sklonu ke vzniku zákalky. [1]

Mezi nepoužívanější provozní kontroly litiny lze zařadit:

- Kontrolu chemického složení pomocí spektrální analýzy,
- upřesnění obsahu uhlíku a síry na spalovacím analyzátoru,
- kontrolu chemického složení a grafitizační schopnosti litiny pomocí termické analýzy,
- zákalkovou zkoušku pro vyhodnocení grafitizační schopnosti,
- kontrolu teploty taveniny pyrometrem.

[8]

### 6.1 Kontrola chemického složení

Kontrola chemického složení se nejčastěji provádí na optickém emisním spektrometru, který využívá jiskrového výboje mezi wolframovou elektrodou a vzorkem. Výsledkem měření na tomto spektrometru jsou obsahy všech běžných prvků v litině. Vzorek ve tvaru penízku o průměru kolem 3 mm a výškou necelých 0,5 mm musí pro tento typ analyzátoru ztuhnout bíle, metastabilně. Je nutné tedy zajistit rychlý odvod tepla, kterého se nejlépe dosahuje odléváním do měděných kokil (obr. 11). Takto ztuhlý vzorek má homogenní a jemnozrnnou strukturu bez vyloučeného grafitu.

K penízku jsou obvykle připojeny výčnělky, sloužící pro spalovací analyzátor. Spalováním je možné analyzovat obsahy síry a uhlíku přesněji, neboť výsledky z optického analyzátoru často nedosahují dostatečné přesnosti.



**Obr. 11** Měděná kokila na výrobu vzorku pro kontrolu chemického složení. [8]

Výsledky zkoušek by obvykle měly být k dispozici během 5-10 min. Z tohoto důvodu bývá spektrální analyzátor umístěn přímo v tavárně, nebo je vzorek dopraven potrubní poštou do laboratoře. Pokud je dle chemického rozboru nutná úprava taveniny, používají se ke korekci legury a předslitiny. [1]

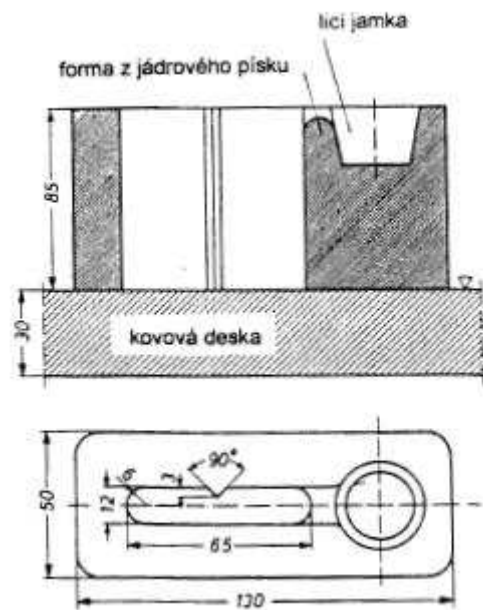
## 6.2 Zákalková zkouška

Jedná se o nejjednodušší a nejrychlejší provozní zkoušku grafitizační schopnosti litin. Odlitý zkušební vzorek má po čas tuhnutí v různých místech různou intenzitu ochlazování. V místech s nejvyšší rychlostí ochlazování vzniká vlivem metastabilního tuhnutí karbidická struktura, neboli zákalka. V místě s pomalou rychlostí ochlazování litina tuhne stabilně. V přechodové oblasti lze pozorovat makovou litinu, která je kombinací předchozích. Nejčastěji se používají dva typy zákalkových zkoušek:

- **Zákalková zkouška ISO** – využívá zkušební těleso (obr. 12, obr. 13) s převažujícím odvodem tepla v jednom směru. Forma z jádrového písku je umístěna na kovovou desku s minimální tloušťkou 30 mm, pro dostatečně velký odvod tepla z čela vzorku. Následkem ochlazování dojde k metastabilnímu tuhnutí do určité hloubky. Vzorek je přerážen a změřena hloubka bílé vrstvy, jež je měřítkem grafitizační schopnosti. [1]

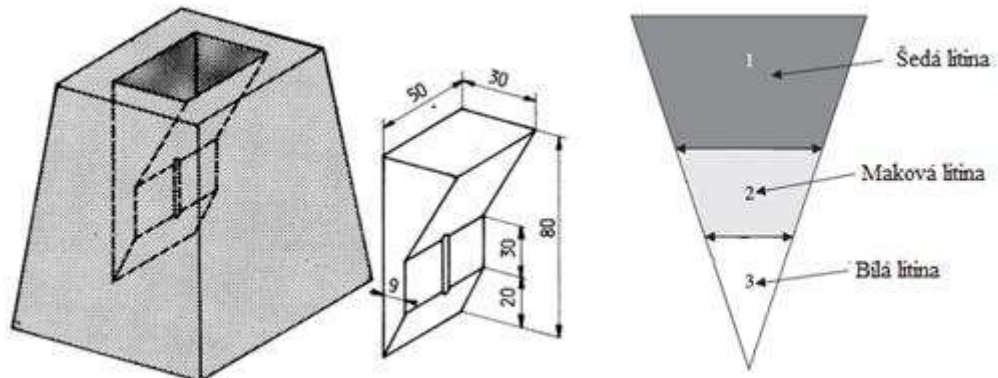


Obr. 13 ISO zákalková zkouška



Obr. 12 Schéma ISO zákalkové zkoušky [1]

- **Klínová zkouška** – pracuje s tělesem o proměnném průřezu. Zkušební těleso se odlévá do formy z jádrového písku (obr. 14a). Hodnocení probíhá podobně jako u zkoušky ISO dle hloubky bílé vrstvy (obr. 14b).



Obr. 14 Klínová zkouška a) zkušební těleso, b) Typy litiny v závislosti na průřezu tělesa. [12]

### 6.3 Termická analýza

Termická analýza se ve slévárenství využívá zejména ke zjištění chemického složení a stupně grafitizace. Funguje na základě vyhodnocení časového průběhu teploty při ochlazování a tuhnutí kovu. Vzorky se odlévají do kelímku obsahujícího termočlánek (obr. 15). Kelímky jsou obvykle vyrobeny metodou Croning, termočláanky v nich mohou být umístěny svisle nebo vodorovně a jsou chráněny keramickými nebo křemennými trubičkami. Doba tuhnutí kovu v kelímku by neměla překročit 5-6 min. [1]



**Obr. 15** Kelímek pro termickou analýzu.

Termoelektrické napětí je přenášeno z kelímku do záznamového zařízení. Termonapětí je konvertováno v A/D převodníku a dále se přenáší v digitalizované formě. Kelímek je konstruován tak, aby se jednoduše nasazoval na měřicí stojan a aby vyloučil chybné nasazení a převrácení polarity termočláanky. [1]

K vyhodnocení se používají křivky ochlazování společně s jejich první a druhou derivací. Hodnotí se průběh tuhnutí v metastabilní i stabilní soustavě. Pro hodnocení chemického složení se určuje uhlíkový ekvivalent, obsah uhlíku a křemíku. K tomuto účelu se kelímek opatří telurovým nátěrem, díky němuž kov ztuhne zcela bíle, metastabilně. [1]

Uhlíkový ekvivalent se určuje z jeho závislosti na teplotě likvidu. Pro stanovení obsahu křemíku slouží jeho závislost na eutektické teplotě při metastabilním tuhnutí. Po získání těchto hodnot již přístroj dopočítá obsah uhlíku. [1]

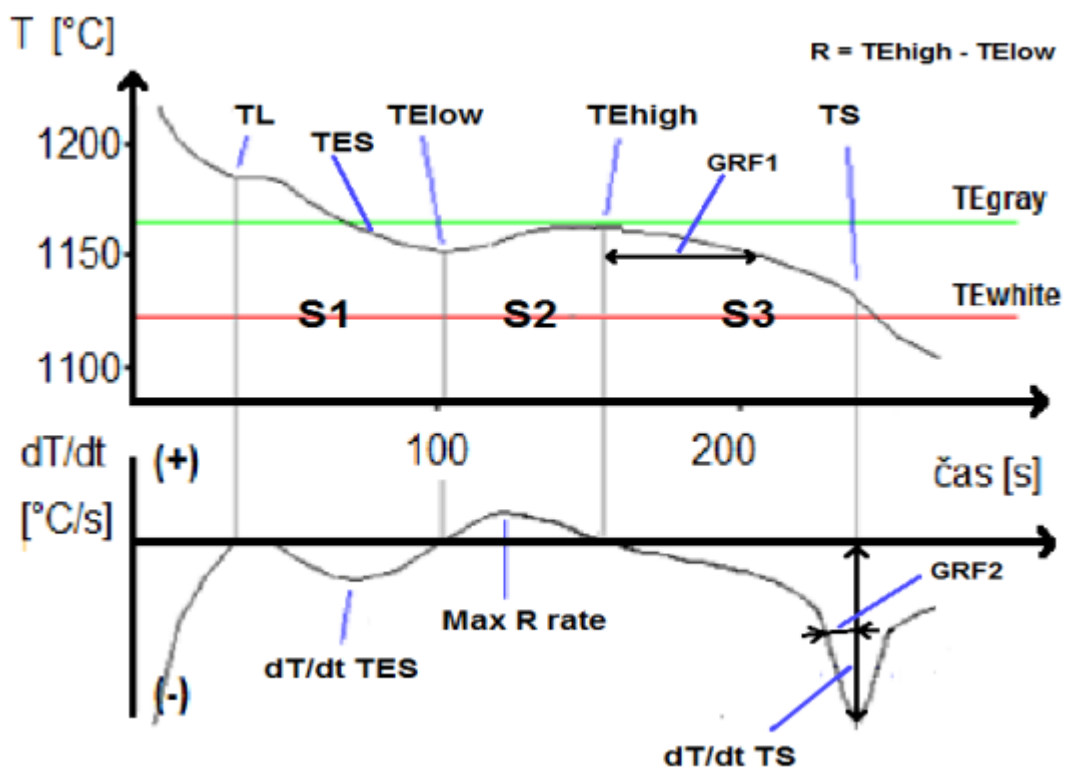
Grafitizační schopnost litiny lze posuzovat při stabilním tuhnutí, kelímek zde může být bez telurového nátěru. Hodnocení se provádí pomocí eutektické prodlevy vůči rovnovážné eutektické teplotě ve stabilním systému. S nižší skutečnou eutektickou prodlevou klesá grafitizační schopnost, jejímž měřítkem je rozdíl zjištěné a rovnovážné eutektické teploty. [1]

Termická analýza vyhodnocuje i další teplotní hodnoty a časové úseky, jak na křivce ochlazování, tak na křivkách derivací. Tyto údaje jsou uvedeny v tab. 2.

**Tab. 2** Hlavní parametry termické analýzy ATAS s jejich popisem a účinkem očkovaní na jejich hodnoty. [8]

Hlavní parametry	Popis	Žádoucí účinek očkovaní
<b>TL</b>	Teplota likvidu – první zdržení teploty na konstantní hodnotě, přičemž se do taveniny začne vylučovat pevná fáze. Pro eutektické složení taveniny platí $TL = TE_{low}$	Pokles
<b>TE<sub>low</sub></b>	Minimální eutektická teplota – od tohoto bodu teplota začíná narůstat až do bodu $TE_{high}$ , první derivace je zde rovna nule.	Nárůst
<b>TE<sub>high</sub></b>	Maximální eutektická teplota – teplota začíná opět klesat, první derivace je rovna nule.	Nárůst
<b>TES</b>	Teplota začátku tuhnutí eutektika, nevyskytuje se u eutektických litin.	Nárůst
<b>TS</b>	Teplota solidu – při této teplotě je ztuhnutý celý objem taveniny.	Nárůst
<b>GRF1</b>	První grafitizační faktor – udává čas, za který klesne teplota z hodnoty $TE_{high}$ o $15^{\circ}C$ . V tomto čase se v tavenině vylučuje grafit. Vysoká hodnota značí hodně vyloučeného grafitu.	Nárůst
<b>GRF2</b>	Druhý grafitizační faktor – úhel na křivce první derivace v oblasti TS. Nízká hodnota odpovídá vysoké tepelné vodivosti a je znakem vysokého množství vyloučeného grafitu.	Pokles
<b>dT/dt TS</b>	První derivace na teplotě solidu.	Pokles
<b>R</b>	Rekalescence – rozdíl teplot $TE_{high}$ a $TE_{low}$ . Optimální hodnota se pohybuje v hodnotách $2-5^{\circ}C$ .	Pokles
<b>ACEL</b>	Ekvivalent aktivního uhlíku (uhlík vyloučený jako grafit). Používá se hlavně při tavení, kde se dá jeho hodnota ještě upravit. Lze jím posuzovat kvalitu taveniny.	-
<b>HF</b>	Hyper funkce – definovaná uživatelem. Díky ní lze posoudit, jestli má litina eutektické nebo nadeutektické složení.	Pokles
<b>PA</b>	Množství primárního austenitu.	Pokles
<b>Max R rate</b>	Maximální rychlost rekalescence – max. hodnota první derivace mezi teplotami $TE_{low}$ a $TE_{high}$	Pokles

Pod pojmem termická analýza rozumíme vyhodnocování průběhu ochlazování-tuhnutí určitého zkušební tělesa, reprezentovaného křivkami ochlazování (obr. 16). Teplo uvolněné v průběhu ochlazování-tuhnutí je zcela závislé na procesu ochlazování a tedy i na faktorech, které proces ochlazování bezprostředně ovlivňují. Křivka ochlazování je tedy grafickou interpretací „historie“ ochlazování a současně všech činitelů, které proces ochlazování ovlivňují. Termická analýza je tedy využívána ke kontrole kvality nataveného kovu v průběhu metalurgického zpracování a před odléváním účinným nástrojem při zabezpečování spolehlivosti dosahované kvality vyráběných odlitků. Při termické analýze se vyhodnocuje tvar křivky ochlazování sledovaného kovu, zjišťují se charakteristické teploty a ty se přiřazují příslušným strukturním jevům. Nejčastěji se hodnotí průběh křivek ochlazování pouze v rozmezí teplot tuhnutí, stejně však lze zjišťovat vznik a průběh fázových přeměn v tuhém stavu. Všechny tepelně zbarvené reakce, zachycené křivkou ochlazování, jsou spojeny se strukturními změnami v kovu. Termická analýza je tedy analýzou fázovou.



Obr. 16 Křivka tuhnutí s vyznačenými parametry. [8]

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo otestovat postup, při kterém by byl eliminován lidský faktor na prvním stupni očkování. Ten uskutečňovala obsluha licího zařízení při přelévání kovu z transportní pánve do licího zařízení. Druhý stupeň očkování byl zachován, neboť probíhá automaticky foukáním do proudu kovu. Jako možná náhrada prvního stupně očkování byla zvolena technologie preconditioningu. Bylo tedy nutné ověřit účinky preconditioningu na strukturu a kvalitu litiny s kuličkovým grafitem. Tyto účinky bylo možné ověřit termickou analýzou ATAS. Z odlitků byl odebrán vzorek sloužící k vyhodnocení struktury a vlastností vyloučeného grafitu (množství, velikost, tvar a rozložení) obrazovou analýzou. Mechanické vlastnosti litiny byly získány tahovou zkouškou na samostatně odlitém vzorku a tlakovou zkouškou přímo na odlitku. Při návrhu bylo nutné brát ohled i na ekonomickou stránku věci.

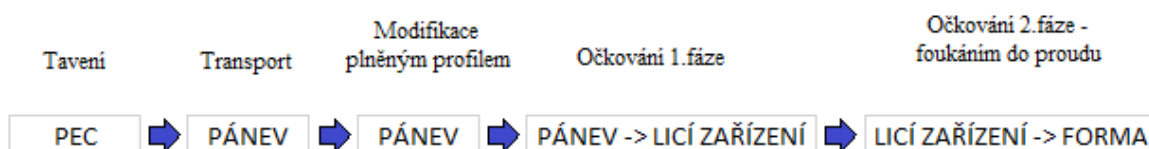
### 7.2 Příprava tekutého kovu

#### Tavení

Tavení kovu bylo prováděno ve dvou středofrekvenčních pecích o kapacitě 6 tun. Kov byl roztaven a ohřát na teplotu 1420°C. Při dosažení této teploty došlo k odebrání vzorku pro spektrální analýzu chemického složení. Na základě výsledků analýzy bylo provedeno dolegování tekutého kovu. Následně se kov ohřál na teplotu 1550°C.

#### Transport kovu a jeho průběžná úprava

Při dosažení dané teploty kovu následoval odpich do transportní pánve o kapacitě 1 tuny. Pánev pokračovala po pojezdové trati k modifikačnímu boxu. Po uzavření vozíku s pávní v boxu byla spuštěna modifikace tekutého kovu plněným profilem (kap. 4.3.1) s využitím modifikátoru RUMAG 25 QR (tab. 4). Po dokončení procesu pánev pokračovala dále, kde došlo ke stažení strusky obsluhou. Obsluha následně přesunula pánev před licí zařízení KOINS. Při přelévání kovu do licího zařízení obsluha ručně spustila první fázi očkování. Jedná se o očkování s využitím očkovačla SNAM HIBACAL (tab. 5) se zrnitostí 2-6 mm. Proces transportu kovu a jeho úpravy je schematicky znázorněn na časové ose (obr. 17).



Obr. 17 Posloupnost operací při přípravě kovu.

## Odlévání

K odlévání kovu byl použito automatické odlévací zařízení KOINS. Toto zařízení o kapacitě 2 tuny slouží pouze jako udržovací a nemá možnost kov přehřívát. Po vyprázdnění poloviny kapacity odlévacího zařízení byl vždy dopraven další kov transportní pánví. Z uvedeného vyplývá, že kov byl promícháván nejen v rámci jednotlivých pánví, ale docházelo také k promíchávání kovu z obou pecí, při odpichu do poslední transportní pánve z první tavby a první transportní pánve z tavby druhé. Při samotném odlévání docházelo k druhé fázi očkovaní foukáním do proudu kovu (kap. 3.5) očkovačem SNAM HIAL (tab. 5) se zrnitostí 0,2-0,7 mm.

## Složení vsázky

Pro výrobu tekutého kovu byly použity následující suroviny:

- ocelový šrot,
- vlastní vrat litiny s kuličkovým grafitem (vtokové soustavy a neshodné odlitky),
- pig nod,
- cizí vrat,
- plechy Si,
- nahličovadlo,
- ferosilicium FeSi 75,
- karbid křemíku SiC.

## Chemické složení litiny GGG50

Chemické složení odlévaného kovu se pohybovalo v předepsaných mezích (tab. 3) pro výrobu v slévárně KASI Nový Bydžov.

**Tab. 3** Mezní hranice obsahu prvků v odlévaném kovu

Prvky	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	Mg [%]
<b>GGG 50</b>	3,66-3,73	2,47-2,58	0,28-0,30	0,01-0,02	0,04-0,05

## Očkovačla, modifikátor a preconditioning

Složení užívaného modifikátoru ve formě plněného profilu je uvedeno v tab. 4. Chemické složení očkovačel pro obě fáze očkovaní jsou uvedeny v tab. 5, spolu s chemickým složením přípravku SNAM X BACAL sloužícímu k preconditioningu. [14]

**Tab. 4** Chemické složení modifikátoru

Prvky	Si [%]	Mg [%]	CeMM [%]	Fe [%]
<b>RUMAG 25 QR</b>	46,1	24,7	2,83	zbytek

**Tab. 5** Chemické složení využívaných očkovaadel [14]

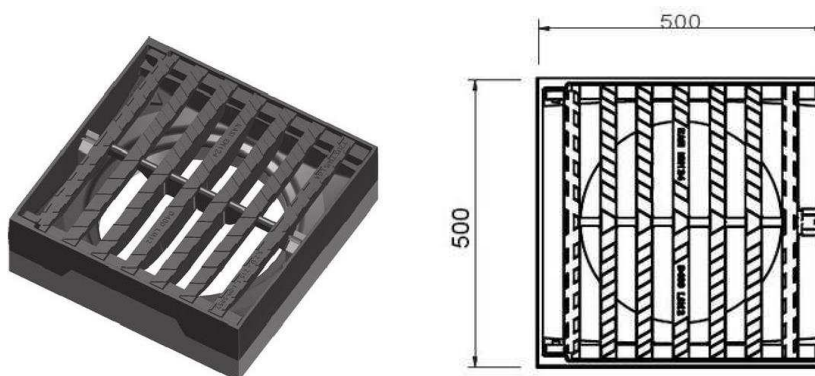
Prvky	Si [%]	Ca [%]	Al [%]	Ba [%]	Fe [%]
SNAM HIAL	70-75	0,5-1,0	3,5-4,5	-	zbytek
SNAM HIBACAL	65-75	1,0-2,0	0,5-1,5	2,0-3,0	zbytek
SNAM X BACAL	60-65	0,8-1,5	0,8-1,5	7,0-11,0	zbytek

### 7.3 Volba odlitku

Pro experiment byl vybrán odlitek vtokové mříže (obr. 18) s označením LM12 a vlastnostmi uvedenými v tab. 6, odlévaný ve velkých sériích z litiny EN-GJS-500.

**Tab. 6** Vlastnosti odlitku mříží LM12

Materiál mříže	Litina s kuličkovým grafitem
Označení mříže	LM12 EN124 D400
Hmotnost	20 kg
Rozměry	500x500x82 mm
Vtokový průřez	1300 cm <sup>2</sup>
Štěrba	35 mm
Norma	ČSN EN124

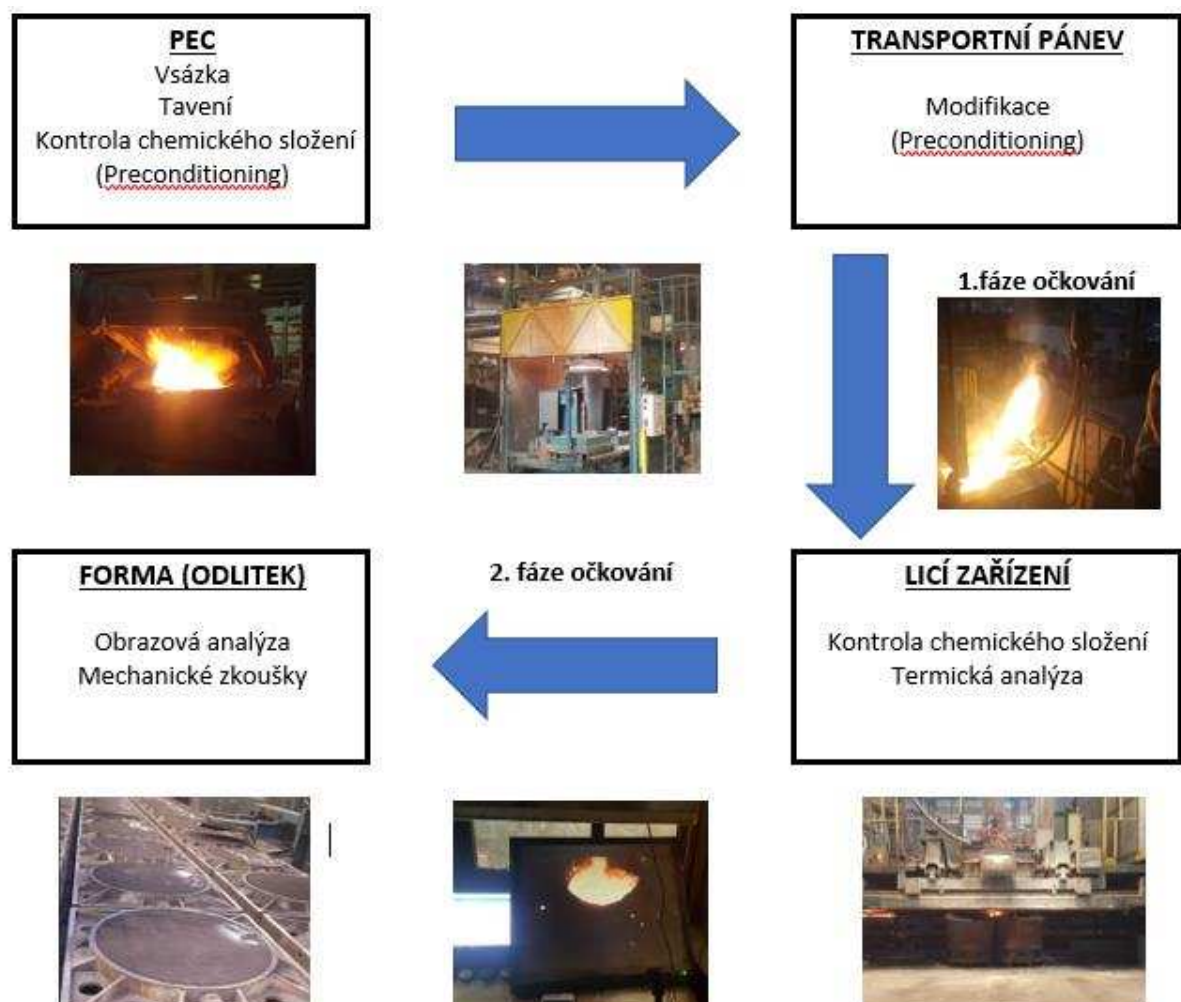
**Obr. 18** Mříže LM12 EN124 D400. [13]

## 7.4 Zkoušky

Pro získání požadovaných výsledků účinku preconditioningu na strukturu a vlastnosti litiny byly využívány tyto zkoušky:

- termická analýza (ATAS),
- obrazová analýza struktury,
- tahová zkouška,
- zkouška plného zatížení,
- kontrola chemického složení.

Všechny zkoušky byly provedeny pro 5 způsobů očkování, z čehož se jednalo o jeden základní stav bez využití preconditioningu a 4 varianty s jeho využitím. Tyto 4 varianty se lišily zejména časem a způsobem, ve kterém byl preconditioning aplikován. Aplikace jednotlivých očkovaadel a preconditioningu jsou znázorněny ve schématu (obr. 19).



**Obr. 19** Schéma procesu přípravy kovu a časová posloupnost prováděných zkoušek

### 7.4.1 Termická analýza (ATAS)

Zkoušky byly prováděny za běžného denního provozu linky. Chemické složení litiny s kuličkovým grafitem bylo dodržováno ve stanovených mezích po celou dobu zkoušek. Na odlévacím zařízení nebylo možné zajistit stabilní teplotu kovu pro každé měření, neboť zde kov postupně chladne a jeho teplota se zvyšuje pouze při přelití kovem z další transportní pánve.

Metodika odběru termické analýzy byla zvolena v závislosti na taktu linky, neboť každé měření trvalo přibližně 7 minut. Při vhodném odlévaném sortimentu bylo možné zajistit 2 fáze odběru kovu a měření termickou analýzou. První odběr kovu z licího zařízení proběhl 2 minuty po přelití kovu z transportní pánve do licího zařízení. Druhý odběr kovu bylo možné provést ihned po ukončení prvního měření a výměně termočlánkových kelímků, což odpovídá času 10 minut po přelití kovu z transportní pánve do licího zařízení.

Pro posouzení kvality kovu termickou analýzou, byly vybrány následující parametry (blíže popsáné v tab. 2):

- CEL – uhlíkový ekvivalent,
- TL – teplota likvidu,
- TE<sub>low</sub> – minimální eutektická teplota,
- TE<sub>high</sub> – maximální eutektická teplota,
- R – rekalescence,
- GRF1 – první grafitizační faktor,
- GRF2 – druhý grafitizační faktor,
- TS – teplota solidu,
- dT/dtTS – první derivace na teplotě solidu.

Ideální očkovací účinek byl posuzován dle výše výsledných hodnot parametrů (dle tab. 2):

- nejvyšší hodnoty – TE<sub>low</sub>, TE<sub>high</sub>, TS, GRF1,
- nejnižší hodnoty – R, TL, GRF2, dT/dtTS.

#### Měření s vložením očkovač do kelímku

První fázi měření bylo možné zajistit 2 minuty po přelití kovu z transportní pánve do licího zařízení, neboť bylo třeba vyčkat na stažení strusky obsluhou. Poté došlo k odběru kovu z licí pánve v místě určeném pro přelévání kovu. První naběračka sloužila k odlití vzorku pro spektrální analýzu. Poté byl nabrán čerstvý kov a došlo k odlití dvou kelímků s termočlánkem. Držák s vývody do AD převodníku umožňuje měřit vždy maximálně 2 kelímky současně.

V první fázi se použily 2 kelímky, ve kterých kov tuhnul stabilně. V prvním kelímku se zanedbal vliv druhé fáze očkování foukáním do proudu kovu při odlévání. Do druhého kelímku bylo přesně odváženo očkovač simulující druhou fázi očkování. Tato varianta umožnila vyhodnocení funkce první fáze očkování, popřípadě funkci preconditioningu, bez ovlivnění očkování foukáním do proudu kovu při odlévání.

Z uvedených informací vyplývá, že když při kapacitě pece 6 tun byl kov odpíchnut do šesti transportních pánví, proběhlo tedy 6 měření každého typu a bylo spotřebováno 12 termočlánekových kelímků.

### Měření s využitím kelímku s telurovým nátěrem

Druhou fází měření bylo možné zajistit přibližně 10 minut po přelití kovu z transportní pánve do liciho zařízení, neboť bylo třeba vyčkat na dokončení předchozího měření. Poté došlo k odběru kovu naběračkou pro odběr vzorku na spektrální analýzu z lici pánve v místě určeném pro přelévání kovu.

V této fázi se použil jeden kelímek s přesně odváženým očkovadlem jako ve fázi první, ale druhý kelímek byl s obsahem fosforu, který zajistil, že kov ztuhnul zcela metastabilně. Tato kombinace umožňovala porovnávat kelímky s očkovadlem po uplynutí doby přibližně 8 minut. Přitom však bylo možné dostat nová data, díky kovu v kelímku s termočlánekem s telurovým nátěrem, který ztuhl bíle.

Opět bylo na jednu pec spotřebováno stejné množství kelímků jako v předchozí fázi.

## 7.4.2 Obrazová analýza pro vyhodnocení struktury

Obrazová analýza byla prováděna na interním pracovišti technické kontroly ve slévárně KASI Nový Bydžov. Pro odběr bylo zvoleno místo na odlitku (obr. 20), které se v minulosti zdálo problematické vzhledem k tvorbě zákalky. Vzorek byl následně broušen a vyleštěn pomocí diamantové suspenze Struers DiaDuo.

Připravený vzorek byl zkoumán na mikroskopu. Nejprve došlo ke zkoumání v základním leštěném stavu pro analýzu počtu grafitických útvarů (kuliček). Při tomto kroku bylo také možné zjistit procentuální podíl grafitu v litině a poloměr grafitických kuliček.

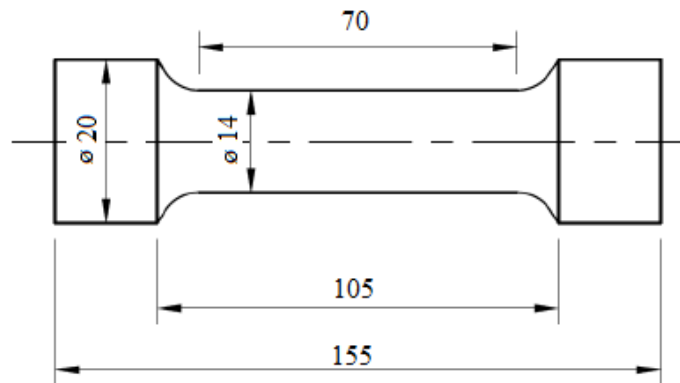
Po ukončení první fáze zkoumání byl vzorek naleptán a vložen znovu pod mikroskop. Po naleptání bylo na vzorku možné analyzovat strukturu. Tímto krokem byl analyzován procentuální podíl feritu a perlitu ve zkoumaném vzorku. V naleptaném stavu došlo také k analýze struktury z hlediska výskytu zákalky.



**Obr. 20** Odlitek s vyznačeným místem odběru vzorku pro obrazovou analýzu.

### 7.4.3 Tahová zkouška

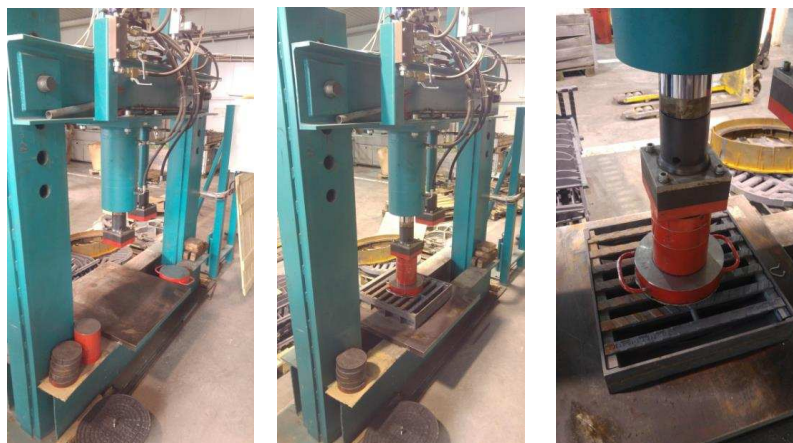
Zkoušky tahem byly vykonávány na přístroji Hegewald a Peschke - inspekt 100 table. V první fázi byla jedna zkušební tyčka na 6 tun kovu, což odpovídá kapacitě jedné pece, tedy jedné tavnice, odlita do vlastní formy z jádrové směsi. Rozměry zkušební tyčky jsou zobrazeny na obrázku (obr. 21). V druhé fázi měly být tyčky vysoustruženy přímo z odlitku, z nosných částí mříží. Tyto tyčky byly testovány, ale naměřené hodnoty byly zkresleny osovou ředinou vyskytující se ve všech zkouškách. Skutečnost výskytu této řediny však nebyla dříve známa, protože při pevnostních zkouškách tohoto odlitku nedošlo nikdy k prasknutí v místě, kde se odebíral vzorek pro tuto tahovou zkoušku.



Obr. 21 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem.

### 7.4.4 Zkouška plného zatížení

Jedná se o zkoušku běžně využívanou ve společnosti KASI spol. s r.o. pro kontrolu nosnosti mříží. Zkoušky byly vykonávány na zkušebním lisu (obr. 22). Mříž LM12 byla upnuta do rámu LMR12 a byla vycentrována na plošině zkušebního stroje, čímž byla připravena na zkoušku. Jedná se o destruktivní zkoušku, při které se postupně zvyšuje zatížení rychlostí 4 kN/s. Zkouška probíhala do porušení zkoušeného tělesa. Následně došlo k odečtení maximálního použitého zatížení před mechanickým poškozením. Zkoušky byly vykonané na minimálně dvou kusech odlitých mříží. U variant, které dosahovaly stabilně vyšších hodnot mechanických vlastností, bylo provedeno další měření.



Obr. 22 Zkušební lis KASI 2009.

### 7.4.5 Kontrola chemického složení

Pro kontrolu chemického složení byl využíván spektrální analyzátor SPEKTROMAX a spalovací analyzátor ELTRA CS 800. Spektrální analyzátor vyhodnocoval na dostatečné úrovni všechny potřebné prvky s výjimkou obsahu uhlíku a síry. Obsahy těchto prvků bylo zapotřebí upřesnit na spalovacím analyzátoru.

## 7.5 Varianty úpravy kovu

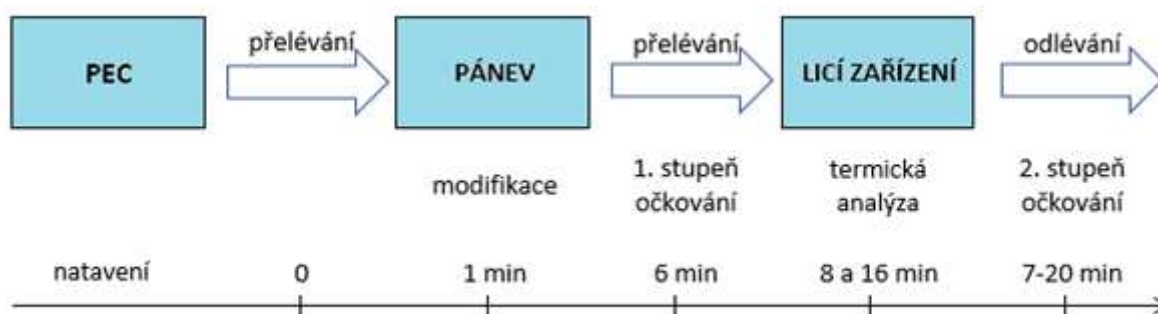
Před začátkem experimentu bylo rozplánováno, jaké způsoby dávkování preconditioningu se budou testovat. Zprvu bylo zapotřebí zmapovat výchozí stav a následně byly zvoleny 4 varianty dávkování preconditioningu dle doporučení jejich výrobců. Tyto varianty jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 7.5.1 Varianta 1 – Základní stav

#### Metodika aplikace

Výchozím stavem ve slévárně KASI Nový Bydžov bylo dvoufázové očkování litiny s kuličkovým grafitem. První fáze očkování probíhala při přelévání kovu po modifikaci z transportní pánve do licího zařízení, přičemž bylo použito 2,5 kg očkovačla SNAM HIBACAL (tab. 5). Druhá fáze očkování již probíhala automaticky při odlévání do formy. Pro druhou fázi se používalo dávkování očkovačla foukáním do proudu kovu. Bylo používáno očkovačlo SNAM HIAL (tab. 5) s dávkováním 0,15 % hmotnosti kovu.

Při první fázi očkování se velmi často vyskytovaly problémy, neboť obsluha byla nucena nastavit zařízení (obr. 24) pro foukání očkovačla SNAM HIBACAL do proudu kovu ručně. Problémem bylo také poměrně časté ucpávání nebo prasknutí hadičky se vzduchem, což vedlo k odstavení tohoto jednoduchého zařízení. V takovém případě obsluha pouze vysypala příslušné množství (2,5 kg) očkovačla na hladinu kovu v transportní pánvi a urychleně přelila kov do licího zařízení, čímž došlo k promíchání očkovačla s kovem.



**Obr. 23** Schéma postupu přípravy kovu u varianty 1.



**Obr. 24** Zařízení pro aplikaci očkovačla v první fázi.

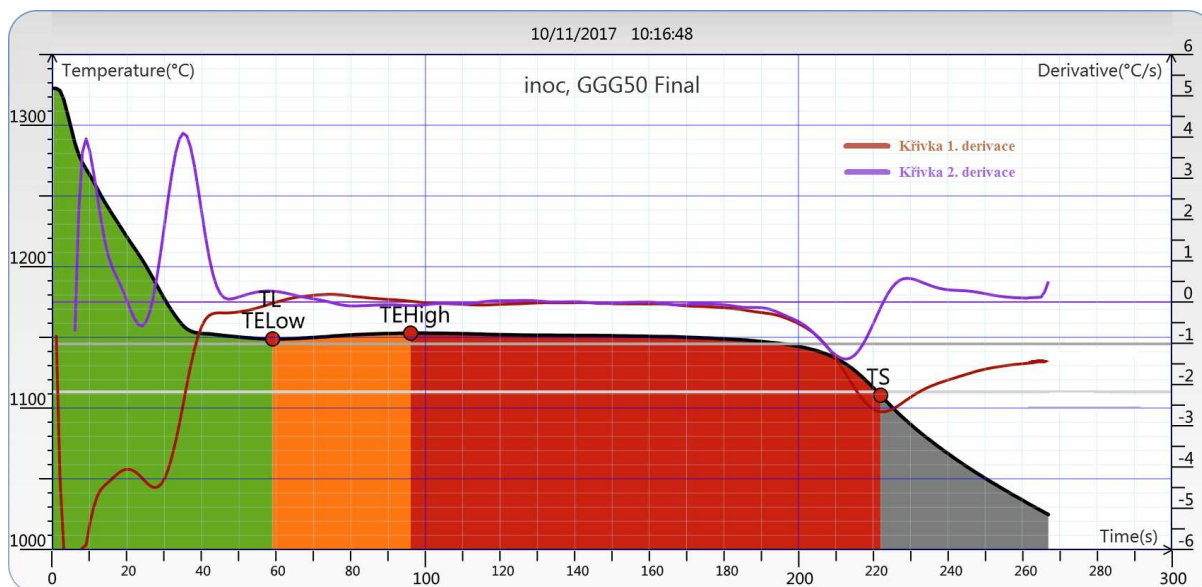
### Termická analýza

Výsledné parametry uvedené v tabulce (tab. 7) byly získány z termické analýzy pro kelímek s přidáním příslušným množstvím očkovačla, simulujícím druhou fázi očkování, v momentě odlévání odlitků varianty 1, které byly použity pro zkoušky mechanických vlastností a pro získání výbrusů pro obrazovou strukturní analýzu. Křivka chladnutí pro uvedené měření je zobrazena na obr. 25. Dále bylo prováděno i průběžné měření kvality kovu bez očkovačla, u kterého z důvodu posouzení účinku očkovačla v závislosti na čase, byl vzorek pro termickou analýzu z každé pánve odebrán dvakrát, nejdříve cca po 2 minutách od přelití kovu a následně cca po 10 minutách. (tab. 8).

Zapůjčená termická analýza ATAS ovšem chybně určovala hodnoty teploty liquidu (TL), které byly označovány jako shodné s teplotou  $TE_{low}$ , a proto není tento parametr v tabulce (tab. 7) uváděn. Stejný problém nastal i pro průběžné měření bez přidání očkovačla (tab. 8).

**Tab. 7** Parametry termické analýzy vyhodnocené pro variantu I/3.

Varianta	CEL	$TE_{low}$	$TE_{high}$	TS	R	GRF1	GRF2	Pánev	Čas "O"
I/3	4,22	1148,9	1153,0	1109,1	4,1	89	68	3.	3 min



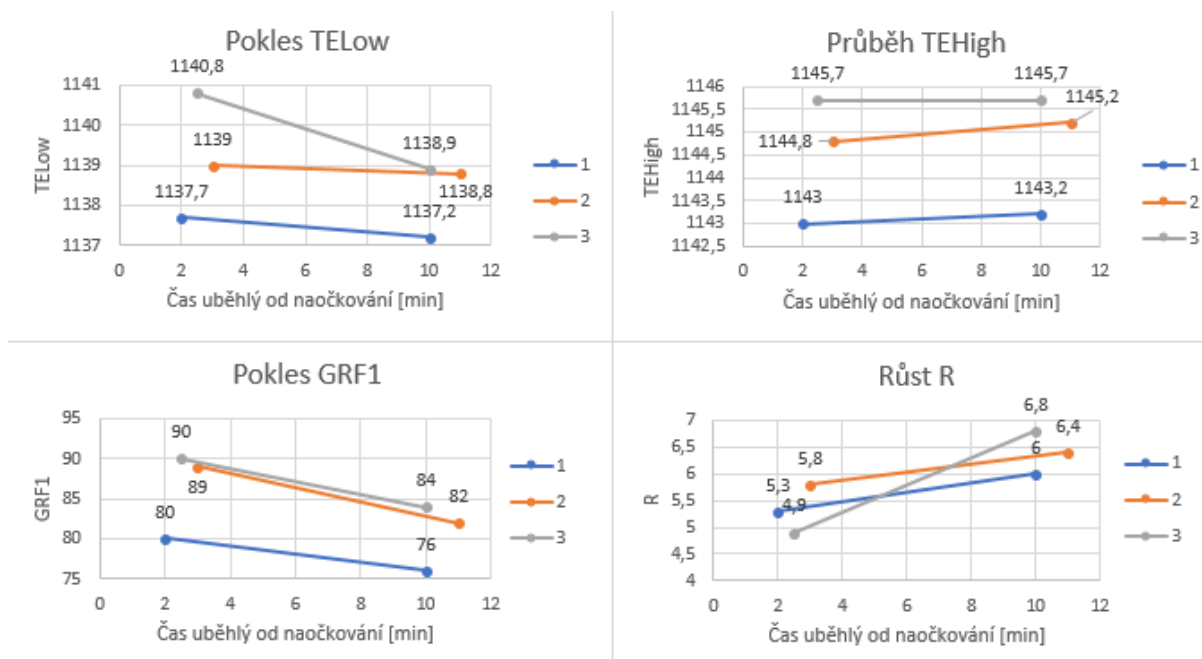
Obr. 25 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu I/3.

Tab. 8 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovačla, pro variantu 1.

Pánev	Čas "O" [min]	Parametry									
		TL	TELow	TEHigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
1.	2	1137,7	1137,7	1143,0	1090,7	-0,04	-2,01	5,3	80	121	4,32
	10	1137,2	1137,2	1143,2	1091,4	-0,04	-2,17	6	76	108	4,33
2.	3	1139,0	1139,0	1144,8	1091,0	-0,05	-2,1	5,8	89	116	4,31
	11	1138,8	1138,8	1145,2	1088,0	-0,06	-2,44	6,4	82	78	4,31
3.	2,5	1140,8	1140,8	1145,7	1094,5	-0,05	-1,91	4,9	90	128	4,3
	10	1138,9	1138,9	1145,7	1094,2	-0,04	-2,08	6,8	84	114	4,31
4.	9	1140,4	1140,4	1147,2	1094,3	-0,05	-1,96	6,8	85	128	4,3
5.	8,5	1137,1	1137,1	1146,0	1094,5	-0,07	-2,13	8,9	75	109	4,33
Čas "O" – čas uběhlý od naočkování											

Pro názornější zobrazení byly výsledky vybraných paramterů uvedeny do grafů pro jednotlivé transportní pánve v závislosti na čase od očkování. (obr. 26).

Z uvedených grafů je možné pozorovat zhoršení vlastností litiny v závislosti na čase mezi jednotlivými měřeními, neboť při měření cca 2 minuty po přelití kovu jsou výsledné parametry lepší, než u měření cca 10 minut po přelití.



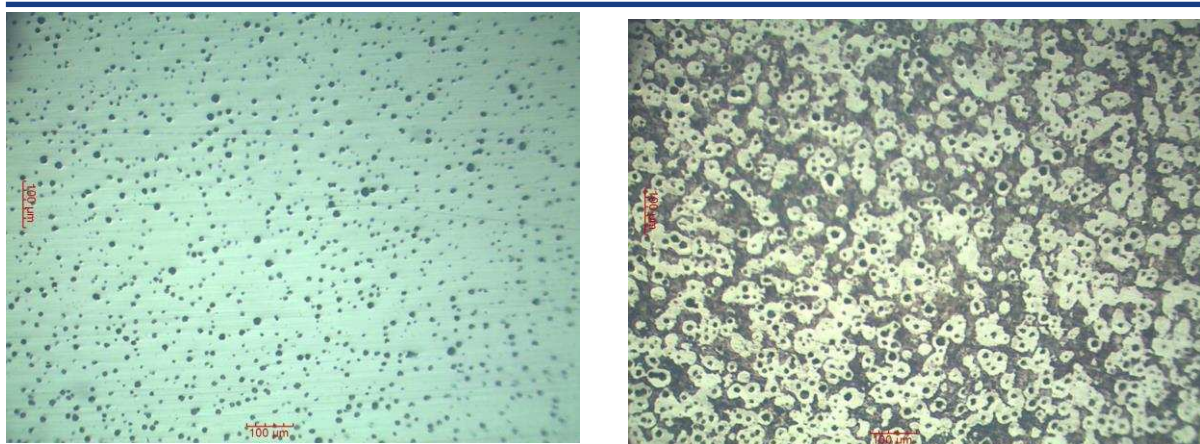
Obr. 26 Grafy průběhu jednotlivých parametrů termické analýzy v závislosti na čase.

### Obrazová analýza

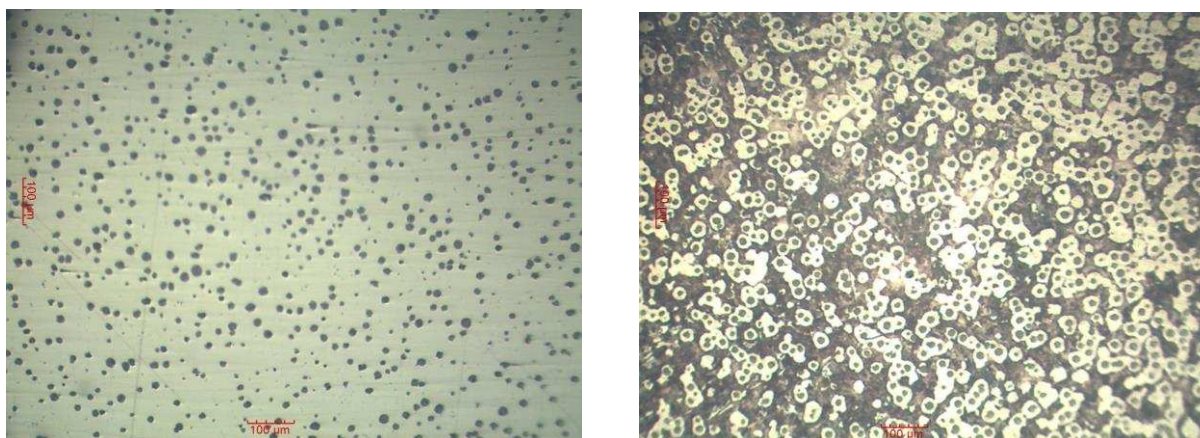
Pro obrazovou analýzu první varianty byly využity 3 vzorky z mříží LM12, odlité v různých časech výroby. Mříže pro vzorky s označením 1 a 2 byly odlity z jedné tavby, ale vzorek číslo 1 (obr. 27) byl odlit po přelití kovu z druhé transportní pánve do licího zařízení, kdežto vzorek číslo 2 (obr. 28) po přelití pánve páté. Vzorek s označením 3 (obr. 29) byl odlit po přelití třetí pánve, ale při jiné tavbě. Zákalka se u odlitku 1 (obr. 30) a 2 nevyskytovala. U odlitku 3 byla zaznamenána do vzdálenosti 0,6 mm od okraje žebra (obr. 30). Výsledky obrazové analýzy jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Výsledky analýzy struktury pro varianty I/1, I/2 a I/3.

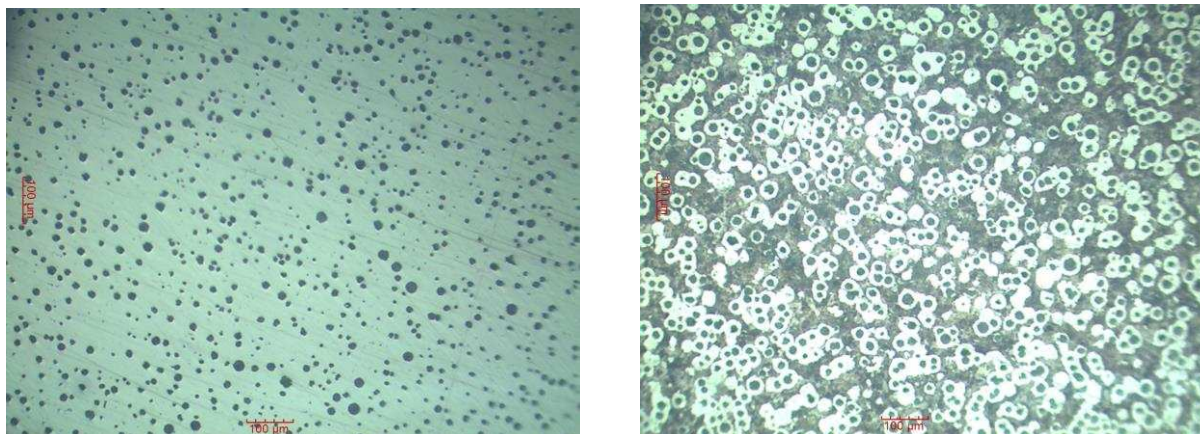
Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
I/1	1177	8,8	64	27,3	8,7	0
I/2	795	12	35	54,6	10,4	0
I/3	946	10,6	48	41,6	10,4	0,6



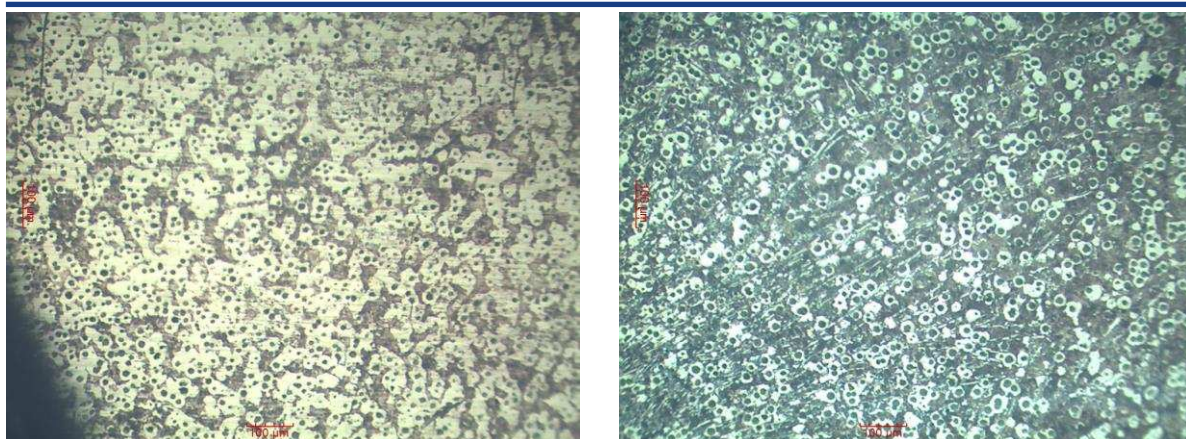
**Obr. 27** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/1: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 28** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/2: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 29** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/3: a) neleptaný stav, b) leptaný stav



**Obr. 30** Struktura na samém konci žebra: a) I/1- bez zákalky, b) I/3- zákalka 0,6 mm.

### Zkoušky mechanických vlastností

Pro posouzení mechanických vlastností byla provedena zkouška plného zatížení a zkouška tahem. Pro zkoušku plného zatížení bylo při variantě 1 použito šest odlítků mříží LM12. Výsledky zkoušky plného zatížení byly zapsány do tabulky (tab. 10) jako nosnost.

Další zkouškou pro zjištění mechanických vlastností byla zkouška tahem. Pro zkoušku tahem byla využita odděleně litá tyčka, její pevnost je také zapsána v tabulce (tab. 10) spolu s tažností.

**Tab. 10** Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty I/1, I/2 a I/3.

Varianta	Pánev	Nosnost [kN]			Rm [MPa]	A [%]
		měření 1.	měření 2.	AP		
I/1	2.	497,3	490,4	493,9	585	10,1
I/2	5.	507,1	503,6	505,4	585	10,1
I/3	3.	493,5	507,1	500,3	593	11,2
AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost						

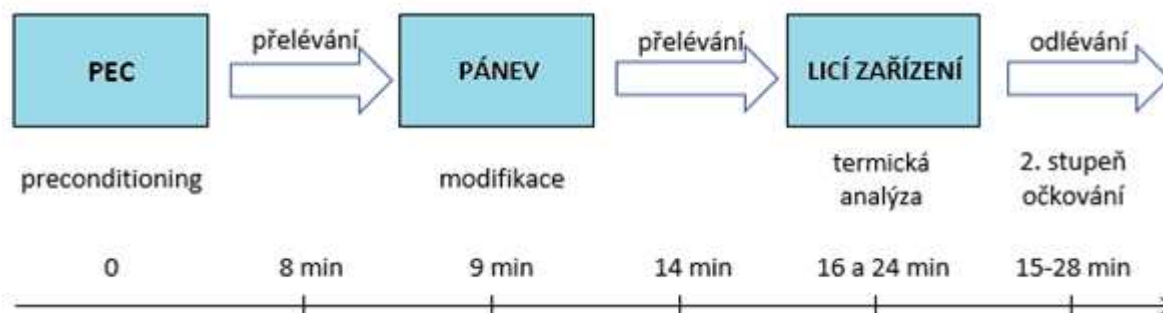
Z dat v tabulce vyplývá, že se výsledky zkoušky plného zatížení pohybují v rozmezí 20 kN. Nejlepších výsledků, potvrzených získáním aritmetického průměru, dosahoval při variantě 1 vzorek s označením 2.

## 7.5.2 Varianta 2 – Preconditioning do pece

### Metodika aplikace

Varianta s označením 2 byla první variantou s využitím preconditioningu dle doporučení výrobce. Přípravek sloužící k preconditioningu byl přidán přímo do tavicího zařízení během odběru vzorku pro kontrolu chemického složení při teplotě 1420 °C. Tento způsob aplikace je pro obsluhu tavicího zařízení jednoduchý. Doporučené dávkování přípravku bylo 0,4 % z hmotnosti kovu. U kapacity pece přibližně 6 tun, dle opotřebení vyzdívky, toto procentuální dávkování odpovídá 25 kg preconditioningu na jednu pec. Poté došlo ke standartnímu ohřátí na teplotu 1550 °C a dále standartnímu procesu odpichu.

Po modifikaci kovu nedocházelo k první fázi očkovaní. První fáze byla vynechána, aby bylo možné posoudit vliv preconditioningu na kov bez zkrácení termické analýzy touto fází očkovaní. Dále byl tímto krokem odstraněn problém, popsáný u varianty 1 (kap. 7.5.1). Druhá fáze očkovaním do proudu kovu při lití byla zachována a probíhala se standartním dávkováním 0,15 % z hmotnosti kovu ve formě.



Obr. 31 Schéma postupu přípravy kovu u varianty 2.

### Termická analýza

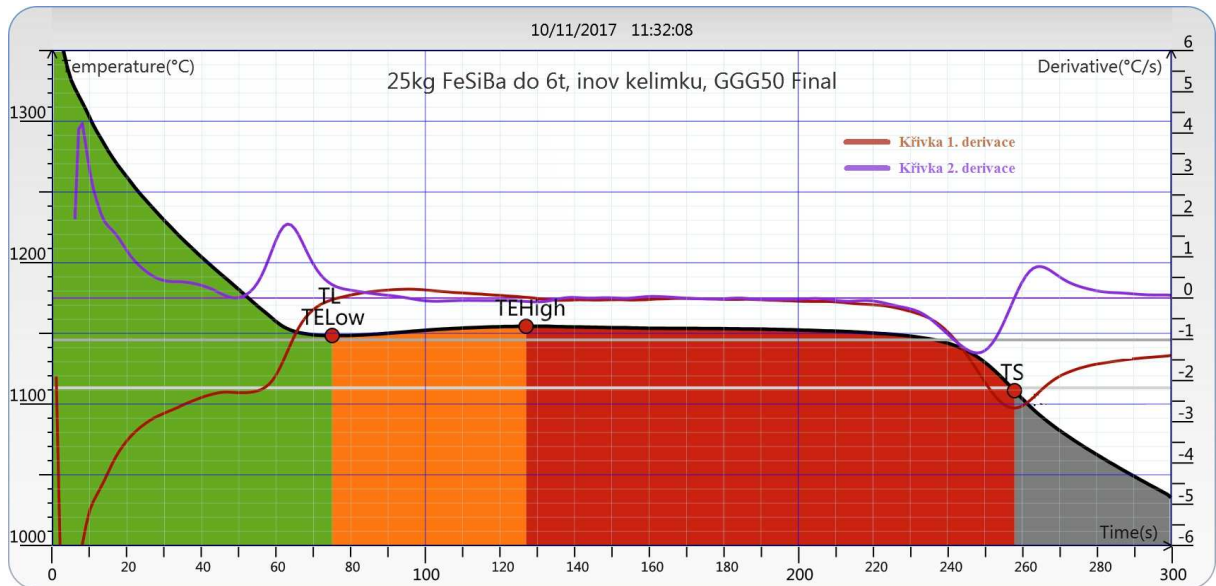
Výsledné parametry uvedené v tabulce (tab. 11) byly získány z termické analýzy pro kelímek s přidaným příslušným množstvím očkovačla, simulujícím druhou fázi očkovaní, v momentě odlévání odlitků varianty 2, které byly použity pro zkoušky mechanických vlastností a pro získání výbrusů pro obrazovou strukturní analýzu. Křivky chladnutí pro uvedené měření jsou zobrazeny na obr. 32 a obr. 33

Zapůjčená termická analýza ATAS ovšem chybně určovala hodnoty teploty liquidu (TL), které byly označovány jako shodné s teplotou TElow, a proto není tento parametr v tabulce (tab. 11) uváděn. Pro průběžné měření vlastností kovu v kelímku bez přidaného očkovačla termická analýza vyhodnocovala TL zdánlivě správněji, na vyšší teplotě než TElow (tab. 12), ale problém se shodnou hodnotou TL a TElow se zde objevuje také.

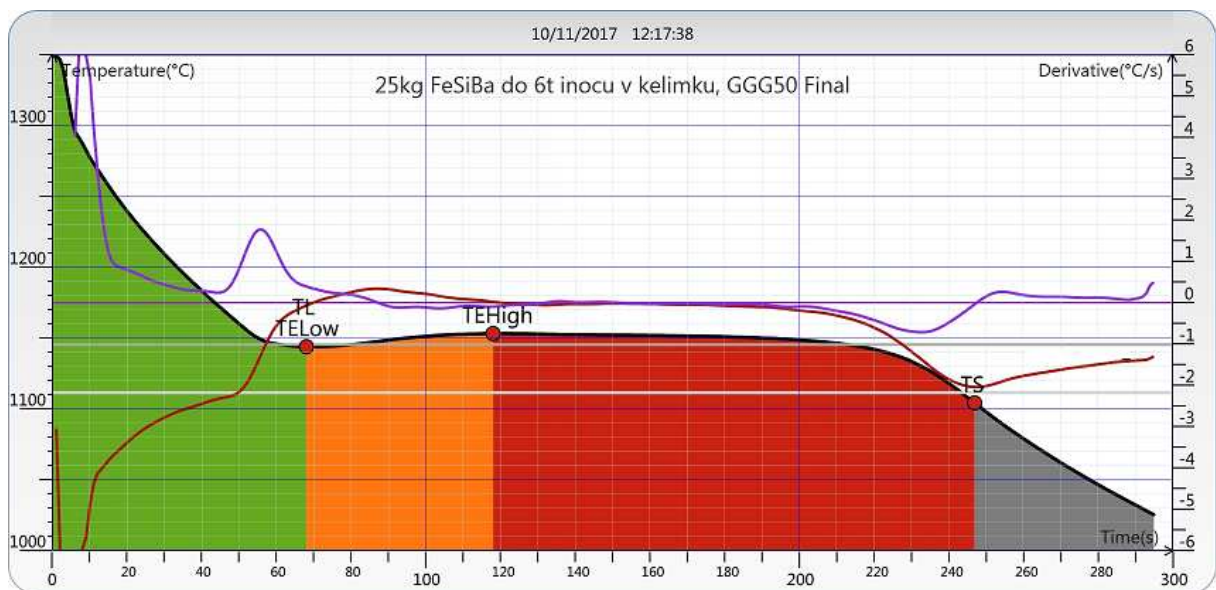
Z důvodu posouzení účinku očkovačla v závislosti na čase, byl vzorek pro termickou analýzu, bez očkovačla, z každé pánve odebírán dvakrát. Nejdříve cca po 2 minutách od přelití kovu a následně cca po 10 minutách (tab. 12).

Tab. 11 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty II/1 a II/2.

Varianta	CEL	TElow	TEhigh	TS	R	GRF1	GRF2	Pánev	Čas "PRE" [min]
II/1	4,23	1148,5	1155,0	1109,5	6,5	83	61	2.	18 min
II/2	4,27	1143,9	1153,2	1104,2	9,3	78	115	5.	77 min
Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu									



Obr. 32 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu II/1.



Obr. 33 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu II/2.

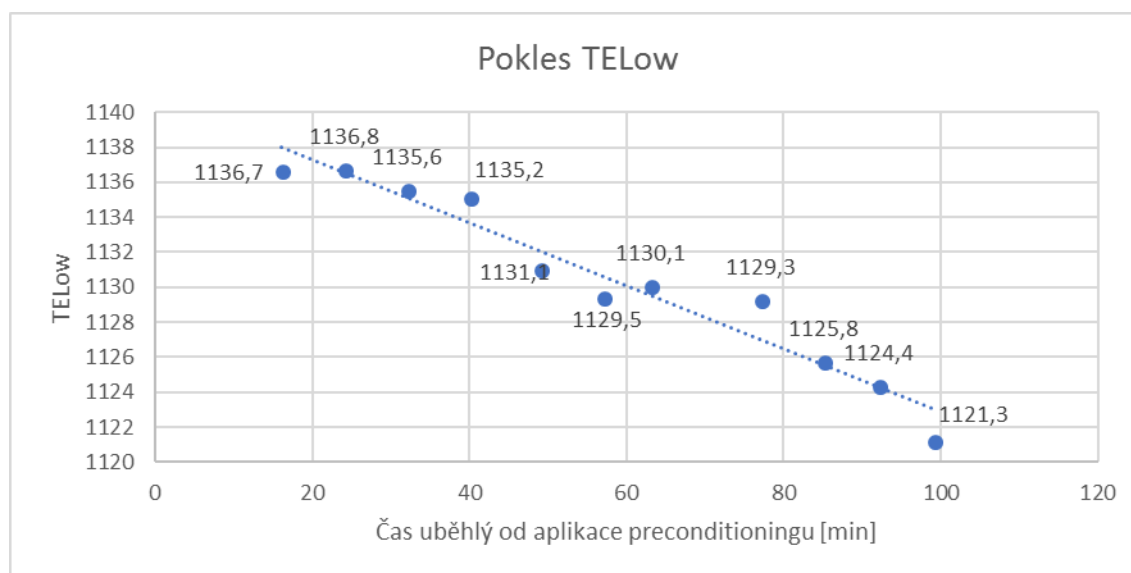
Tab. 12 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovačla, pro variantu 2.

Pánev	Čas "PRE" [min]	Parametry									
		TL	TELow	TEHigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
1.	16	1136,7	1136,7	1142	1081,5	-0,03	-1,75	5,3	65	148	4,33
	24	1136,8	1136,8	1141,2	1082,2	-0,02	-1,72	4,4	57	148	4,33
2.	32	1135,6	1135,6	1141,4	1077,3	-0,03	-1,6	5,8	56	160	4,34
	40	1136,7	1135,2	1144,4	1068,8	-0,11	-1,58	9,2	48	167	4,33
3.	49	1136,3	1131,1	1137,9	1041,9	-0,2	-1,46	6,8	40	180	4,34
	57	1136,6	1129,5	1139	1041,9	-0,29	-1,47	9,5	39	148	4,33
4.	63	1137,2	1130,1	1137,7	1051,2	-0,26	-1,36	7,6	41	180	4,33
5.	77	1135,5	1129,3	1137,2	1044,8	-0,3	-1,42	7,9	41	175	4,34
	85	1136,1	1125,8	1136,1	1062,8	-0,37	-1,89	10,3	39	77	4,34
6.	92	1138,9	1124,4	1134	1080,3	-0,47	-1,63	9,6	45	137	4,31
	99	1139	1121,3	1135,1	1086,2	-0,58	-1,72	13,8	48	115	4,31

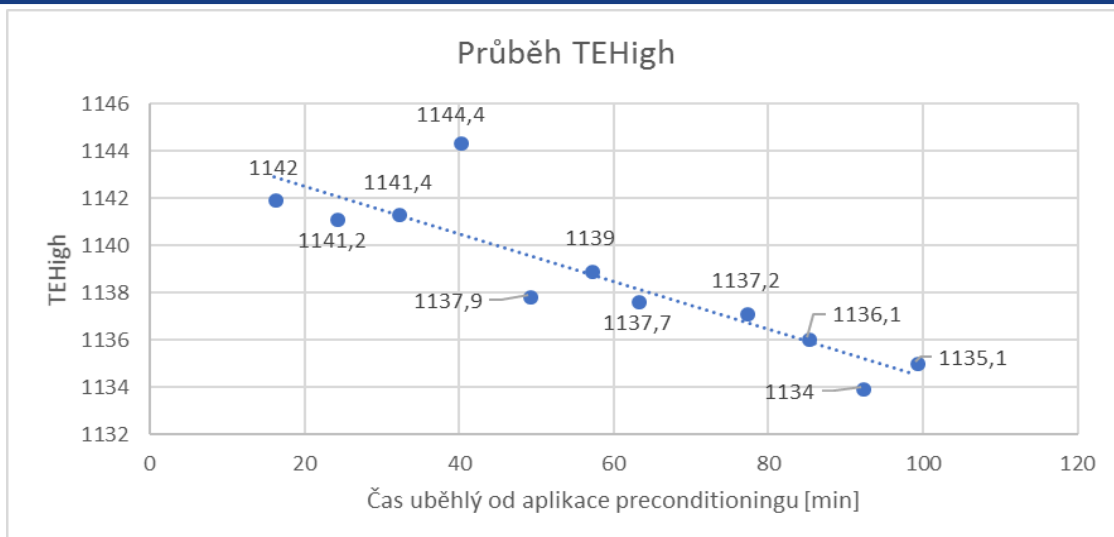
Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu

Pro názornější zobrazení byly výsledky vybraných paramterů uvedeny do grafů v závislosti na čase od aplikace preconditioningu (obr. 34-37).

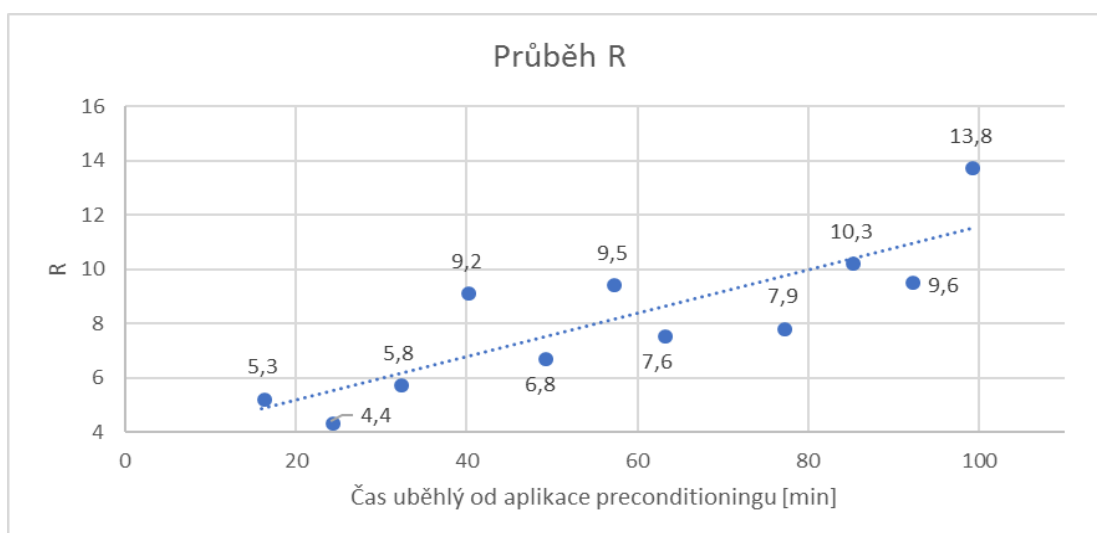
Z tabulky a grafů vyplývá, že docházelo k výraznému odeznívání účinku preconditioningu.



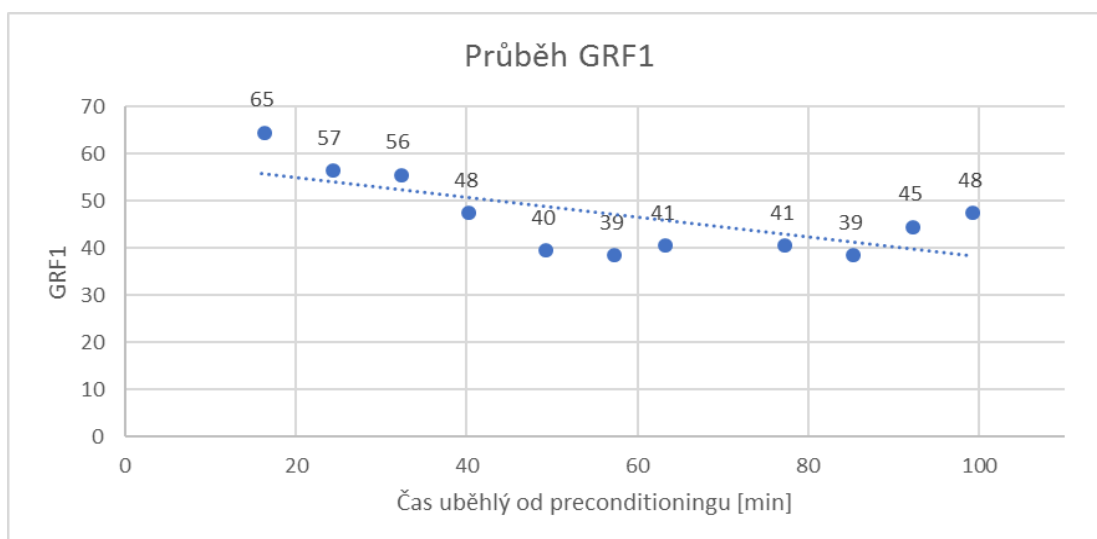
Obr. 34 Průběh TELow v závislosti na čase u varianty 2.



**Obr. 35** Průběh TEHigh v závislosti na čase u varianty 2.



**Obr. 36** Průběh R v závislosti na čase u varianty 2.



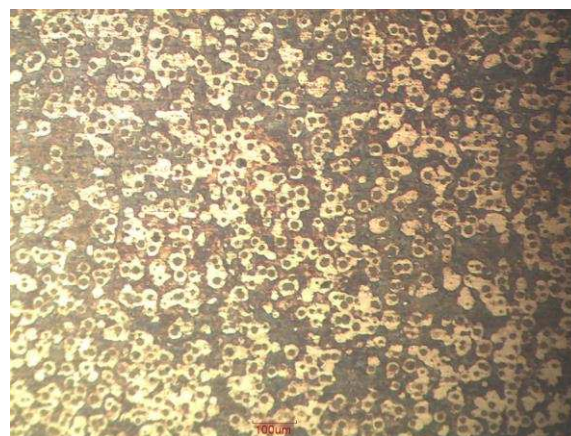
**Obr. 37** Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 2.

## Obrazová analýza

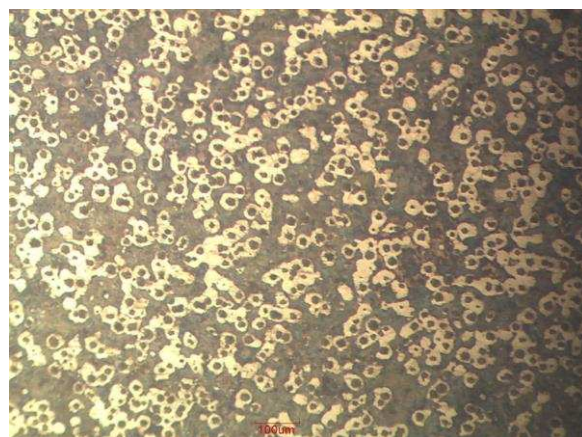
Pro obrazovou analýzu druhé varianty byly využity 2 vzorky z mříž LM12, odlité z jedné tavby. Vzorek číslo 1 (obr. 38) byl odlit po přelití kovu z druhé transportní pánve do liciho zařízení, kdežto vzorek číslo 2 (obr. 39) po přelití pánve páté. Zákalka se u odlitku 2 (obr. 40 a)) nevyskytovala. U odlitku 1 byla zaznamenána do vzdálenosti 0,3 mm od okraje žebra (obr. 40 b)). Výsledky obrazové analýzy jsou uvedeny v tab. 13.

**Tab. 13** Výsledky analýzy struktury pro varianty II/1 a II/2.

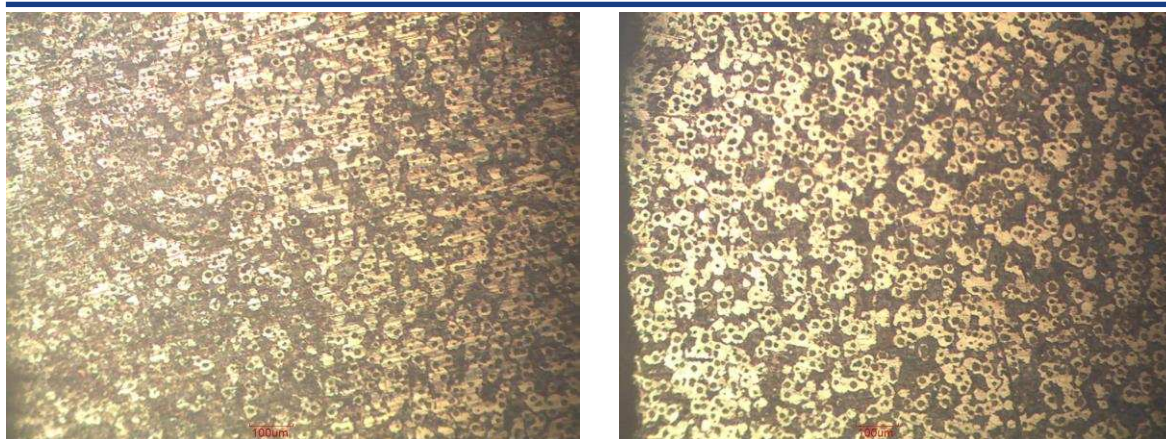
Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
II/1	1216	8,4	64	47,8	8,2	0,3
II/2	1080	8,4	45	42,3	12,7	0



**Obr. 38** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu II/1: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 39** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu II/2: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 40** Struktura na samém konci žebra: a) II/1- zákalka 0,6 mm, b) II/2- bez zákalky.

### Zkoušky mechanických vlastností

Pro posouzení mechanických vlastností byla provedena zkouška plného zatížení a zkouška tahem. Pro zkoušku plného zatížení byly při variantě 2 použity čtyři odlitky mříží LM12. Při zkoušce došlo k chybě na zkoušecím zařízení, a proto byl výsledek zkoušky na jednom odlitku s označením II/1 vyřazen. Výsledky zkoušky plného zatížení byly zapsány do tabulky (tab. 14) jako nosnost.

Další zkouškou pro zjištění mechanických vlastností byla zkouška tahem. Pro zkoušku tahem byla využita odděleně litá tyčka, její pevnost je zapsána také v tabulce (tab. 14) spolu s tažností.

**Tab. 14** Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty II/1 a II/2.

Varianta	Pánev	Nosnost [kN]			Rm [MPa]	A [%]
		měření 1.	měření 2.	AP		
II/1	2.	-	488,8	488,8	590	11,6
II/2	5.	491,0	499,5	495,3	590	11,6

AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost

Z dat v tabulce vyplývá, že se výsledky zkoušky plného zatížení pohybují v rozmezí přibližně 10 kN. Nejlepších výsledků, potvrzených získáním aritmetického průměru, dosahoval při variantě 2 vzorek s označením 2.

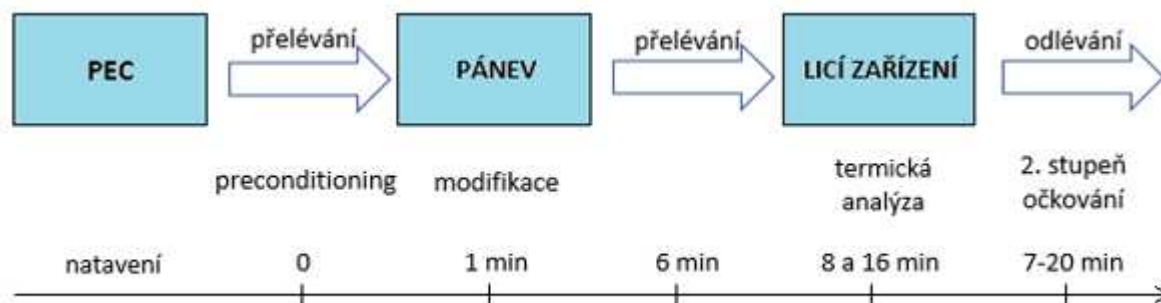
### 7.5.3 Varianta 3 – Preconditioning do pánve bez 1. fáze

#### Metodika aplikace

Další variantou bylo přidávání preconditioningu do transportní pánve. Obsluha tavicího zařízení vhodila 3 kg přípravku, odpovídající dávkování 0,3 % z hmotnosti kovu, na dno transportní pánve. Následně došlo k odpichu a přelití přípravku kovem a současným promícháním v transportní pánvi. Pánev byla odeslána na modifikaci.

První fáze byla vynechána, aby bylo možné posoudit vliv preconditioningu na kov bez zkreslení termické analýzy touto fází očkovaní. Dále byl tímto krokem odstraněn

problém, popsáný u varianty 1 (kap. 7.5.1). Druhá fáze očkování probíhala standartním způsobem s dávkováním 0,15 % z hmotnosti kovu. V tabulkách je uveden čas měření po aplikaci preconditioningu.



**Obr. 41** Schéma postupu přípravy kovu u varianty 3.

### Termická analýza

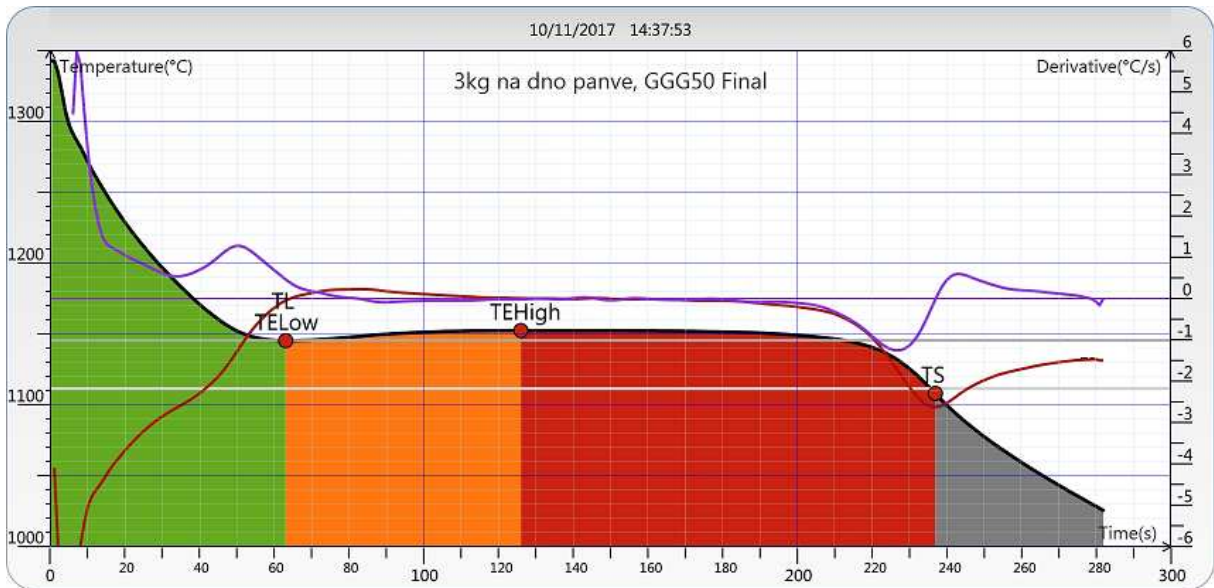
Výsledné parametry uvedené v tabulce (tab. 15) byly získány z termické analýzy pro kelímek s přidaným příslušným množstvím očkovadla, simulujícím druhou fázi očkování, v momentě odlévání odlitků varianty 3, které byly použity pro zkoušky mechanických vlastností a pro získání výbrusů pro obrazovou strukturní analýzu. Křivky chladnutí pro uvedené měření jsou zobrazeny na obr. 42 a obr. 43.

Zapůjčená termická analýza ATAS ovšem chybně určovala hodnoty teploty liquidu (TL), které byly označovány jako shodné s teplotou TE<sub>low</sub>, a proto není tento parametr v tabulce (tab. 15) uváděn. Pro průběžné měření vlastností kovu v kelímku bez přidaného očkovadla termická analýza vyhodnocovala TL zdánlivě správněji, na vyšší teplotě než TE<sub>low</sub> (tab. 16 a 17).

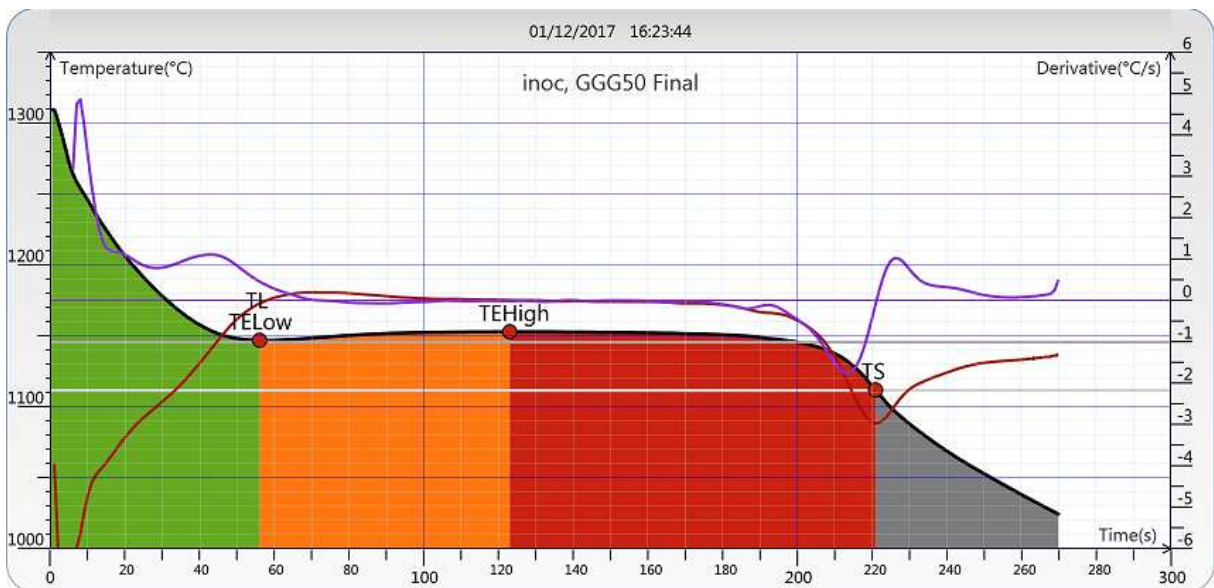
Výsledné parametry kovu pro kelímek bez očkovadla jsou zapsány v tabulce (tab. 16 a 17). Z důvodu posouzení účinku očkovadla v závislosti na čase, byl vzorek pro termickou analýzu z každé pánve odebírán dvakrát. Nejdříve po cca 2 minutách od přelítí kovu a následně po cca 10 minutách.

**Tab. 15** Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty III/1 a III/2.

Varianta	CEL	TE <sub>low</sub>	TE <sub>high</sub>	TS	R	GRF1	GRF2	Pánev číslo	Čas "PRE"
III/1	4,26	1145,2	1152,4	1108,0	7,2	73	69	2	7 min
III/2	4,24	1146,8	1152,8	1111,8	6,0	69	46	4	8 min
Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu									



**Obr. 42** Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu III/1.



**Obr. 43** Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu III/2.

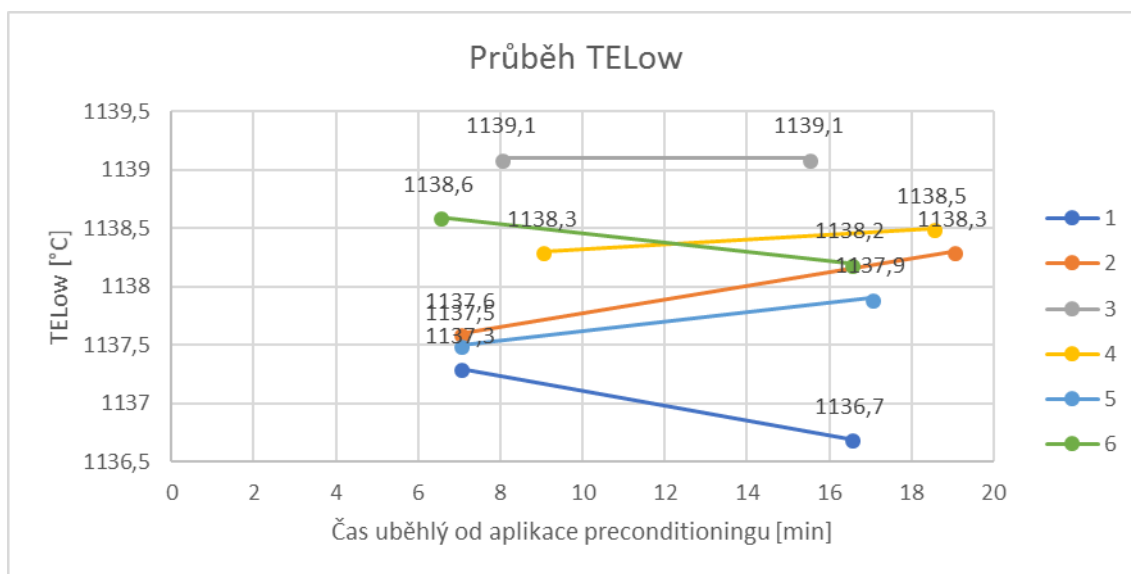
**Tab. 16** Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovačla, pro variantu 3 – první tavba.

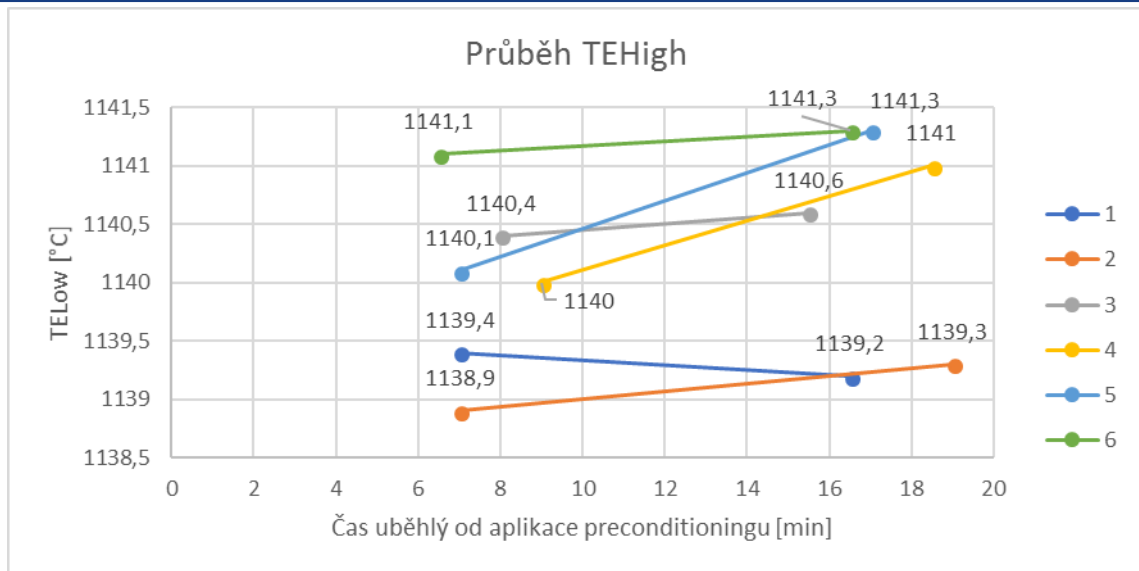
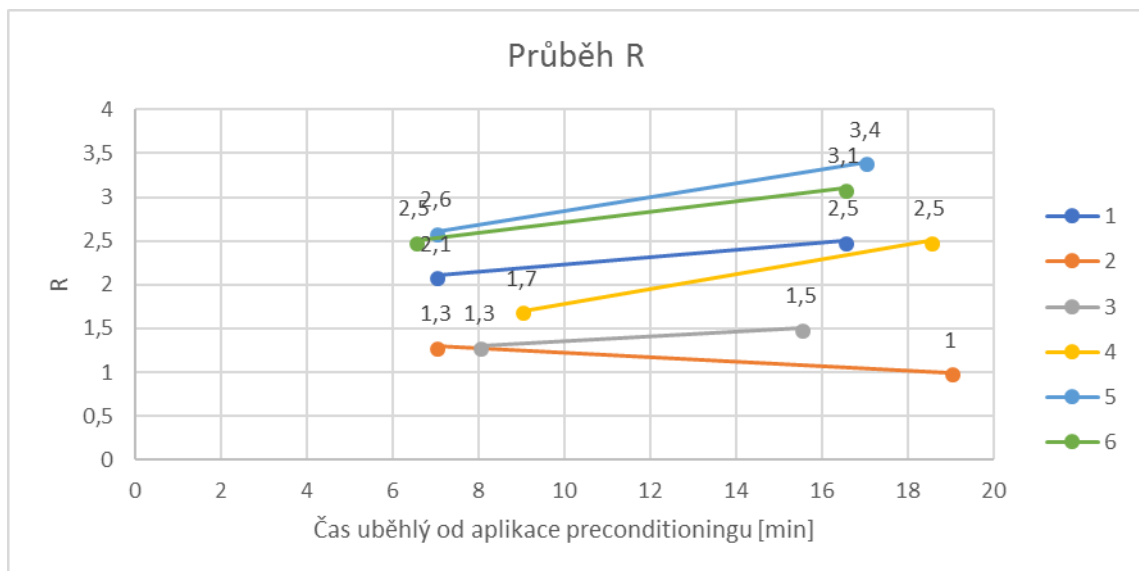
Pánev	Čas "PRE" [min]	TL	TELow	TEHigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
1.	7	1142,3	1137,3	1139,4	1083,9	-0,21	-1,68	2,1	52	153	4,28
	16,5	1143,8	1136,7	1139,2	1082,4	-0,28	-1,8	2,5	71	142	4,27
2.	7	1143,2	1137,6	1138,9	1085,4	-0,23	-1,87	1,3	57	137	4,28
	19	1143,5	1138,3	1139,3	1089,7	-0,25	-2,51	1,0	79	64	4,3
3.	8	1145,3	1139,1	1140,4	1092	-0,23	-2,04	1,3	82	114	4,26
	15,5	1146,5	1139,1	1140,6	1090,4	-0,28	-2,07	1,5	70	117	4,25
4.	9	1146,5	1138,3	1140	1090,3	-0,28	-1,97	1,7	70	124	4,25
	18,5	1148,5	1138,5	1141	1090,4	-0,34	-1,93	2,5	60	126	4,23
5.	7	1150,5	1137,5	1140,1	1088,1	-0,37	-1,84	2,6	58	136	4,21
	17	1151,9	1137,9	1141,3	1089,7	-0,4	-1,91	3,4	63	127	4,2
6.	6,5	1150,1	1138,6	1141,1	1093,1	-0,36	-2,05	2,5	70	114	4,21
	16,5	1151,2	1138,2	1141,3	1092,1	-0,46	-2,02	3,1	68	111	4,2

Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu

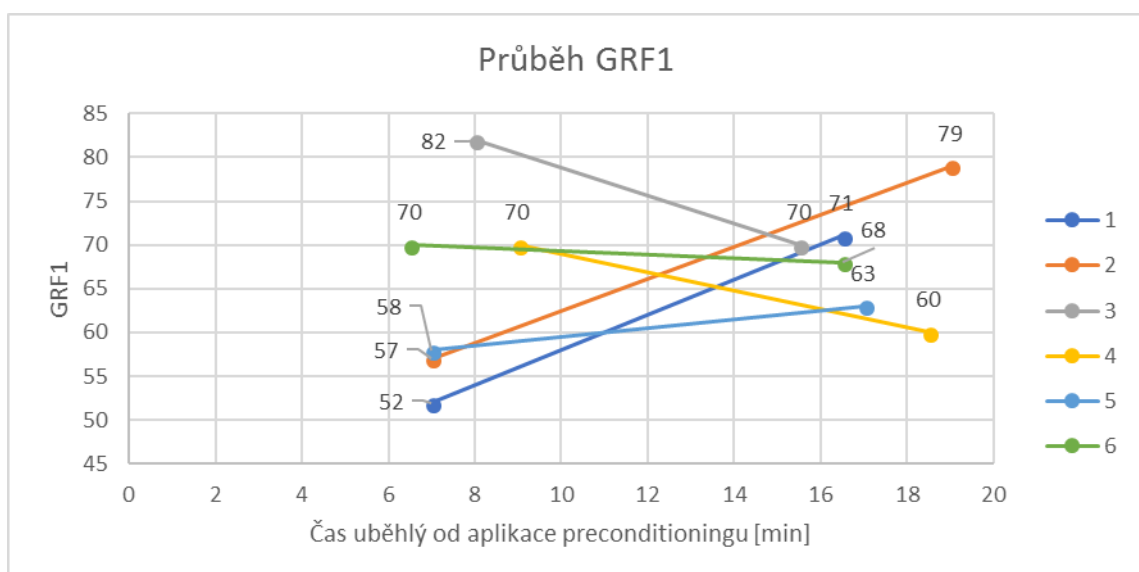
Pro názornější zobrazení byly výsledky vybraných paramterů uvedeny do grafů pro jednotlivé transportní pánve v závislosti na čase od aplikace preconditioningu (obr. 44-47).

Z uvedených grafů a hodnot v tabulce vyplývá, že během krátkého časového úseku mezi měřeními u jednotlivých pánví nedochází k významným změnám ve vlastnostech kovů. Není tedy možné prokázat odeznívání účinku preconditioningu.

**Obr. 44** Průběh TELow v závislosti na čase u varianty 3.

Obr. 45 Průběh TE<sub>High</sub> v závislosti na čase u varianty 3.

Obr. 46 Průběh R v závislosti na čase u varianty 3.



Obr. 47 Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 3.

**Tab. 17** Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovačla, pro variantu 3 – druhá tavba.

Pánev	Čas "PRE" [min]	TL	TELow	TEHigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
2.	8	1141,9	1139,9	1140,3	1088,4	-0,11	-2,07	0,4	87	113	4,29
	14	1142,5	1141,2	1142,6	1090,2	-0,09	-2,15	1,4	77	103	4,28
3.	9	1142,2	1140,3	1141,3	1089,5	-0,1	-2,02	1,0	75	114	4,28
	17	1143,4	1141,2	1144,3	1087,8	-0,14	-2	3,1	63	122	4,27
4.	8	1144,1	1139,6	1140,1	1092,6	-0,17	-2,23	0,5	76	93	4,27
	16	1145,1	1140,2	1140,9	1094,7	-0,23	-2,23	0,7	81	92	4,26

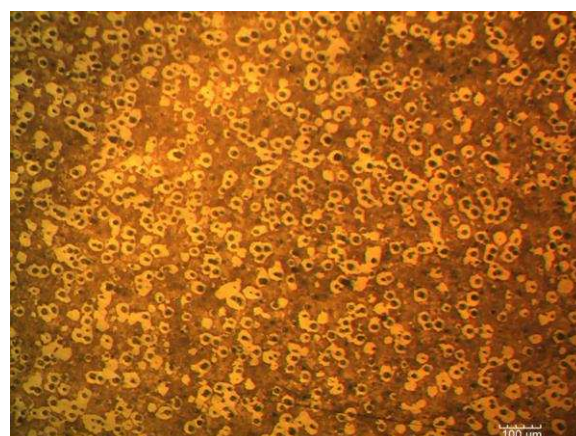
Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu

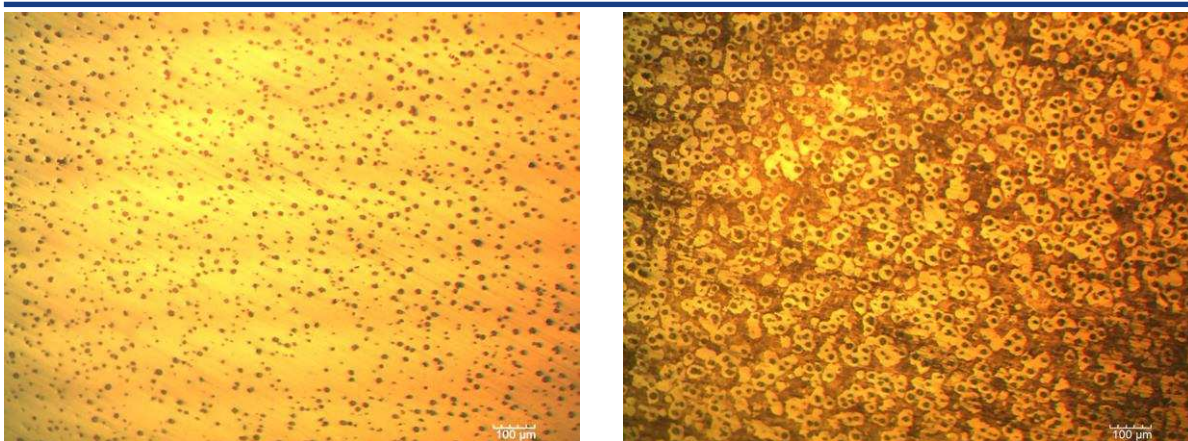
### Obrazová analýza

Pro obrazovou analýzu třetí varianty byly využity 2 vzorky z mříží LM12, odlité z jedné tavby. Vzorek číslo 1 (obr. 48) byl odlit po přelití kovu z druhé transportní pánve do liciho zařízení, kdežto vzorek číslo 2 (obr. 49) po přelití pánve čtvrté. Oba odlitky měly velký problém se zákalkou. U odlitku 1 byla zaznamenána do vzdálenosti 3,5 mm od okraje žebra (obr. 50 a)) a 4 mm od okraje u odlitku 2 (obr. 50 b)). Výsledky obrazové analýzy jsou uvedeny v tab. 18.

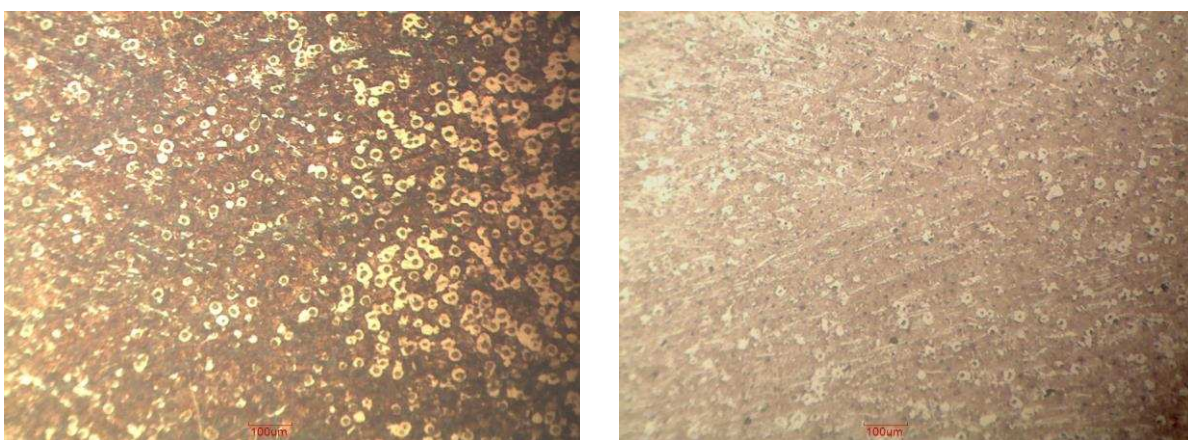
**Tab. 18** Výsledky analýzy struktury pro varianty III/1 a III/2.

Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
III/1	1206	10,6	40	47	13	3,5
III/2	1066	10,2	47	42	11	4

**Obr. 48** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu III/1: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 49** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu III/2: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 50** Struktura na samém konci žebra: a) III/1- zákalka 3,5 mm, b) III/2- zákalka 4,0 mm.

### Zkoušky mechanických vlastností

Pro posouzení mechanických vlastností byla provedena zkouška plného zatížení a zkouška tahem. Pro zkoušku plného zatížení byly při variantě 3 použity čtyři odlitky mříží LM12. Výsledky zkoušky plného zatížení byly zapsány do tabulky (tab. 19) jako nosnost.

Další zkouškou pro zjištění mechanických vlastností byla zkouška tahem. Pro zkoušku tahem byla využita odděleně litá tyčka, její pevnost je také zapsána v tabulce (tab. 19) spolu s tažností.

**Tab. 19** Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty III/1 a III/2.

Varianta	Pánev	Nosnost [kN]			Rm [MPa]	A [%]
		měření 1.	měření 2.	AP		
III/1	2.	490,1	502,3	496,2	552	10,9
III/2	4.	478,0	490,7	484,4	550	14,4

AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost

Z dat v tabulce vyplývá, že se výsledky zkoušky plného zatížení pohybují v rozmezí přibližně 25 kN. Nejlepších pevnostních výsledků, potvrzených získáním aritmetického

průměru, dosahoval při variantě 3 vzorek s označením 1. Vzorek číslo 2 ovšem vykazoval vyšší tažnost.

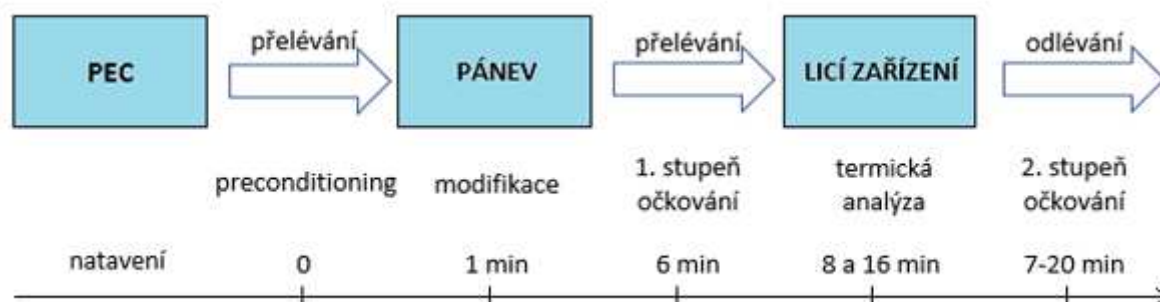
#### 7.5.4 Varianta 4 – Preconditioning do pánve s 1. fází (1,5 kg)

##### Metodika aplikace

Další varianta, s označením 4, měla za úkol dosáhnout co nejlepších mechanických vlastností díky využití preconditioningu a obou fází očkování používaných standartně.

Z průběžného sledování výsledků na křivkách termické analýzy se zdála být varianta 3 lepší než varianta 2, a proto se jako způsob dávkování preconditioningu pro tuto variantu zvolilo dávkování přípravku do transportní pánve. Dávkování přípravku pro preconditioning bylo obdobné jako ve variantě 3, tedy 0,3 % z hmotnosti kovu. Pánev byla odeslána dál po trati a do jedné minuty došlo k modifikaci.

Po modifikaci ovšem došlo k první fázi očkování očkovačem SNAM HIBACAL s o 1 kg sníženým dávkováním oproti standartnímu stavu, tedy dávkováním 0,15 % z hmotnosti kovu, odpovídajícím 1,5 kg očkovačla na tunovou transportní pánev. Druhá fáze očkování probíhala opět standartně foukáním očkovačla SNAM HIAL s dávkováním 0,15 % z hmotnosti odlitého kovu do formy.



Obr. 51 Schéma postupu přípravy kovu u varianty 4.

##### Termická analýza

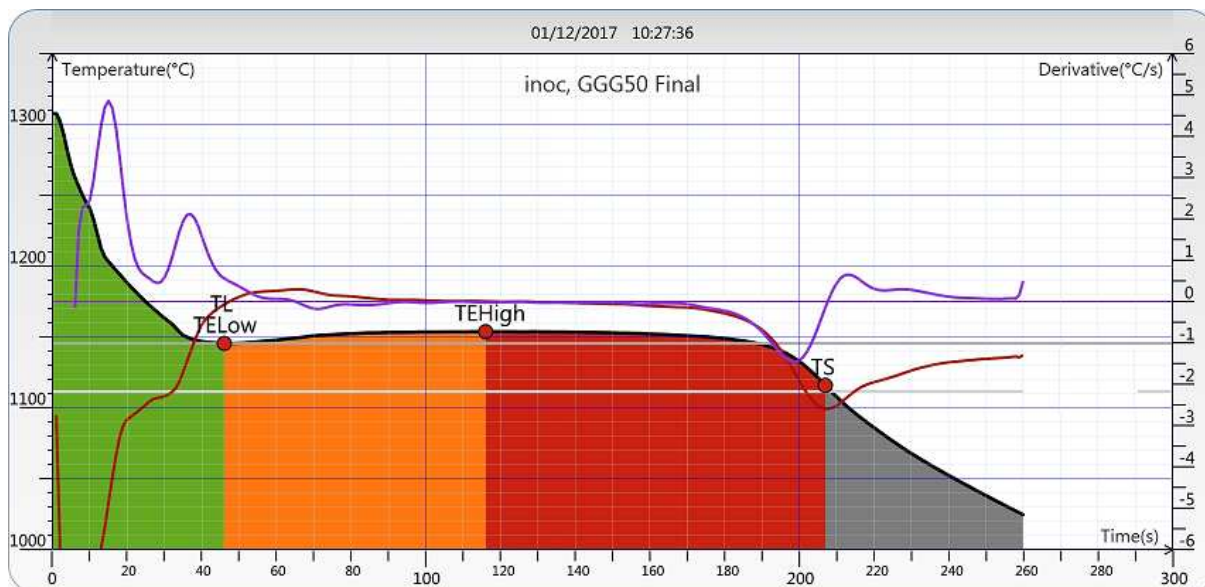
Výsledné parametry uvedené v tabulce (tab. 20) byly získány z termické analýzy pro kelímek s přidaným příslušným množstvím očkovačla, simulujícím druhou fázi očkování, v momentě odlévání odlitků varianty 4, které byly použity pro zkoušky mechanických vlastností a pro získání výbrusů pro obrazovou strukturní analýzu. Křivka chladnutí pro uvedené měření je zobrazena na obr. 52.

Zapůjčená termická analýza ATAS ovšem chybně určovala hodnoty teploty liquidu (TL), které byly označovány jako shodné s teplotou TElow, a proto není tento parametr v tabulce (tab. 20) uváděn. Pro průběžné měření vlastností kovu v kelímku bez přidaného očkovačla termická analýza vyhodnocovala TL zdánlivě správněji, na vyšší teplotě než TElow (tab. 21). Výsledné parametry kovu pro kelímek bez očkovačla jsou zapsány v tabulce (tab. 21). Z důvodu posouzení účinku očkovačla v závislosti na čase, byl vzorek pro termickou analýzu z každé pánve odebírán dvakrát. Nejdříve po cca 2 minutách a následně po cca 10 minutách.

**Tab. 20** Parametry termické analýzy vyhodnocené pro variantu IV/1.

Varianta	CEL	TElow	TEhigh	TS	R	GRF1	GRF2	Pánev	Čas "O"	Čas "PRE"
IV/1	4,26	1145,4	1153,7	1115,8	8,3	65	62	5.	7 min	9,5 min

Čas "O" – čas uběhlý od očkování; Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu

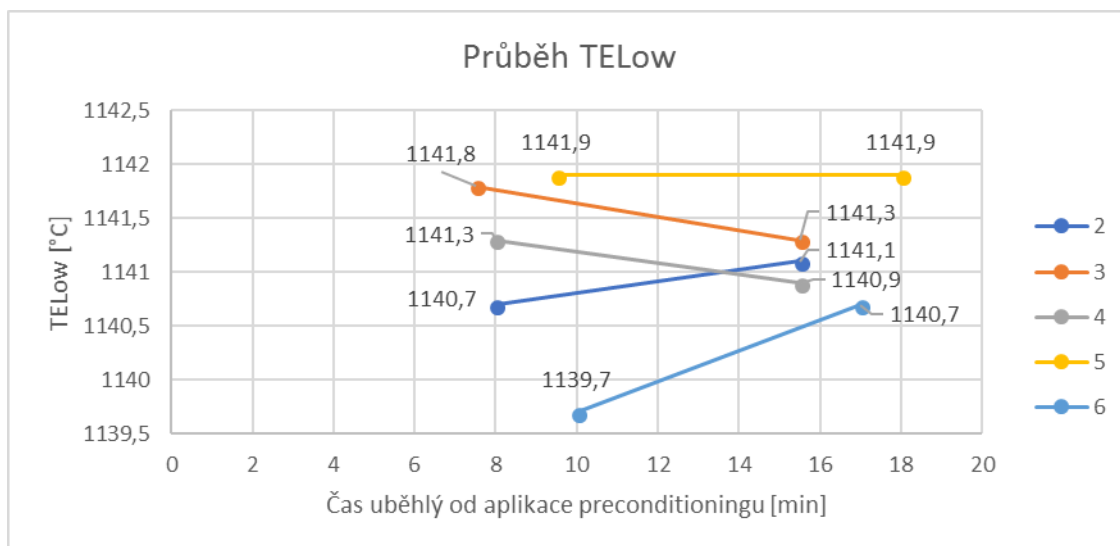
**Obr. 52** Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu IV/1.**Tab. 21** Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovadla, pro variantu 4.

Pánev	"PRE" [min]	"O" [min]	TL	TElow	TEhigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
2.	8	5	1143,2	1140,7	1141,1	1094,6	-0,12	-2,13	0,4	91	102	4,28
	15,5	12,5	1142,9	1141,1	1141,6	1092,7	-0,11	-2,05	0,5	90	113	4,28
3.	7,5	5	1143,2	1141,8	1142,3	1093,9	-0,08	-2	0,5	82	117	4,28
	15,5	13	1144,3	1141,3	1141,7	1093,5	-0,16	-2,09	0,4	86	108	4,27
4.	8	5,5	1145,2	1141,3	1142,2	1092,7	-0,17	-2,55	0,9	75	62	4,26
	15,5	13	1146,2	1140,9	1141,9	1094,9	-0,22	-2,13	1,0	68	104	4,25
5.	9,5	7	1142,6	1141,9	1142,0	1095,6	-0,07	-1,96	0,1	99	120	4,28
	18	15,5	1143,0	1141,9	1142,0	1093,7	-0,07	-2,18	0,1	101	101	4,28
6.	10	5,5	1139,7	1139,7	1143,4	1095,6	-0,06	-2,19	3,7	83	96	4,31
	17	12,5	1140,7	1140,7	1143,4	1097,9	-0,04	-2,28	2,7	85	88	4,30
7.	10	5,5	1137,2	1137,2	1145,7	1094,9	-0,09	-2,04	8,5	82	119	4,33

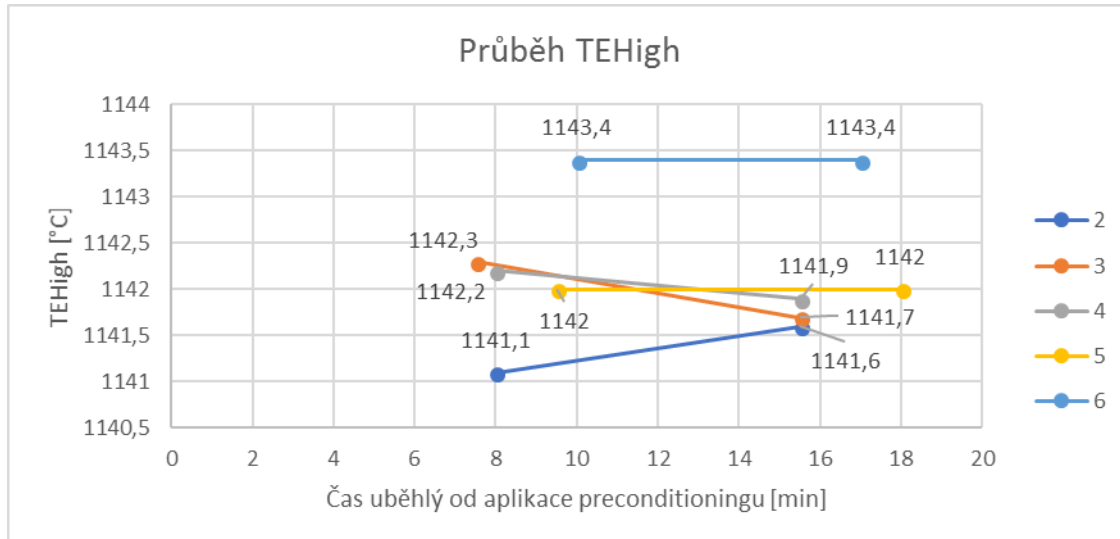
"PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu; "O" – čas uběhlý od očkování

Pro názornější zobrazení byly výsledky vybraných paramterů uvedeny do grafů pro jednotlivé transportní pánve v závislosti na čase od aplikace preconditioningu (obr. 53-56).

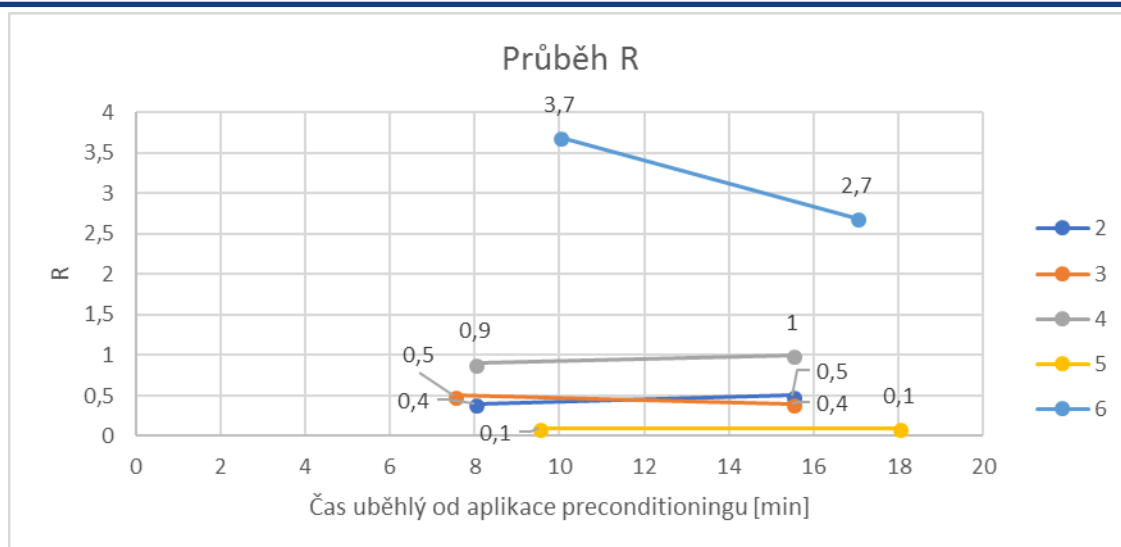
Z uvedených grafů a hodnot v tabulce vyplývá, že během krátkého časového úseku mezi měřeními u jednotlivých pánví nedochází k významným změnám ve vlastnostech kovu. Není tedy možné prokázat odeznívání účinku očkovadla a preconditioningu.



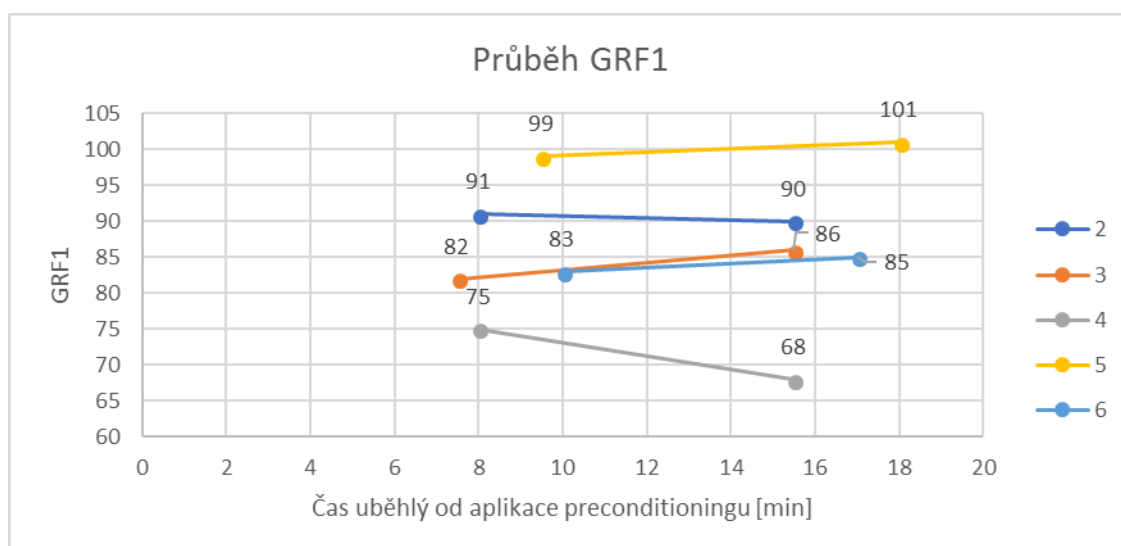
**Obr. 53** Průběh TELow v závislosti na čase u varianty 4.



**Obr. 54** Průběh TEHigh v závislosti na čase u varianty 4.



Obr. 55 Průběh R v závislosti na čase u varianty 4.



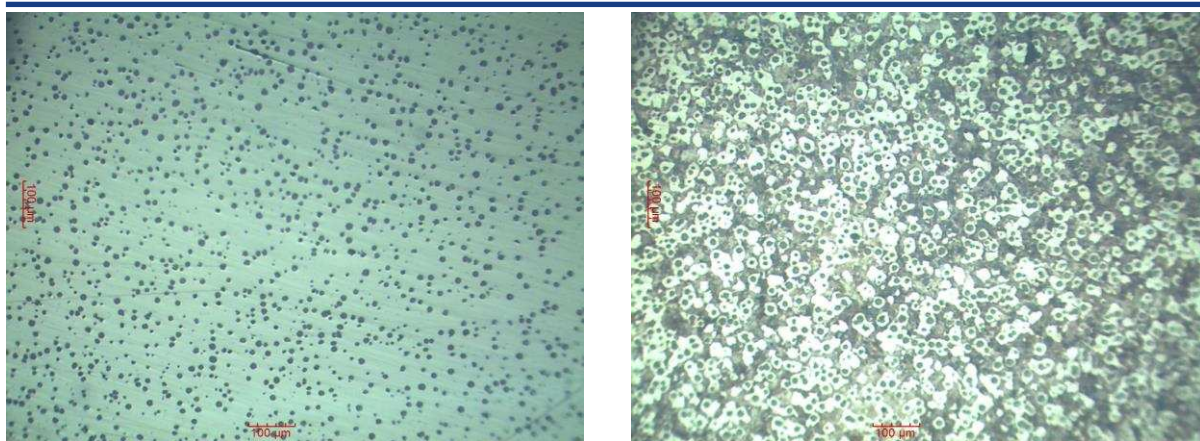
Obr. 56 Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 4.

### Obrazová analýza

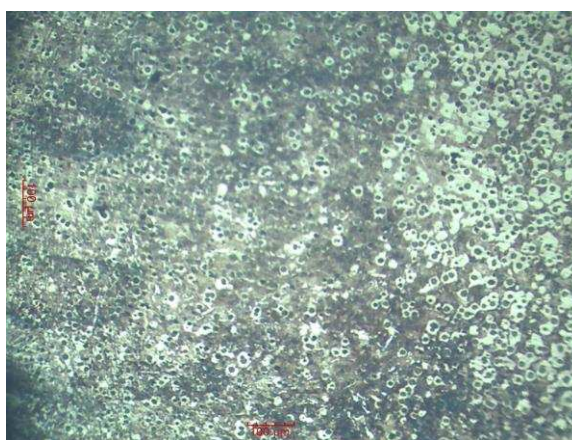
Pro obrazovou analýzu čtvrté varianty byl využit pouze 1 vzorek z mříže LM12. Obrazová analýza vzorku (obr. 57) odlitého po přelití páte transportní pánve v pořadí byla vyhodnocena a výsledky byly zapsány do tabulky (tab. 22). Na žeburu se vyskytovala zákalka do vzdálenosti 1,0 mm od okraje (obr. 58).

Tab. 22 Výsledky analýzy struktury pro variantu IV/1.

Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
IV/1	1446	10,6	38	50	12	1,0



**Obr. 57** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu IV/1: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 58** Struktura na samém konci žebra: IV/1- zákalka 1,0 mm.

### Zkoušky mechanických vlastností

Pro posouzení mechanických vlastností byla provedena zkouška plného zatížení a zkouška tahem. Pro zkoušku plného zatížení byly při variantě 4 použity čtyři odlitky mříží LM12. Výsledky zkoušky plného zatížení byly zapsány do tabulky (tab. 23) jako nosnost.

Další zkouškou pro zjištění mechanických vlastností byla zkouška tahem. Pro zkoušku tahem byla využita odděleně litá tyčka, její pevnost je zapsána v tabulce (tab. 24) spolu s tažností a průměrnou hodnotou nosnosti.

**Tab. 23** Výsledky zkoušky plným zatížením pro variantu IV/1.

Varianta	Nosnost [kN]				
	měření 1.	měření 2.	měření 3.	měření 4.	AP
IV/1	489,5	520,4	515,8	506,7	508,1
AP – aritmetický průměr					

**Tab. 24** Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro variant IV/1.

Varianta	Pánev	Nosnost AP [kN]	Rm [MPa]	A [%]
IV/1	5.	508,1	581	11,1
AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost				

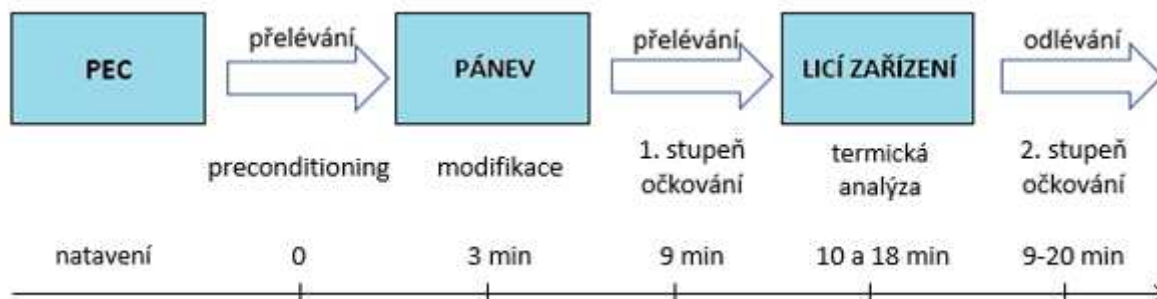
Z dat v tabulce vyplývá, že se výsledky zkoušky plného zatížení pohybují v širokém rozmezí 30 kN. Tři ze čtyř výsledků dosahovaly vysokých pevností nad 500 kN. Průměrná pevnost při zkoušce plným zatížením byla pro tuto variantu 508,1 kN.

### 7.5.5 Varianta 5 – Preconditioning do pánve s 1. fází (1,5 kg) + 2 min

#### Metodika aplikace

Úkolem varianty 5 bylo ověřit, zda je účinek preconditioningu ve variantě 4 závislý na čase rozpouštění před modifikací.

Aplikace přípravku na preconditioning a oba stupně očkování probíhaly totožně jako ve variantě 4. Rozdílem byl čas pro rozpouštění přípravku SNAM X BACAL před modifikací. Pánev byla pro tento účel zpomalena a k modifikaci nedocházelo 1 minutu po aplikaci přípravku, nýbrž 2 minuty. Delší čas stání kovu v pánvi před modifikací nebylo možné, z důvodu taktu linky, otestovat.

**Obr. 59** Schéma postupu přípravy kovu u varianty 5.

#### Termická analýza

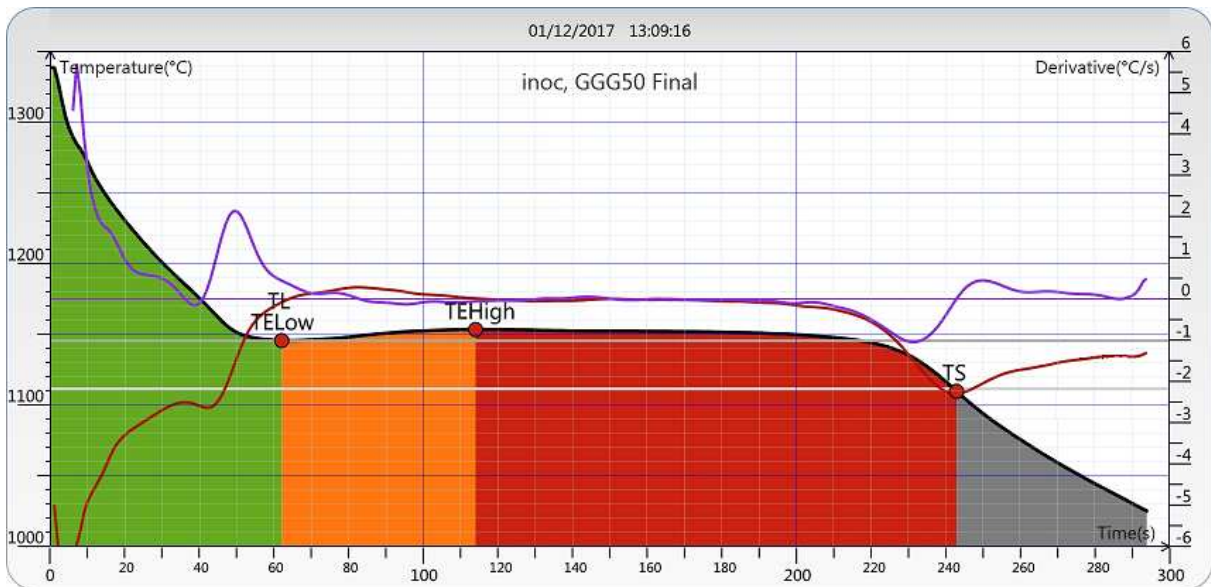
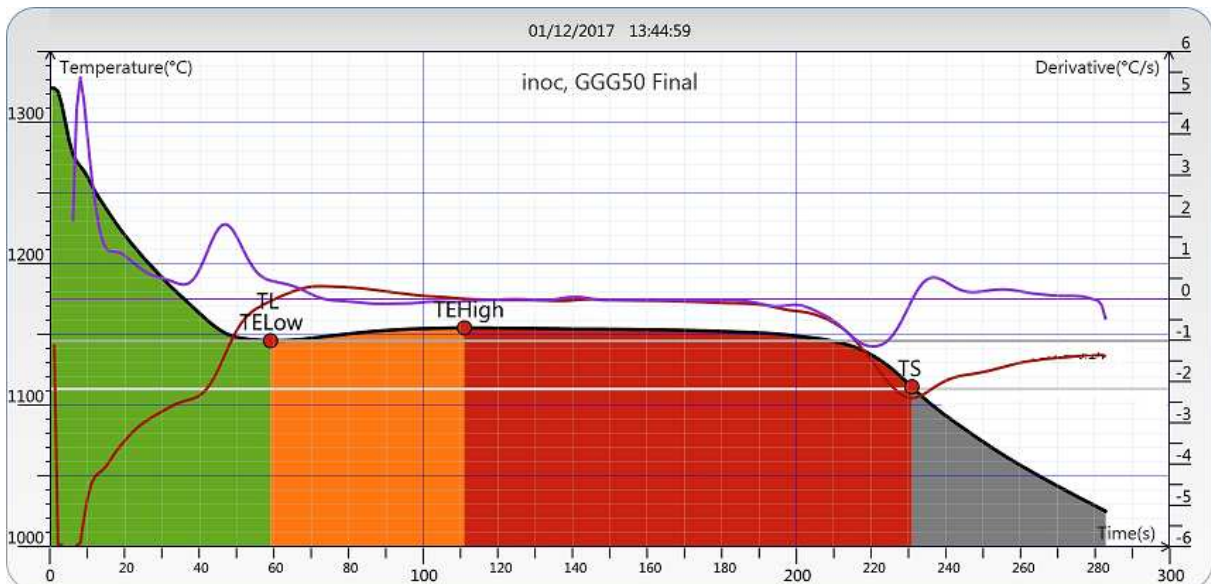
Výsledné parametry uvedené v tabulce (tab. 25) byly získány z termické analýzy pro kelímek s přidáním příslušným množstvím očkovadla, simulujícím druhou fází očkování, v momentě odlévání odlitků varianty 5, které byly použity pro zkoušky mechanických vlastností a pro získání výbrusů pro obrazovou strukturní analýzu. Křivky chladnutí pro uvedené měření jsou zobrazeny na obr. 60 a obr. 61.

Zapůjčená termická analýza ATAS ovšem chybně určovala hodnoty teploty liquidu (TL), které byly označovány jako shodné s teplotou T<sub>elow</sub>, a proto není tento parametr v tabulce (tab. 25) uváděn. Stejný problém nastal i pro průběžné měření bez přidání očkovadla (tab. 26). Výsledné parametry kovu pro kelímek bez očkovadla jsou zapsány v tabulce (tab. 26). Z důvodu posouzení účinku očkovadla v závislosti na čase, byl vzorek pro termickou analýzu z každé pánve odebírán dvakrát. Nejdříve po cca 2 minutách od přelití kovu do licího zařízení a následně po cca 10 minutách.

**Tab. 25** Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty V/1 a V/2.

Varianta	CEL	TElow	TEhigh	TS	R	GRF1	GRF2	Pánev	Čas "O"	Čas "PRE"
V/1	4,26	1145,5	1153,3	1109,6	7,8	82	84	2.	6,5 min	9,5 min
V/2	4,26	1145,5	1154,6	1112,9	9,1	81	75	6.	5,5 min	8,5 min

Čas "PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu; Čas "O" – čas uběhlý od očkování

**Obr. 60** Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu V/1.**Obr. 61** Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu V/2.

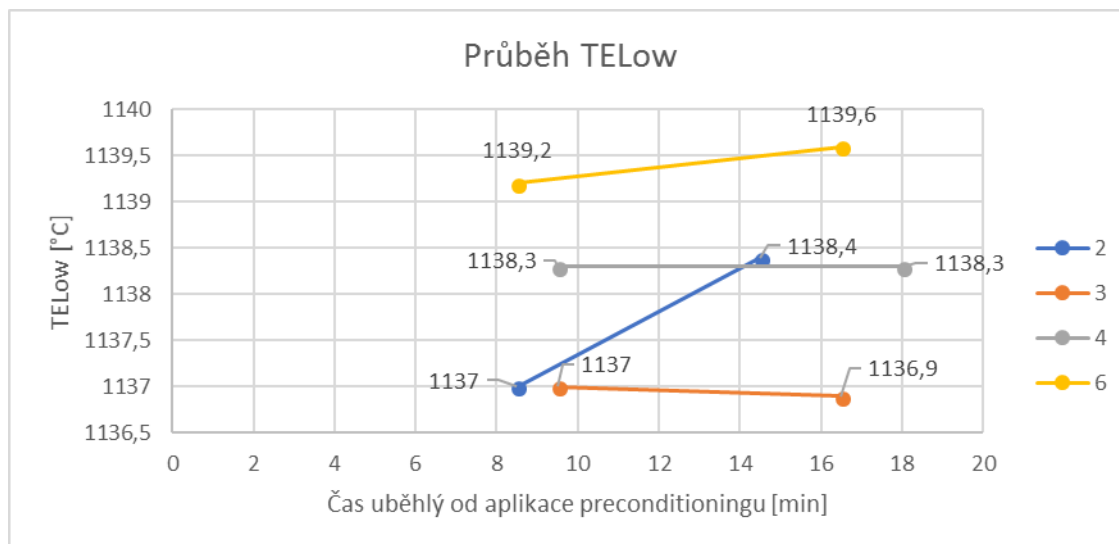
**Tab. 26** Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovačla, pro variantu 5.

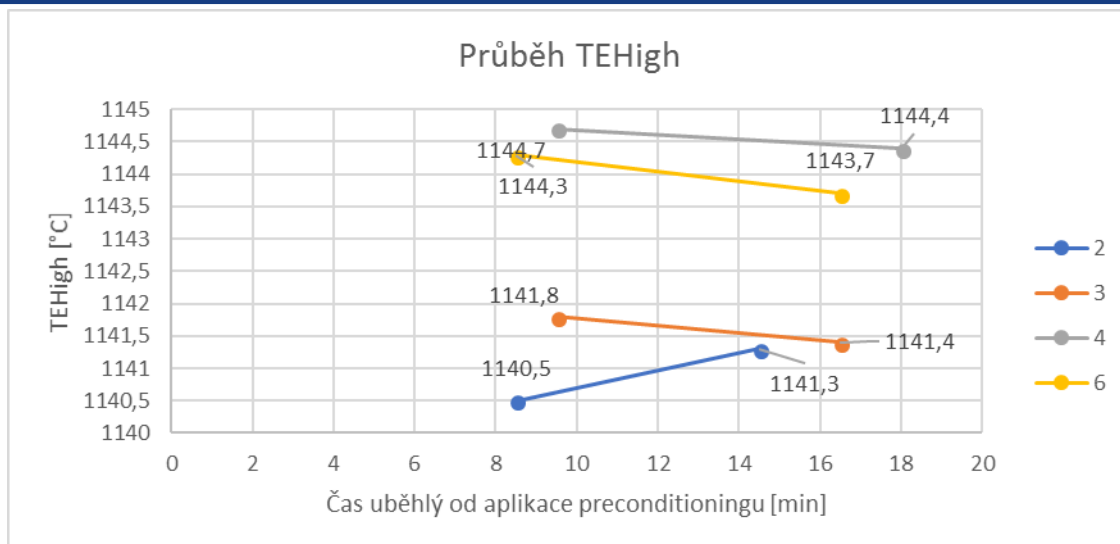
Pánev	"PRE" [min]	"O" [min]	TL	TELow	TEHigh	TS	dT/dt TES	dT/dt TS	R	GRF1	GRF2	ACEL
2.	8,5	6,5	1137,0	1137,0	1140,5	1088	-0,03	-1,92	3,5	77	125	4,33
	14,5	12,5	1138,4	1138,4	1141,3	1089	-0,03	-1,87	2,9	70	129	4,32
3.	9,5	6,5	1137,0	1137,0	1141,8	1091	-0,04	-1,99	4,8	76	119	4,33
	16,5	13,5	1136,9	1136,9	1141,4	1089,5	-0,04	-2	4,5	77	118	4,33
4.	9,5	7,5	1138,3	1138,3	1144,7	1104	-0,07	-2,31	6,4	83	71	4,32
	18	16	1138,3	1138,3	1144,4	1095	-0,07	-2,05	6,1	77	113	4,32
6.	8,5	5,5	1139,2	1139,2	1144,3	1092,5	-0,06	-1,97	5,1	74	122	4,31
	16,5	13,5	1139,6	1139,6	1143,7	1095,3	-0,03	-2,12	4,1	78	106	4,31

"PRE" – čas uběhlý od aplikace preconditioningu; "O" – čas uběhlý od očkování

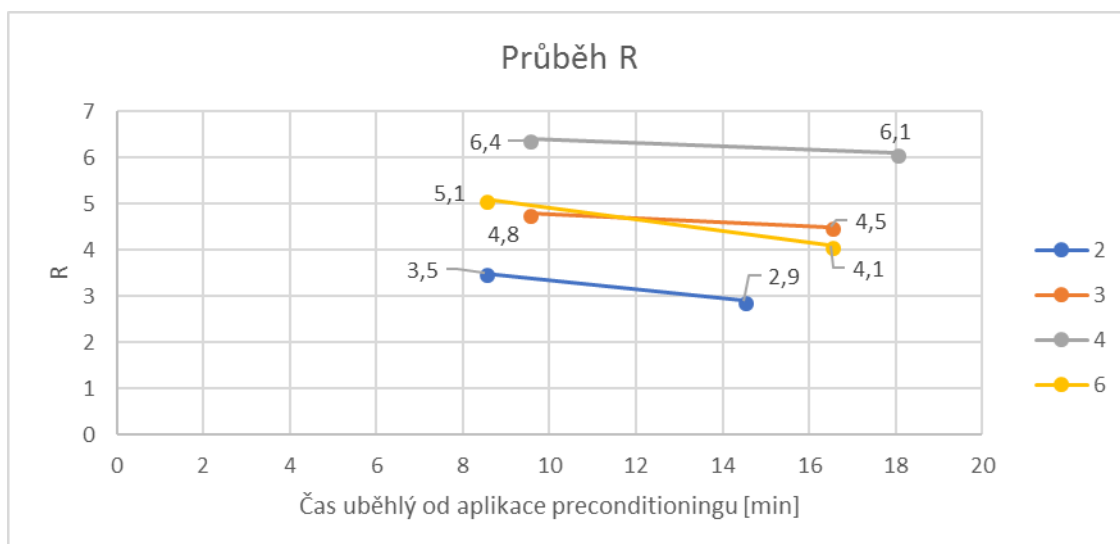
Pro názornější zobrazení byly výsledky vybraných paramterů uvedeny do grafů pro jednotlivé transportní pánve v závislosti na čase od aplikace preconditioningu (obr. 62-65).

Z uvedených grafů a hodnot v tabulce vyplývá, že během krátkého časového úseku mezi měřeními u jednotlivých pánví nedochází k významným změnám ve vlastnostech kovu. Není tedy možné prokázat odeznívání účinku očkovačla a preconditioningu.

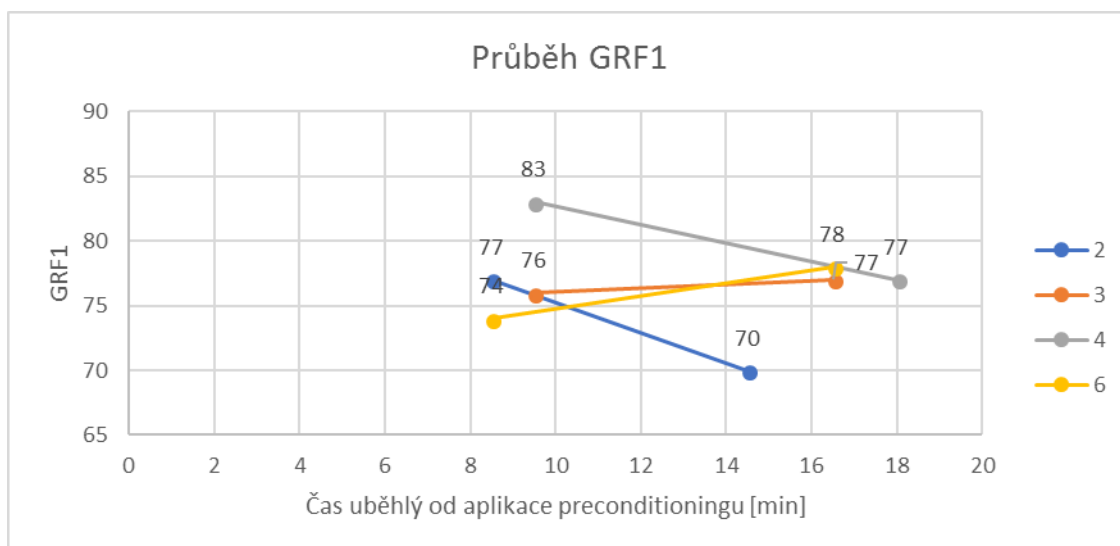
**Obr. 62** Průběh TELow v závislosti na čase u varianty 5.



**Obr. 63** Průběh TEhigh v závislosti na čase u varianty 5.



**Obr. 64** Průběh R v závislosti na čase u varianty 5.



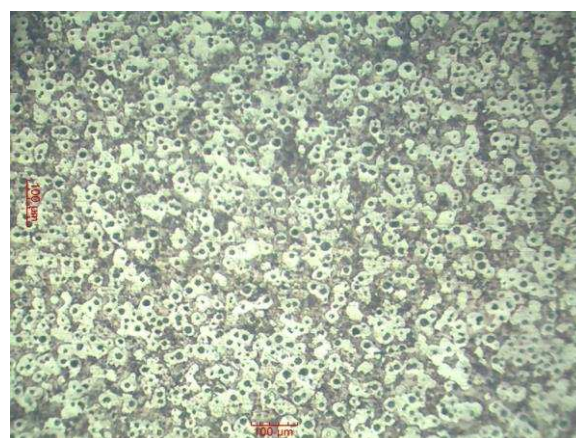
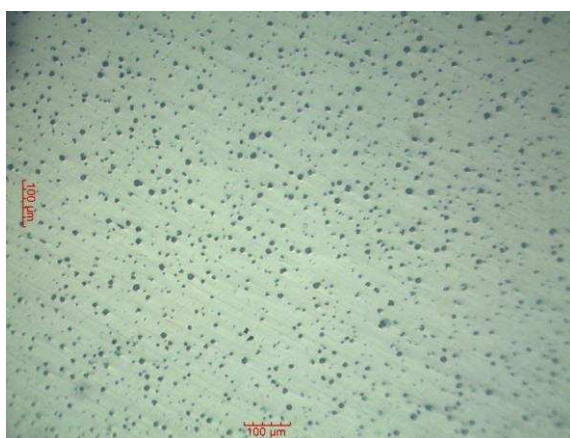
**Obr. 65** Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 5.

## Obrazová analýza

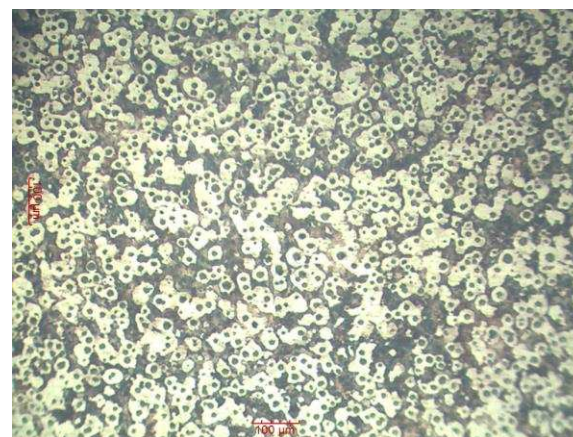
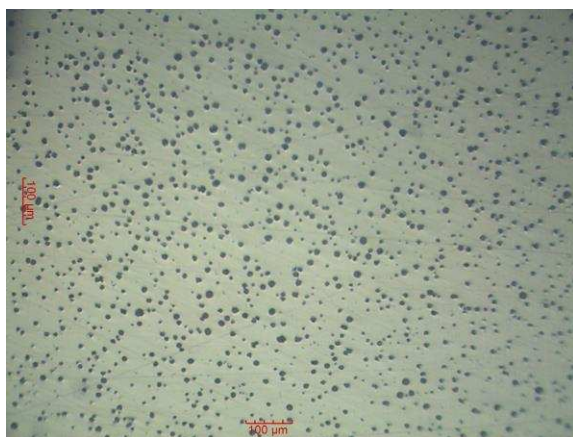
Pro obrazovou analýzu páté varianty byly využity 2 vzorky z mříží LM12, odlité z jedné tavby. Vzorek číslo 1 (obr. 66) byl odlit po přelití kovu z druhé transportní pánve do lícího zařízení, kdežto vzorek číslo 2 (obr. 67) po přelití pánve šesté. U obou odlitků se na žebro nevyškotala zákalka (obr. 68 a, b)). Výsledky obrazové analýzy jsou uvedeny v tab. 27.

**Tab. 27** Výsledky analýzy struktury pro varianty V/1 a V/2.

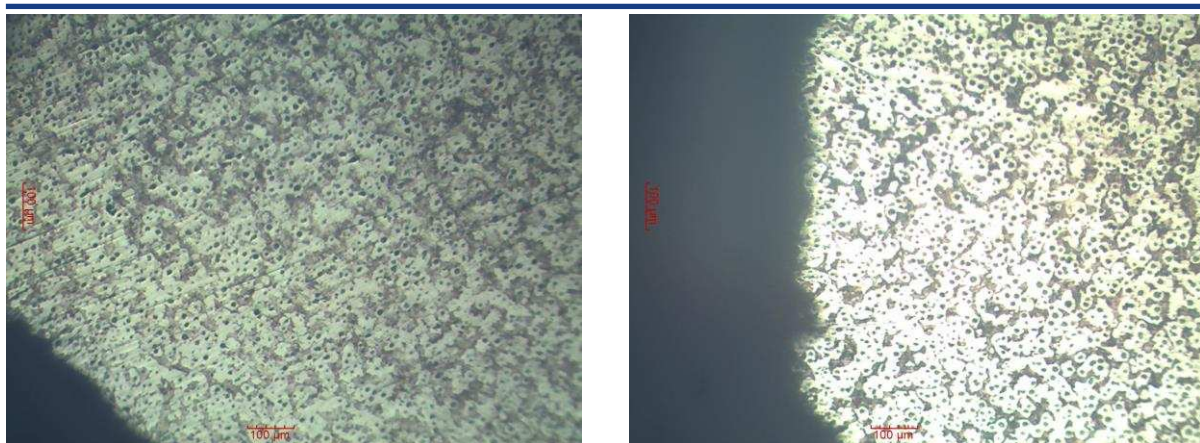
Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
V/1	1389	7,6	57	35,2	7,8	0
V/2	1346	9,2	46	46,4	7,6	0



**Obr. 66** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu V/1: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 67** Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu V/2: a) neleptaný stav, b) leptaný stav.



**Obr. 68** Struktura na samém konci žebra: a) V/1- bez zákalky, b) V/2- bez zákalky.

### Zkoušky mechanických vlastností

Pro posouzení mechanických vlastností byla provedena zkouška plného zatížení a zkouška tahem. Pro zkoušku plného zatížení bylo při variantě 5 použito osm odlitků mříží LM12. Výsledky zkoušky plného zatížení byly zapsány do tabulky (tab. 28) jako nosnost.

Další zkouškou pro zjištění mechanických vlastností byla zkouška tahem. Pro zkoušku tahem byla využita odděleně litá tyčka, její pevnost je zapsána v tabulce (tab. 29) spolu s tažností a průměrnou hodnotou nosnosti.

**Tab. 28** Výsledky zkoušky plným zatížením pro varianty V/1 a V/2.

Varianta	Nosnost [kN]				AP
	měření 1.	měření 2.	měření 3.	měření 4.	
V/1	505,8	504,5	518,0	497,3	506,4
V/2	510,2	502,3	514,0	511,1	509,4
AP – aritmetický průměr					

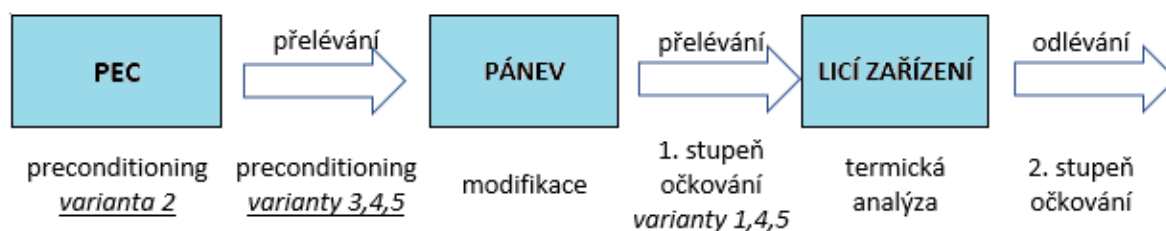
**Tab. 29** Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty V/1 a V/2.

Varianta	Pánev	Nosnost AP [kN]	Rm [MPa]	A [%]
V/1	2.	506,4	579	12,3
V/2	6.	509,4	579	12,3
AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost				

Z dat v tabulce vyplývá, že se výsledky zkoušky plného zatížení pohybují v úzkém rozmezí 20 kN. S výjimkou jediné zkoušky dosahovaly odlitky pevnosti vyšší než 500 kN.

## 7.6 Vyhodnocení a porovnání jednotlivých variant

Pro lepší orientaci v jednotlivých variantách bylo, na základě předchozí kapitoly (kap. 7.5), vypracováno schéma znázorňující postup přípravy kovu (obr. 69).



**Obr. 69** Schéma přípravy kovu pro popsání varianty.

### Termická analýza

Termická analýza kovu s přidáním očkovadlem SNAM HIAL do kelímku byla prováděna tak, aby co nejlépe odpovídala stavu kovu v odlitých mřížích. Výsledky změřené v čase odlévání zkušebních mříží jsou uvedeny v tab. 30.

**Tab. 30** Parametry termické analýzy pro všechny měřené varianty

Varianta	CEL	TL	TElow	TEhigh	R	GRF1	GRF2
I/3	4,22	1148,9	1148,9	1153	4,1	89	68
II/1	4,23	1148,5	1148,5	1155	6,5	83	61
II/2	4,27	1143,9	1143,9	1153,2	9,3	78	115
III/1	4,26	1145,2	1145,2	1152,4	7,2	73	69
III/2	4,24	1146,8	1146,8	1152,8	6	69	46
IV/1	4,26	1145,4	1145,4	1153,7	8,3	65	62
V/1	4,26	1145,5	1145,5	1153,3	7,8	82	84
V/2	4,26	1145,5	1145,5	1154,6	9,1	81	75

K porovnání variant byly vytvořeny následující tabulky (tab. 31-37) pro jednotlivé parametry termické analýzy. Hodnoty uvedené v tabulce jsou naměřeny na kelímku bez přidání očkovadla simulujícího druhou fázi očkování.

**Tab. 31** Hodnoty parametru TL v závislosti na číslu odlévané pánve (čase).

TL	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Var.										
TL	V1	1139	1138.8	1140.8	1138.9	x	1140.4	x	1137.1	x	x
	V2	1135.6	1136.7	1136.3	1136.6	1137.2	x	1135.5	1136.1	1138.9	1139
	V3	1143.2	1143.5	1145.3	1146.5	1146.5	1148.5	1150.5	1151.9	1150.1	1151.2
	V4	1143.2	1142.9	1143.2	1144.3	1145.2	1146.2	1142.6	1143	1139.7	1140.7
	V5	1137	1138.4	1137	1136.9	1138.3	1138.3	x	x	1139.2	1139.6

**Tab. 32** Hodnoty parametru TE<sub>low</sub> v závislosti na číslu odlévané pánve (čas).

TE <sub>low</sub>	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Var.										
	V1	1139	1138.8	1140.8	1138.9	x	1140.4	x	1137.1	x	x
	V2	1141.4	1144.4	1137.9	1139	1137.7	x	1137.2	1136.1	1134	1135.1
	V3	1137.6	1138.3	1139.1	1139.1	1138.3	1138.5	1137.5	1137.9	1138.6	1138.2
	V4	1140.7	1141.1	1141.8	1141.3	1141.3	1140.9	1141.9	1141.9	1139.7	1140.7
	V5	1137	1138.4	1137	1136.9	1138.3	1138.3	x	x	1139.2	1139.6

**Tab. 33** Hodnoty parametru TE<sub>high</sub> v závislosti na číslu odlévané pánve (čas).

TE <sub>high</sub>	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Var.										
	V1	1144.8	1145.2	1145.7	1145.7	x	1147.2	x	1146	x	x
	V2	1141.4	1144.4	1137.9	1139	1137.7	x	1137.2	1136.1	1134	1135.1
	V3	1138.9	1139.3	1140.4	1140.6	1140	1141	1140.1	1141.3	1141.1	1141.3
	V4	1141.1	1141.6	1142.3	1141.7	1142.2	1141.9	1142	1142	1143.4	1143.4
	V5	1140.5	1141.3	1141.8	1141.4	1144.7	1144.4	x	x	1144.3	1143.7

**Tab. 34** Hodnoty parametru TS v závislosti na číslu odlévané pánve (čas).

TS	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Var.										
	V1	1091	1088	1094.5	1094.2	x	1094.3	x	1094.5	x	x
	V2	1077.3	1068.8	1041.9	1041.9	1051.2	x	1044.8	1062.8	1080.3	1086.2
	V3	1085.4	1089.7	1092	1090.4	1090.3	1090.4	1088.1	1089.7	1093.1	1092.1
	V4	1094.6	1092.7	1093.9	1093.5	1092.7	1094.9	1095.6	1093.7	1095.6	1097.9
	V5	1088	1089	1091	1089.5	1104	1095	x	x	1092.5	1095.3

**Tab. 35** Hodnoty parametru R v závislosti na číslu odlévané pánve (čas).

R	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Varianta										
	V1	5,8	6,4	4,9	6,8	x	6,8	x	8,9	x	x
	V2	5,8	9,2	6,8	9,5	7,6	x	7,9	10,3	9,6	13,8
	V3	1,3	1,0	1,3	1,5	1,7	2,5	2,6	3,4	2,5	3,1
	V4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,9	1,0	0,1	0,1	3,7	2,7
	V5	3,5	2,9	4,8	4,5	6,4	6,1	x	x	5,1	4,1

**Tab. 36** Hodnoty parametru GRF1 v závislosti na číslu odlévané pánve (čase).

GRF1	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Varianta										
	V1	89	82	90	84	x	85	x	75	x	x
	V2	56	48	40	39	41	x	41	39	45	48
	V3	57	79	82	70	70	60	58	63	70	68
	V4	91	90	82	86	75	68	99	101	83	85
	V5	77	70	76	77	83	77	x	x	74	78

**Tab. 37** Hodnoty parametru GRF2 v závislosti na číslu odlévané pánve (čase).

GRF2	Pánev	2.	2.	3.	3.	4.	4.	5.	5.	6.	6.
	Varianta										
	V1	116	78	128	114	x	128	x	109	x	x
	V2	160	167	180	148	180	x	175	77	137	115
	V3	137	64	114	117	124	126	136	127	114	111
	V4	102	113	117	108	62	104	120	101	96	88
	V5	125	129	119	118	71	113	x	x	122	106

Z výsledků termické analýzy vyplývá, že:

- je nezbytné zachovat druhý stupeň očkování foukáním do proudu kovu při lití, neboť se jím výrazně zvyšuje  $TE_{low}$  a  $TE_{high}$ ;
- u varianty 2 je jasně zřetelný odeznívací účinek preconditioningu, který se projevoval s přibývajícím časem, zvláště po 99 minutách.

### Obrazová analýza

Při obrazové analýze byly z výbrusů z odlitých mříží zjištěny parametry:

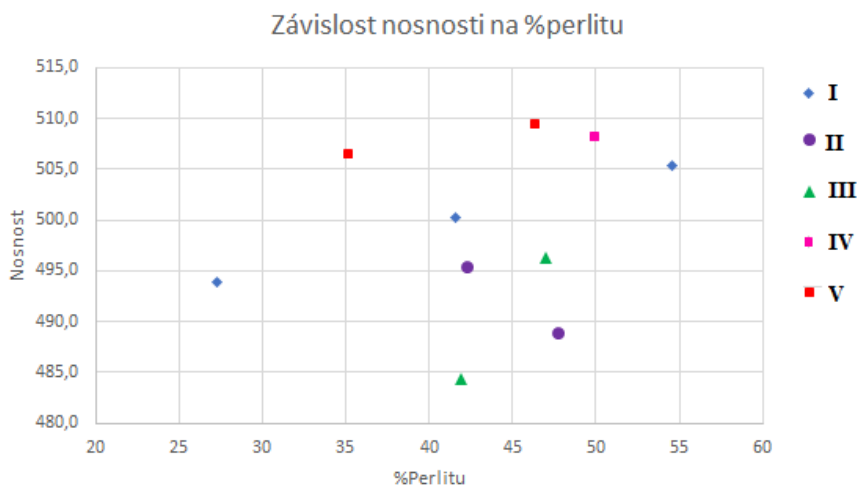
- počet kuliček grafitu,
- průměr kuliček grafitu,
- % feritu,
- % perlitu,
- % grafitu,
- hranice zákalky (cementitu).

Z výsledků uvedených v tab. 38 je znát, že preconditioning zvyšuje počet zárodků vhodných k nukleaci grafitu, a tím zvyšuje počet kuliček grafitu ve výsledné struktuře. Nejjemnější strukturu mají varianty 4 a 5, s preconditioningem a první i druhou fází očkování, avšak všechny varianty od základního stavu až po variantu s preconditioningem a první i druhou fází očkování vykazují velmi vysoký počet grafitických útvarů. Endogenní tuhnutí

vyskytující se u litin s takto vysokým počtem zárodků zapříčinilo výskyt ředin v nosných částech mříží, což znemožnilo provést zkoušku tahem z vysoustružených vzorků právě z této oblasti. Řediny nijak neovlivňovaly mechanické vlastnosti zjištěných na samostatně litém tělese, ani hodnoty nosnosti mříží. Mechanické vlastnosti v tomto případě nejeví závislost na procentuálním podílu perlitu v litině (obr. 70).

**Tab. 38** Výsledky analýzy struktury pro všechny měřené varianty

Varianta	Počet kuliček	Průměr kuliček [ $\mu\text{m}$ ]	% Feritu	% Perlitu	% Grafitu	Zákalka [mm]
I/1	1177	8,8	64	27,3	8,7	0
I/2	795	12	35	54,6	10,4	0
I/3	946	10,6	48	41,6	10,4	0,3
II/1	1216	8,4	64	47,8	8,2	0,3
II/2	1080	8,4	45	42,3	12,7	0
III/1	1206	10,6	40	47	13	3,5
III/2	1066	10,2	47	42	11	3,5
IV/1	1446	10,6	38	50	12	0,1
V/1	1389	7,6	57	35,2	7,8	0
V/2	1346	9,2	46	46,4	7,6	0



**Obr. 70** Závislost nosnosti na % perlitu.

Z výsledků obrazové analýzy vyplývá, že:

- u litiny, kde byl aplikován preconditioning, se vyskytuje vyšší počet grafitických buněk, jemnozrnější struktura;
- nejvyšší počet grafitických buněk byl zaznamenán u varianty s dávkováním látek pro preconditioning do pánve spolu s využitím prvního i druhého stupně očkování;
- ve struktuře je grafit rozložen rovnoměrně, jeho tvar je dokonale zrnitý a jeho průměrné velikosti se pohybují v intervalu 7-11  $\mu\text{m}$ . Dle ČSN EN ISO 945-1 (420464) se jedná o vyloučený grafit spadající do skupiny VI 8;

- podíl feritu a perlitu ve struktuře nevykazuje závislost na použitém očkovaní a preconditioningu.

### Mechanické vlastnosti

Výsledky všech provedených zkoušek mechanických vlastností jsou uvedeny v tab. 39. Zkouška nosnosti neboli zkouška plného zatížení je destruktivní zkouškou. Z uvedeného důvodu byly nejprve využity 2 kusy odlitých mříží LM12 a další 2 kusy byly přidány až u variant, které vykazovaly nejvyšší výsledky.

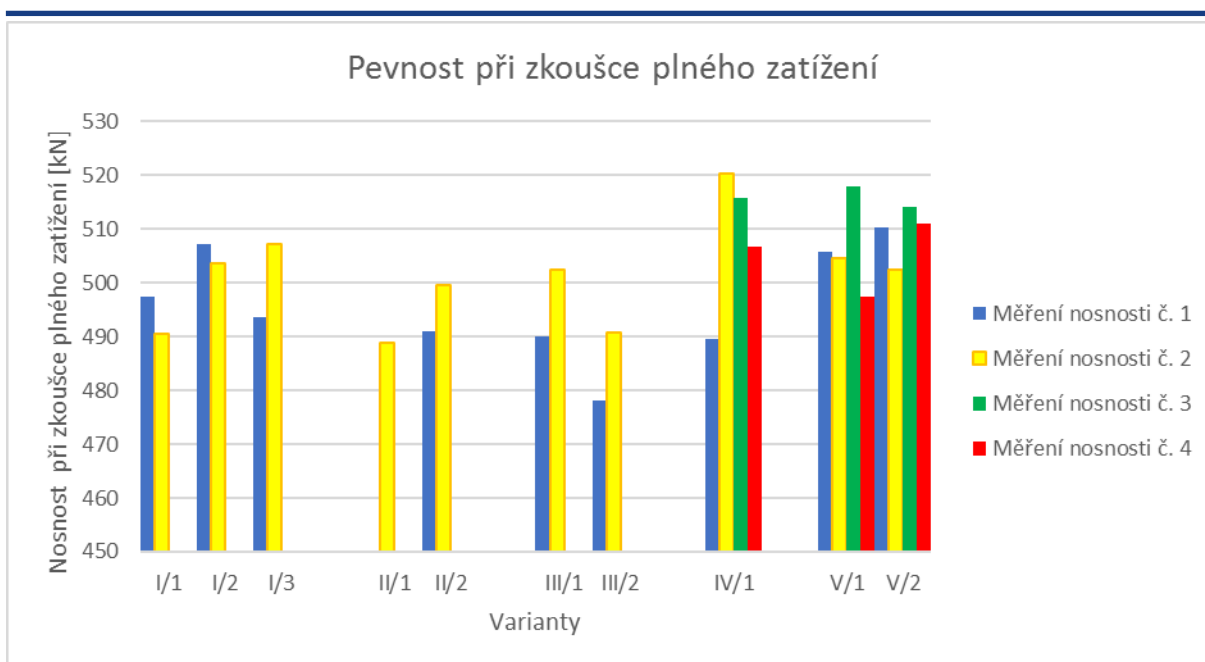
**Tab. 39** Výsledky mechanických zkoušek pro všechny varianty

Varianta	Nosnost [kN]					Rm [MPa]	A [%]
	měření 1.	měření 2.	měření 3.	měření 4.	AP		
I/1	497,3	490,4	-	-	493,9	585	10,1
I/2	507,1	503,6	-	-	505,4	585	10,1
I/3	493,5	507,1	-	-	500,3	593	11,2
II/1	-	488,8	-	-	488,8	590	11,6
II/2	491,0	499,5	-	-	495,3	590	11,6
III/1	490,1	502,3	-	-	496,2	552	10,9
III/2	478,0	490,7	-	-	484,4	550	14,4
IV/1	489,5	520,4	515,8	506,7	508,1	581	11,1
V/1	505,8	504,5	518,0	497,3	506,4	579	12,3
V/2	510,2	502,3	514,0	511,1	509,4	579	12,3
AP – aritmetický průměr; Rm – pevnost v tahu; A - tažnost							

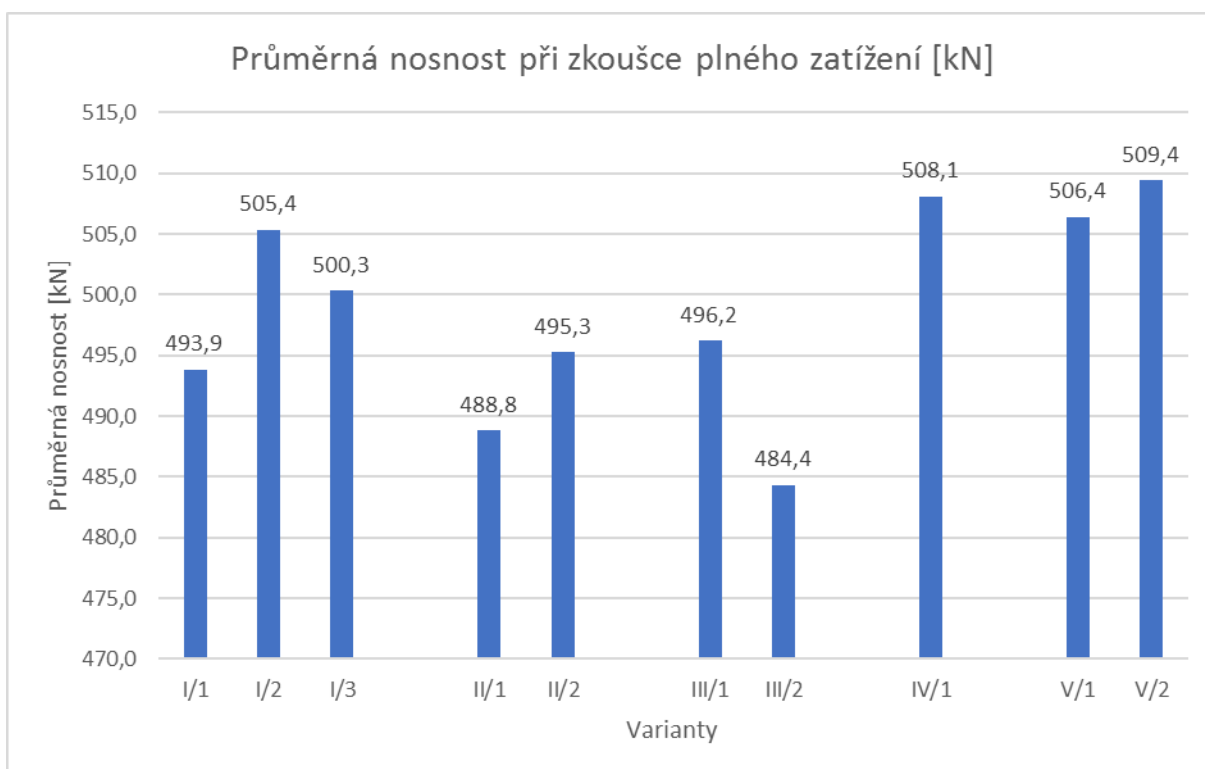
Pro přehlednost byly výsledky měření nosnosti zobrazeny v grafu (obr. 71). Pro zjednodušení byl vypočítán aritmetický průměr hodnot nosnosti u jednotlivých variant a jeho hodnoty zaneseny do grafu (obr. 72).

Z výsledků mechanických zkoušek vyplývá, že:

- pevnost v tahu a tažnost splňují požadované hodnoty pro všechny varianty. Varianta s dávkováním preconditioningu do pánve bez využití prvního stupně očkovaní vykazuje nižší hodnoty u pevnosti v tahu než varianty ostatní. Jedná se o rozdíl 30–40 MPa;
- varianty 4 a 5, s dávkováním preconditioningu do pánve s využitím prvního i druhého stupně očkovaní, dosahují stabilně mírně vyšších hodnot nosnosti než ostatní;
- tažnosti se u všech variant pohybují nad 10 %.



**Obr. 71** Sloupcový graf znázorňující naměřené hodnoty při zkoušce plného zatížení pro jednotlivé varianty.



**Obr. 72** Sloupcový graf znázorňující průměrné hodnoty nosnosti při zkoušce plného zatížení pro jednotlivé varianty.

Z grafů (obr. 71 a obr. 72) vyplývá, že nejvyšší nosnosti dosahovaly varianty 4 a 5, s preconditioningem a první i druhou fází očkování. Stabilněji tento proces funguje, pokud má preconditioning dostatek času na rozpuštění.

### Ekonomické zhodnocení variant

Pro hodnocení jednotlivých variant byly použity ceny platné v době vykonávání experimentální části, tedy k listopadu roku 2017. Nejlepší cenu kovu vykazoval stávající stav, varianta 1, s tunovou cenou 6,80 eur (tab. 40). Nově zkoušené varianty jsou právě z důvodu použití preconditioningu s nejvyšší cenou za kg 2,49 euro a nejvyšším doporučeným dávkováním dražší. Z těchto variant byla nejlevnější varianta 3 (tab. 42). Varianty 4 a 5 (tab. 43) mají shodné dávkování přípravků pro úpravu kovu a jsou přibližně o 0,5 eura levnější než varianta 2 (tab. 41).

**Tab. 40** Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 1.

Přípravek	Dávkování [%]	Množství na tunu [kg]	Cena/kg [euro]	Cena na tunu [euro]	Výsledná cena na tunu [euro]
SNAM HIAL	0,15	1,5	1,78	2,67	6,80
SNAM HIBACAL	0,25	2,5	1,65	4,125	

**Tab. 41** Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 2.

Přípravek	Dávkování [%]	Množství na tunu [kg]	Cena/kg [euro]	Cena na tunu [euro]	Výsledná cena na tunu [euro]
SNAM HIAL	0,15	1,5	1,78	2,67	13,13
SNAM X BACAL	0,4	4,2	2,49	10,46	

**Tab. 42** Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 3.

Přípravek	Dávkování [%]	Množství na tunu [kg]	Cena/kg [euro]	Cena na tunu [euro]	Výsledná cena na tunu [euro]
SNAM HIAL	0,15	1,5	1,78	2,67	10,14
SNAM X BACAL	0,3	3	2,49	7,47	

**Tab. 43** Cena přípravků pro úpravu kovu při variantách 4 a 5.

Přípravek	Dávkování [%]	Množství na tunu [kg]	Cena/kg [euro]	Cena na tunu [euro]	Výsledná cena na tunu [euro]
SNAM HIAL	0,15	1,5	1,78	2,67	12,62
SNAM HIBACAL	0,15	1,5	1,65	2,48	
SNAM X BACAL	0,3	3	2,49	7,47	

---

Z výsledků ekonomického vyhodnocení vyplývá, že:

- při využití přípravků pro preconditioning dochází zákonitě k zdražení výroby, neboť předepsané dávkování je vyšší než u aktuálního očkovaní a cena materiálu pro preconditioning je také vyšší;
- nejlevněji vychází standartní stav, následován variantou 3, s dávkováním preconditioningu do pánve bez využití prvního stupně očkovaní;
- látky (očkovadla) pro varianty s nejlepšími výsledky v mechanických zkouškách jsou přibližně dvakrát dražší než standartní stav. Jedná se o zvýšení ceny o 5 až 6 eur na tunu kovu.

---

## ZÁVĚR

Litina s kuličkovým grafitem je materiál, jehož vlastnosti závisí na mnoha faktorech, které do výroby vstupují. Při výrobě musí být litina s kuličkovým grafitem natavena ze vsázkových surovin, dolegována na příslušné chemické složení, namodifikována, naočkována a odlita. Každý z těchto kroků má vliv na její výsledné vlastnosti a je třeba tyto kroky kontrolovat. Pro slévárnu je výhodné jednotlivé kroky co nejvíce zautomatizovat, aby nebyly ovlivňovány lidským faktorem, který zapříčiňuje výchyly od standartního postupu a způsobuje problémy.

Cílem diplomové práce bylo otestovat postup, při kterém by byl eliminován lidský faktor na prvním stupni očkování. Ten uskutečňovala obsluha licího zařízení při přelévání kovu z transportní pánve do licího zařízení. Druhý stupeň očkování byl zachován, neboť probíhá automaticky foukáním do proudu kovu. Jako možná náhrada prvního stupně očkování byla zvolena technologie preconditioningu. Následně tedy bylo nutné otestovat jeho vliv na mechanické vlastnosti litiny a strukturu litiny s kuličkovým grafitem a tyto výsledky poté porovnat se stávajícím stavem.

Očkovací účinek a účinek preconditioningu byly vyhodnocovány pomocí termické analýzy a následně na vzorkách kanalizačních mříží pomocí obrazové analýzy a zkoušek mechanických vlastností. Pro zjištění mechanických vlastností byly využity zkoušky tahem a zkoušky plným zatížením. Na závěr byly varianty úpravy kovu posouzeny i z hlediska ekonomického. Výsledky experimentu jsou uvedeny v předchozích kapitolách (kap. 7.5 a 7.6).

Z hlediska náhrady prvního stupně očkování preconditioningem pro eliminaci lidského faktoru u očkování do proudu kovu, při přelévání z transportní pánve do licího zařízení, byly výsledky této práce negativní, neboť nebylo dosahováno potřebné stability procesu. Výsledné mechanické vlastnosti byly nižší než u standartního stavu. U variant s použitím preconditioningu a prvního i druhého stupně očkování, došlo k mírnému nárůstu hodnot nosnosti mříží oproti standartnímu stavu, v průměru o 10kN. U pevností v tahu, měřených na samostatně litém tělese, byly odchylky v rámci jednotek MPa. Tažnosti se pohybovaly v hodnotách 10-15 % u všech testovaných variant úpravy kovu.

Z ekonomického hlediska bych využití preconditioningu nedoporučoval, neboť látky na úpravu kovu u variant, při kterých došlo pouze k mírnému zlepšení mechanických vlastností, jsou v daném dávkování přibližně dvakrát dražší než látky používané při standartním stavu. Dle dodavatelů preconditioningu mělo dojít ke zlepšení výtěžnosti modifikačního drátu a tím snížení výsledné ceny. Tento účinek se ovšem při zkouškách neprokázal. Dalším postupem, kterým by se mohla slévárna vydat, je změna dávkování jednotlivých očkovaadel, neboť se kov, z hlediska počtu grafitických zárodků, jeví jako přeočkováný.

Vzhledem k časové a ekonomické náročnosti zkoušek jich bylo provedeno pouze omezené množství. Pro zvýšení důvěryhodnosti výsledků by bylo potřeba provést další zkoušky a získat více dat k analýze.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR Real, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav, Josef KORITTA a kol. *Strojírenské materiály*. Třetí. Praha: SNTL, ALFA, 1981.
- [3] VONDRÁK, V., J. HAMPL a A. HANUS. *Metalurgie litin: mimopecní zpracování roztavené litiny (očkování, modifikace)*. Ostrava: VŠB-TU, 2005. ISBN 80-248-0777-7.
- [4] PODRÁBSKÝ, Tomáš a Simona POSPÍŠILOVÁ. *Struktura a vlastnosti grafitických litin* [online]. Brno, 2006 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://archive.is/zpIVJ#selection-227.1-227.30>. Studijní opora. VUT v Brně, FSI, ÚMVI.
- [5] KRÁL, V. *Vliv síry a grafitizačního očkování na strukturu a mechanické vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43837628-Vliv-siry-a-grafitizacniho-ockovani-na-strukturu-a-mechanicke-vlastnosti-litiny-s-lupinkovym-grafitem.html>. Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
- [6] STOKLASA, F. *Pájecí slitiny* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=6096>
- [7] MASCHKE, W., M. JONULEIT a R. ZEMÁNEK. *Očkování litiny. Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren české republiky, 2012, **LX**(9-10), 356-367. ISSN 0037-6825.
- [8] CHYLA, Ondřej. *Ověření účinku očkovadel na strukturu litiny s využitím termické analýzy*. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [9] MARTINÁK, Rostislav. *Kinetika odeznívání očkovacího účinku v litinách, jeho vliv na nukleaci grafitu, počet eutektických buněk a z toho plynoucí dopady na metalografickou strukturu. Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2016, **LXIV**(9-10), 363-365. ISSN 0037-6825.
- [10] OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina: Litina s kuličkovým grafitem* [online]. 2. rozš. vyd. Brno [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/TVL-II\\_vytah.pdf](http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/TVL-II_vytah.pdf)
- [11] ELKEM - PRESEED™ PRECONDITIONER. Foundry-Planet.com - B2B Portal for Technical and Commercial Foundry Management [online]. Füssen: FOUNDRY-PLANET, 2004, 2012 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/equipment/detail-view/elkem-preseedTM-preconditioner/?cHash=1e56da1f59a6ef53ab8b642fd8493125>
- [12] Chill wedge test piece. Giesserei Lexicon [online]. 2016 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/chill-wedge-test-piece-3794/>
- [13] KASI - *Největší český výrobce kanalizační litiny* [online]. Přelouč, 2010 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.kasi.cz/>
- [14] Snam Alloys: Products [online]. India, 2014 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.snam.co.in/products.html>

---

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>zkratka</b>	<b>jednotka</b>	<b>popis</b>
A	[%]	tažnost
ACEL	-	ekvivalent aktivního uhlíku
AP	-	aritmetický průměr
ATAS	-	Adaptive Thermal Analysis System
CEL	-	uhlíkový ekvivalent
Čas“O“	[min]	čas od naočkování
Čas“PRE“	[min]	čas od aplikace preconditioningu
dT/dt TS	-	první derivace křivky chladnutí na teplotě solidu
GRF 1,2	-	první/druhý grafitizační faktor
HF	-	tzv. hyper funkce
LČG	-	litina s červíkovitým grafitem
LLG	-	litina s lupínkovým grafitem
LKG	-	litina s kuličkovým grafitem
Rkrit	-	kritická velikost zárodku
TEhigh	°C	maximální eutektická teplota
TElow	°C	minimální eutektická teplota
TL	-	temperovaná litina
TL	°C	teplota likvidu
TS	°C	teplota solidu
Rm	MPa	pevnost v tahu
ΔG	J	Gibbsova energie (volná entalpie)
ϑ	°	úhel smáčení

---

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Obvyklé aktivní prvky v komplexních očkovaadlech [1].....	18
Tab. 2 Hlavní parametry termické analýzy ATAS. [8] .....	29
Tab. 3 Mezní hranice obsahu prvků v odlévaném kovu.....	32
Tab. 4 Chemické složení modifikátoru.....	32
Tab. 5 Chemické složení využívaných očkovaadel [14].....	33
Tab. 6 Vlastnosti odlitku mříží LM12 .....	33
Tab. 7 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro variantu I/3. ....	39
Tab. 8 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 1. ....	40
Tab. 9 Výsledky analýzy struktury pro varianty I/1, I/2 a I/3. ....	41
Tab. 10 Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty I/1, I/2 a I/3.....	43
Tab. 11 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty II/1 a II/2. ....	44
Tab. 12 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 2. ....	46
Tab. 13 Výsledky analýzy struktury pro varianty II/1 a II/2. ....	48
Tab. 14 Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty II/1 a II/2. ....	49
Tab. 15 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty III/1 a III/2. ....	50
Tab. 16 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 3 – první.....	52
Tab. 17 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 3 – druhá ....	54
Tab. 18 Výsledky analýzy struktury pro varianty III/1 a III/2. ....	54
Tab. 19 Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty III/1 a III/2.....	55
Tab. 20 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro variantu IV/1. ....	57
Tab. 21 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 4. ....	57
Tab. 22 Výsledky analýzy struktury pro variantu IV/1. ....	59
Tab. 23 Výsledky zkoušky plným zatížením pro variantu IV/1.....	60
Tab. 24 Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro variant IV/1. ....	61
Tab. 25 Parametry termické analýzy vyhodnocené pro varianty V/1 a V/2.....	62
Tab. 26 Parametry termické analýzy, pro kelímek bez očkovaadla, pro variantu 5. ....	63
Tab. 27 Výsledky analýzy struktury pro varianty V/1 a V/2.....	65
Tab. 28 Výsledky zkoušky plným zatížením pro varianty V/1 a V/2. ....	66
Tab. 29 Výsledky zkoušek mechanických vlastností pro varianty V/1 a V/2.....	66
Tab. 30 Parametry termické analýzy pro všechny měřené varianty.....	67
Tab. 31 Hodnoty parametru TL v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	67
Tab. 32 Hodnoty parametru TE <sub>low</sub> v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	68
Tab. 33 Hodnoty parametru TE <sub>high</sub> v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	68
Tab. 34 Hodnoty parametru TS v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	68
Tab. 35 Hodnoty parametru R v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	68
Tab. 36 Hodnoty parametru GRF1 v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	69
Tab. 37 Hodnoty parametru GRF2 v závislosti na číslu odlévané pánve (čase). ....	69
Tab. 38 Výsledky analýzy struktury pro všechny měřené varianty .....	70
Tab. 39 Výsledky mechanických zkoušek pro všechny varianty .....	71
Tab. 40 Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 1. ....	73
Tab. 41 Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 2. ....	73
Tab. 42 Cena přípravků pro úpravu kovu při variantě 3. ....	73
Tab. 43 Cena přípravků pro úpravu kovu při variantách 4 a 5.....	73

---

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Diagram Fe-C-Fe <sub>3</sub> C. [3] .....	9
Obr. 2 Etalony tvarů grafitu dle ČSN EN 1560. [4] .....	10
Obr. 3 Schéma litiny s kuličkovým grafitem s obsahem feritu a perlitu. [4] .....	11
Obr. 4 Závislost volné entalpie ( $\Delta G$ ) na velikosti zárodku. [5].....	12
Obr. 5 Rozdělení smáčivosti na povrchu tuhé částice dle úhlu smáčení. [6] .....	13
Obr. 6 Směr růstu lupínkového grafitu. [1] .....	15
Obr. 7 Odezňování očkovacího účinku. [1].....	20
Obr. 8 Reakce související se ztrátami hořčíku. [1].....	22
Obr. 9 Schéma zařízení pro modifikaci plněným profilem. [10] .....	23
Obr. 10 Zařízení využívající pro modifikaci plněným profilem. [10].....	24
Obr. 11 Měděná kokila na výrobu vzorku pro kontrolu chemického složení. [8].....	26
Obr. 12 Schéma ISO zákalkové zkoušky [1].....	27
Obr. 13 ISO zákalková zkouška .....	27
Obr. 14 Klínová zkouška. [12] .....	27
Obr. 15 Kelímek pro termickou analýzu. ....	28
Obr. 16 Křivka tuhnutí s vyznačenými parametry. [8].....	30
Obr. 17 Posloupnost operací při přípravě kovu. ....	31
Obr. 18 Mříže LM12 EN124 D400. [13] .....	33
Obr. 19 Schéma procesu přípravy kovu a časová posloupnost prováděných zkoušek.....	34
Obr. 20 Odlitek s vyznačeným místem odběru vzorku pro obrazovou analýzu.....	36
Obr. 21 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem. ....	37
Obr. 22 Zkušební lis KASI 2009. ....	37
Obr. 23 Schéma postupu přípravy kovu u varianty 1. ....	38
Obr. 24 Zařízení pro aplikaci očkovadla v první fázi.....	39
Obr. 25 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu I/3.....	40
Obr. 26 Grafy průběhu jednotlivých parametrů termické analýzy v závislosti na čase. ....	41
Obr. 27 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/1. ....	42
Obr. 28 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/2. ....	42
Obr. 29 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu I/3. ....	42
Obr. 30 Struktura na samém konci žebra: a) I/1- bez zákalky, b) I/3- zákalka 0,6 mm. ....	43
Obr. 31 Schéma postupu přípravy kovu u varianty 2. ....	44
Obr. 32 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu II/1. ....	45
Obr. 33 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu II/2. ....	45
Obr. 34 Průběh TE <sub>low</sub> v závislosti na čase u varianty 2. ....	46
Obr. 35 Průběh TE <sub>high</sub> v závislosti na čase u varianty 2.....	47
Obr. 36 Průběh R v závislosti na čase u varianty 2. ....	47
Obr. 37 Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 2. ....	47
Obr. 38 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu II/1. ....	48
Obr. 39 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu II/2. ....	48
Obr. 40 Struktura na samém konci žebra: a) II/1- zákalka 0,6 mm, b) II/2- bez zákalky. ....	49
Obr. 41 Schéma postupu přípravy kovu u varianty 3. ....	50
Obr. 42 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu III/1.....	51
Obr. 43 Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu III/2.....	51
Obr. 44 Průběh TE <sub>low</sub> v závislosti na čase u varianty 3. ....	52
Obr. 45 Průběh TE <sub>high</sub> v závislosti na čase u varianty 3.....	53
Obr. 46 Průběh R v závislosti na čase u varianty 3. ....	53
Obr. 47 Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 3. ....	53
Obr. 48 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu III/1.....	54
Obr. 49 Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu III/2.....	55

---

Obr. 50	Struktura na samém konci žebra. ....	55
Obr. 51	Schéma postupu přípravy kovu u varianty 4. ....	56
Obr. 52	Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu IV/1. ....	57
Obr. 53	Průběh TE <sub>low</sub> v závislosti na čase u varianty 4. ....	58
Obr. 54	Průběh TE <sub>high</sub> v závislosti na čase u varianty 4. ....	58
Obr. 55	Průběh R v závislosti na čase u varianty 4. ....	59
Obr. 56	Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 4. ....	59
Obr. 57	Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu IV/1. ....	60
Obr. 58	Struktura na samém konci žebra: IV/1- zákalka 1,0 mm. ....	60
Obr. 59	Schéma postupu přípravy kovu u varianty 5. ....	61
Obr. 60	Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu V/1. ....	62
Obr. 61	Křivka chladnutí spolu s křivkami první a druhé derivace pro variantu V/2. ....	62
Obr. 62	Průběh TE <sub>low</sub> v závislosti na čase u varianty 5. ....	63
Obr. 63	Průběh TE <sub>high</sub> v závislosti na čase u varianty 5. ....	64
Obr. 64	Průběh R v závislosti na čase u varianty 5. ....	64
Obr. 65	Průběh GRF1 v závislosti na čase u varianty 5. ....	64
Obr. 66	Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu V/1. ....	65
Obr. 67	Struktura litiny s kuličkovým grafitem pro variantu V/2. ....	65
Obr. 68	Struktura na samém konci žebra: a) V/1- bez zákalky, b) V/2- bez zákalky. ....	66
Obr. 69	Schéma přípravy kovu pro popsané varianty. ....	67
Obr. 70	Závislost nosnosti na % perlitu. ....	70
Obr. 71	Sloupcový graf znázorňující naměřené hodnoty při zkoušce plného zatížení. ....	72
Obr. 72	Sloupcový graf znázorňující průměrné hodnoty nosnosti. ....	72