VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘÍZENÁ KRYSTALIZECE ODLITKŮ Z HLINÍKOVÝCH SLITIN VE SKOŘEPINOVÝCH FORMÁCH

CONTROLED CRYSTALLISATION OF ALUMINIUM ALLOYS CASTINGS POURED IN SHELL MOULDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE **Bc. LENKA MAŠKOVÁ**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.**
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lenka Mašková

který/která studuje v **magisterském navazujícím programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

Řízená krystalizace odlitků z hliníkových slitin ve skořepinových formách

v anglickém jazyce:

Controled crystallisation of aluminium alloys castings poured in shell moulds

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem úkolu je analýza možností ovlivnění průběhu krystalizace hliníkových odlitků ve skořepinových formách změnou parametru přestupu tepla ze skořepiny do vnějšího prostředí. Bude použito lokální ochlazování proudícím vzduchem a dalšími médii a sledován vliv parametru vnějšího chlazení na teplotní profil v odlitku, strukturu kovu a výskyt vad.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je ověření možnosti řízeného ochlazování skořepinových forem tak, aby se dosáhlo usměrněného tuhnutí a minimalizace výskytu vnitřních vad typu staženin. Práce bude zahrnovat návrh metodiky zkoušek, zhotovení experimentálního zařízení, odlití zkušebních odlitků a vyhodnocení jejich struktury a vnitřní homogenity.

Seznam odborné literatury:

1. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Decín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
2. OSTERMANN, F. Anwendungstechnologie Aluminium. 1. Auflage. Berlin: Springer, 1998. 368 s. ISBN 3-540-62706-5.
3. HASSE, S. Guß- und Gefügefehler. 1. Auflage. Berlin: Schiele-Schon, 1999. 230 s. ISBN 3-7949-0639-X.
4. GRUZLESKI, JE. The Treatment of Liquid Aluminium-Silican Alloys. 1st ed. Des Plaines: AFS, 1990. 250 p. ISBN 0-87433-121-8.
5. DAVIS, GJ. Solidification and Casting. 1st ed. London: Galliard, 1973. 200 p. ISBN 0-85334-556-2.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Ředitel ústavu	Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je ověření možnosti ovlivnění krystalizace hliníkových slitin odlévaných ve skořepinových formách, a docílit tak usměrněného tuhnutí. Za tímto účelem bylo potřeba navrhnout a sestrojit chladící zařízení. Za různých počátečních podmínek bylo odlito několik zkušebních odlitků a na základě vyhodnocení naměřených teplot byla vytvořena numerická simulace přestupu tepla v programu ProCAST. Nakonec se z odlitků nařezaly vzorky, provedl se metalografický výbrus a vyhodnotila se jejich struktura s ohledem na množství vad.

Klíčová slova

Přesné lití, přestup tepla, usměrněné tuhnutí, hliníkové slitiny, metalografický výbrus, hodnocení struktury a vad u odlitků.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to verify a possibility of controlling the crystallisation of aluminium alloys poured in shell moulds in order to achieve directional solidification. For this purpose, new cooling plant has been designed and fabricated. Several sample castings were produced under different initial conditions. Based on the evaluation of measured temperatures, a numerical simulation of heat transfer was created using the ProCAST software. Finally, the sample castings were sectioned into specimens that were, subsequently, metallographically polished and the evaluation of their structure with respect to the amount and types of defects was performed.

Key words

Investment casting, heat transfer, directional solidification, aluminium alloys, metallographically polished, casting structure and defect assessment.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAŠKOVÁ, Lenka. *Název: Řízená krystalizace odlitků z hliníkových slitin ve skořepinových formách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 103s. doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Řízená krystalizace odlitků z hliníkových slitin ve skořepinových formách vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 28. 5. 2010

…….

Bc. Lenka Mašková

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala panu Jaroslavu Janečkovi za pomoc při výrobě chladícího zařízení a při výrobě vzorků, Ondřeji Štočkovi za pomoc při odlévání, Ing. Marku Kováčovi za pomoc a cenné rady při numerické simulaci, paní Aleně Pavlicové za pomoc a cenné rady při přípravě metalografických výbrusů vzorků. Děkuji i rodině a příteli za pomoc, podporu a velkou trpělivost při studiu.

OBSAH

Prohlášení **5**
Poděkování **6**
Obsah **7**
1 Úvod **9**
2 Cíl diplomové práce **10**
3 Popis přestupu tepla při odlévání do skořepinových forem **11**
3.1 Skořepinová forma 11
3.2 Teplotní procesy ve skořepinové formě při odlévání a chladnutí slitiny 12
3.2.1 Akumulace tepla z kovu do skořepiny 13
3.2.2 Přestup tepla ze skořepiny do okolí 15
4 Krystalizace a tuhnutí hliníkových slitin **19**
4.1 Teplotní interval 20
4.2 Segregace prvků 22
4.2.1 Rozdělovací koeficient 22
4.2.2 Mechanismy distribuce prvků během tuhnutí 23
4.2.3 Koncentrační přechlazení 23
4.3 Struktura slitin hliníku 24
4.3.1 Morfologie eutektika ve slitinách Al–Si 25
4.3.2 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al-Si 26
4.3.3 Metodika měření DAS 27
5 Realizace experimentálních zkoušek **29**
5.1 Experimentální skořepiny 29
5.2 Zařízení pro chlazení skořepinových forem 31
5.3 Zařízení pro měření teploty 33
5.4 Tavení a odlévání slitiny do experimentálních skořepin 33
5.5 Křivky chladnutí 35
5.5.1 Vzorek číslo 1 37
5.5.2 Vzorek číslo 2 38
5.5.3 Vzorek číslo 3 39
5.5.4 Vzorek číslo 4 40
5.5.5 Vzorek číslo 5 41
5.5.6 Vzorek číslo 6 42
5.5.7 Vzorek číslo 7 43
5.6 Hodnocení křivek chladnutí 44
5.6.1 Porovnání vzorků litých do studených skořepin cca 20 °C 44
5.6.2 Porovnání vzorků litých do teplé skořepiny v rozmezí 230–290 °C 45
5.6.3 Porovnání vzorků litých do teplých skořepin cca 430 °C 46
6 Numerická simulace přestupu tepla **48**
6.1 Simulace přestupu tepla u studených skořepin cca 20 °C 48
6.2 Simulace přestupu tepla u teplých skořepina 230–290 °C 52
6.3 Simulace přestupu tepla u teplých skořepina 430 °C 55
7 Hodnocení struktury experimentálních vzorků **59**
7.1 Příprava vzorků 59
7.2 Vyhodnocení DAS 60
7.2.1 Vzorek č.1 61
7.2.2 Vzorek č.2 63

7.2.3 Vzorek č.3 65
7.2.4 Vzorek č.4 67
7.2.5 Vzorek č.5 69
7.2.6 Vzorek č.6 71
7.2.7 Vzorek č.7 73
7.2.8 Porovnání DAS jednotlivých vzorků 75
7.3 Vyhodnocení struktury 76
7.3.1 Struktura vzorku č.1 77
7.3.2 Struktura vzorku č.2 79
7.3.3 Struktura vzorku č.3 81
7.3.4 Struktura vzorku č.4 83
7.3.5 Struktura vzorku č.5 85
7.3.6 Struktura vzorku č.6 87
7.3.7 Struktura vzorku č.7 89
8 Hodnocení vad u experimentálních vzorků 91
8.1 Vady ve vzorku č.1.1 91
8.2 Vady ve vzorku č.2.1 92
8.3 Vady ve vzorku č.3.1 93
8.4 Vady ve vzorku č.4.1 94
8.5 Vady ve vzorku č.5.1 95
8.6 Vady ve vzorku č.6.1 96
8.7 Vady ve vzorku č.7.1 97
8.8 Porovnání vad jednotlivých vzorků 98
9 Závěr 100
10 Seznam použité literatury 102

1 ÚVOD

Slévárenská technologie je charakterizována tvarováním roztavených slitin do podoby odlitků prostřednictvím slévárenské formy. Odlitek je tvarován buď gravitační silou nebo může být síla zvětšena pomocí strojního zařízení. Odlitek je výsledkem příslušných technologických pochodů, po kterých by měl mít žádané mechanické a fyzikální vlastnosti. Na výsledné vlastnosti odlitku má velmi výrazný vliv průběh přechodu odlitku z tekuté do tuhé fáze, tzv. krystalizace [1].

V dřívějších dobách bylo ve slévárenském provozu velice obtížné nebo občas i nemožné ochlazování odlitků podle potřeby a tím docílení řízení krystalizace. Odlitky se chladily takovým způsobem, že se nechaly samovolně chladnout ve volném prostoru. Díky tomu docházelo ke vzniku heterogenní struktury, která má za následek rozdílné mechanické vlastnosti [2].

V poslední době nabývá studium krystalizace kovů stále většího významu. Je to právě z důvodu toho, že má struktura odlitku zásadní vliv na řadu materiálových vlastností. Proto je zkoumán mechanismus vzniku různých typů struktur s cílem řídit proces krystalizace tak, aby bylo dosaženo požadované struktury odlitku a s tím spojených vlastností [1].

Díky neustálému vývoji nových strojírenských přístrojů a strojů je v dnešní době daleko jednodušší provádět ochlazování odlitků podle potřeby. Ať již kvůli získání požadované výsledné struktury, zamezení vzniku velkého množství vad v odlitcích (staženiny, mikrostaženiny), nebo lepších mechanických vlastností.

2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

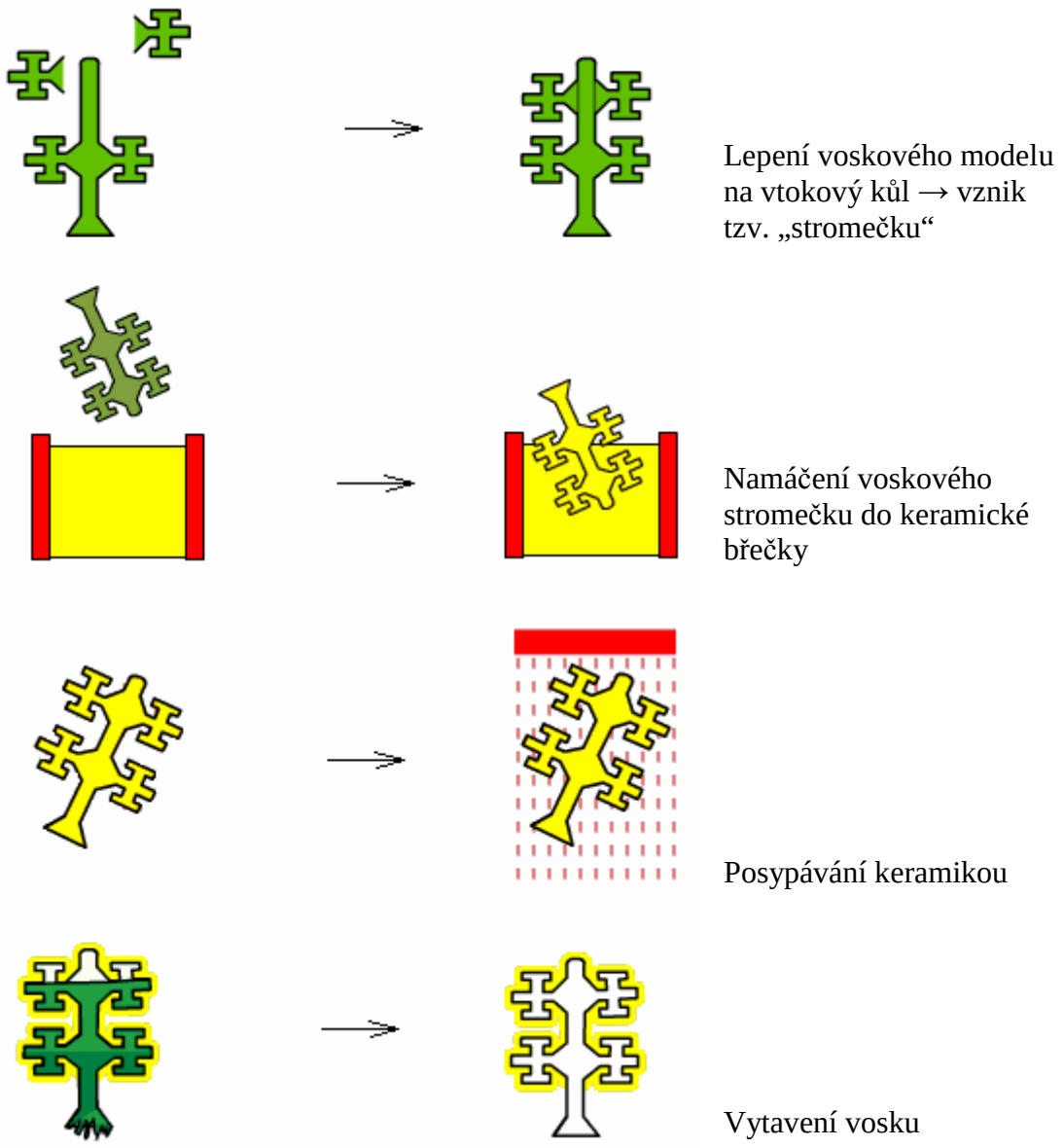
Cílem diplomové práce je provedení analýzy možnosti ovlivnit průběh krystalizace hliníkových slitin ve skořepinových formách za pomoci změny parametru přestupu tepla ze skořepiny do okolního prostředí.

Pro provedení a ověření analýzy je potřeba navrhnout a zhotovit experimentální chladící zařízení, které by umožňovalo chlazení skořepinových forem takovým způsobem, aby se docílilo usměrněného tuhnutí v odlévané slitině hliníku a tím i snížení výskytu vnitřních vad typu staženin ve zkušebních odlitcích.

3 POPIS PŘESTUPU TEPLA PŘI ODLÉVÁNÍ DO SKOŘEPINOVÝCH FOREM

3.1 Skořepinová forma

Postup výroby skořepinové formy za pomoci metody přesného lití je znázorněn na obr. 3.1 [3].



Obr. 3.1 Princip výroby skořepinové formy na vytavitelný model [3]

Na vtokový kůl jsou lepeny jednotlivé modely, které společně vytváří tzv. „stromeček“. Voskový stromeček je po odmaštění ponořen do keramické břečky a za pomoci otáčení se vytvoří kolem stromečku souvislá vrstva lícního obalu. Tato

vrstva se posype ostřivem požadované zrnitosti a následně se provede usušení. Na jednotlivé vrstvy je využita jiná hrubost ostřiva, tzn. první obal je vytvořen pomocí nejjemnějšího ostřiva. Při následném navyšování počtu obalů se používá hrubší ostřivo. Postup namáčení, posypávání a sušení se provádí do té doby, než se dosáhne požadované tloušťky skořepiny. Nejčastější počet vrstev bývá mezi pěti až patnácti. Poté je vosk ze skořepiny vytaven v autoklávu a skořepina vyžíhána kvůli odstranění zbytků nežádoucích látek (voda, vosk) a také kvůli dosažení její mechanické pevnosti [4].

3.2 Teplotní procesy ve skořepinové formě při odlévání a chladnutí slitiny

V tepelném režimu skořepinových forem, vyrobených metodou vytavitelného modelu, se významně uplatňuje přestup tepla sáláním, případně konvekcí do okolního prostředí, zatímco podíl tepla, akumulovaného formou je méně významný. U skořepin dochází ke vzájemnému osálávání stěn a vznikají nesymetrické tepelné toky směrem do osy stromečků a směrem vně [5].

Po zaplnění skořepiny je rozložení teplot kovu určeno jednak způsobem plnění formy, ale také teplotním polem skořepiny v okamžiku odlévání. Během lití se na ochlazování kovu podílí zejména tepelná akumulace stěn formy. K odvodu krystalizačního tepla a tepla přehřátí dochází zejména po zaplnění formy kovem [5].

Teplo odvedené z odlitku během tuhnutí Q_{kovu}, je částečně akumulováno formou Q_{formy} a částečně odvedeno do okolního prostředí $Q_{okolí}$, vztah (3.1) [5].

Teplo odvedené z odlitku během tuhnutí [5]:

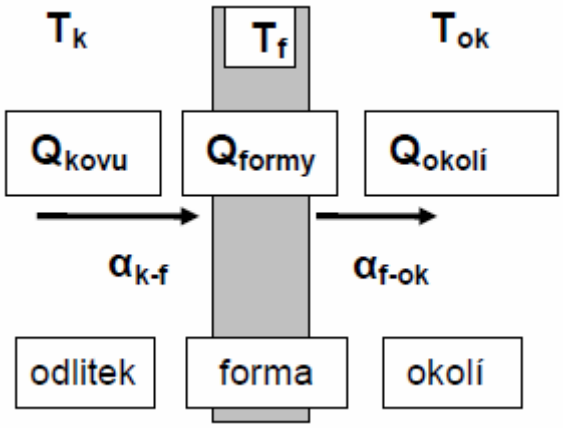
$$Q_{kovu} = Q_{formy} + Q_{okolí} \tag{3.1}$$

Dynamika procesu přestupu tepla je závislá na [5]:

- geometrickém uspořádání, hmotnostech a hustotě jednotlivých komponent (ρ_{kovu}, ρ_{formy}, m_{kovu}, m_{formy})
- postupu zaplňování dutiny formy tekutým kovem
- počátečních teplotách všech prvků systému a jejich prostorovém rozložení (T_{kovu}, T_{formy}, $T_{okolí}$)
- intervalu krystalizace a krystalizačním teple kovu (T_{liq}, T_{sol}, $Q_{krystal}$)
- součiniteli vedení tepla (λ_{kovu}, λ_{formy})
- měrné tepelné kapacitě (c_{kovu}, c_{formy})
- podmínkách přestupu tepla z kovu do formy, charakterizovaných součinitelem přestupu tepla na hranici kov–forma ($\alpha_{kov–forma}$)
- podmínkách ochlazování na vnějším povrchu formy, vyjádřené zejména teplotou okolí a součinitelem přestupu tepla z formy do okolí ($\alpha_{forma–okolí}$)

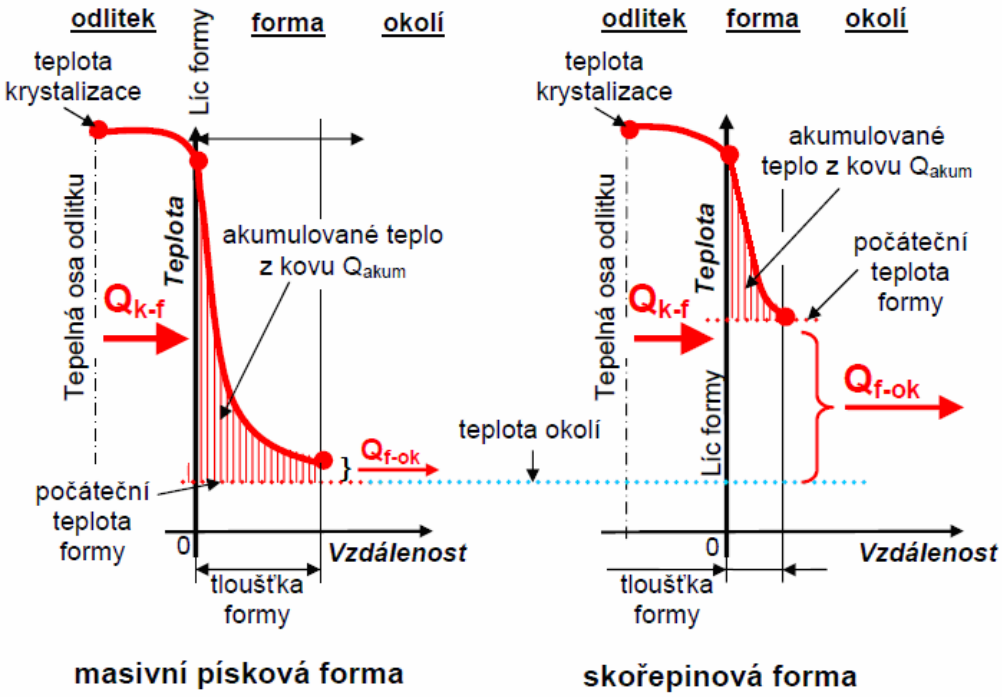
3.2.1 Akumulace tepla z kovu do skořepiny

Teplo, které se akumuluje závisí na poměru hmotnosti kovu a formy a také na počáteční teplotě formy, obr. 3.2 [4].



Obr. 3.2 Přestup tepla z odlitku v intervalu tuhnutí [4]

Při lití do masivních forem z disperzních materiálů (pískové formy) nebo do kovových forem (tlakové, gravitační lití) se převážná část fyzikálního tepla odlitku, odvedeného během tuhnutí akumuluje ve hmotě formy a do okolí se odvádí podstatně menší část tepla. Při lití do žíhaných tenkostěnných skořepinových forem je rozhodující podíl tepla odveden do okolí, obr. 3.3 [4].



Obr. 3.3 Schéma teplotních polí v masivní pískové a skořepinové formě ve stejném časovém okamžiku [4]

Přestup tepla procházející přes rozhraní mezi kovem a formou je přestup tepla vedením (kondukce). Je to jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech. Částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemisťují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Rychlost vedení tepla určuje tzv. tepelnou vodivost [6].

Keramické materiály mají hodnotu tepelné vodivosti 1,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pro teplotu 20°C. S rostoucí teplotou se hodnota tepelné vodivosti zvyšuje ke 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$, tato hodnota je určena pro teplotu 1000 °C [4].

Pro keramické materiály při teplotě 300 K je měrná tepelná kapacita c_p = 808 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ a jejich hustota má hodnotu ρ = 1623 $kg.m^{-3}$ [7].

Tento proces lze popsat Newtonovým zákonem, který stanovuje celkové množství tepla Q, přecházející z odlitku do formy, vztah (3.2) [4].

Celková intenzita tepelného toku z kovu do formy [4]:

$$\dot{Q}_{kon} = \alpha_{k-f} \cdot \left(T_k - T_f\right) \cdot S \qquad (3.2)$$

kde α_{k-f} – součinitel přestupu tepla mezi kovem a formou
T_k – teplota kovu
T_f – teplota formy
S – plocha mezi odlitkem a formou

Důsledkem akumulace tepla je zvyšování teploty skořepiny. Část tepla je odvedena do okolního prostředí. Akumulované teplo převedené z tuhnoucího odlitku závisí nejen na materiálových podmínkách formy a odlévané slitiny, ale také na výměně tepla mezi formou a okolím. Forma je schopna akumulovat jen určité množství tepla, které se určí podle vztahu 3.3 [4].

Akumulace tepla formou [4]:

$$Q_{akum} = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \qquad (3.3)$$

kde m_f – hmotnost formy
c_f – měrná tepelná kapacita formy
ΔT – rozdíl teplot, vztah (3.4)

Rozdíl teplot [4]:

$$\Delta T = T_{2f} - T_{1f} \tag{3.4}$$

kde T_{1f} – počáteční teplota formy
T_{2f} – konečná teplota formy

U skořepinových forem je velice důležitá jejich tloušťka vzhledem k tloušťce odlitku. Pokud vznikne případ, kdy je tloušťka odlitku oproti tloušťce skořepiny výrazně menší, nedojde během tuhnutí u této tlusté stěny s velkou hmotností prakticky k žádnému zvýšení teploty na vnější straně formy a většina tepla se akumuluje stejným způsobem jako u masivních pískových forem [4].

U tenkostěnné formy s malou hmotností oproti tloušťce stěny odlitku dojde k velkému prohřátí i na vnější stěně formy, významná část tepla je odvedena do okolí a jen malá část je akumulovaná ve formě, obr. 3.3 [4].

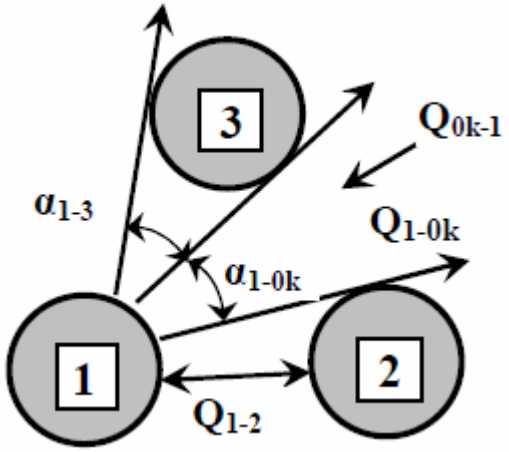
I počáteční teplota formy sehrává svou roli. Pokud ohřejeme skořepinu až na licí teplotu kovu, díky nulovému teplotnímu spádu nebude docházet k výměně tepla mezi taveninou a formou. Teprve v době vytvoření tepelného spádu mezi tuhnoucí taveninou a formou dojde mezi nimi k výměně tepla díky vnějšímu ochlazování skořepiny [4].

3.2.2 Přestup tepla ze skořepiny do okolí

Přestup tepla z formy do okolí se uskutečňuje prouděním a sáláním tepla. Proudění tepla (konvekce) je jeden ze způsobů šíření tepla. Dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Pohybem hmoty dochází k promíchávání jednotlivých částí, které mají rozdílnou teplotu, a díky tomu se přenáší teplo mezi různými částmi hmotného útvaru [8].

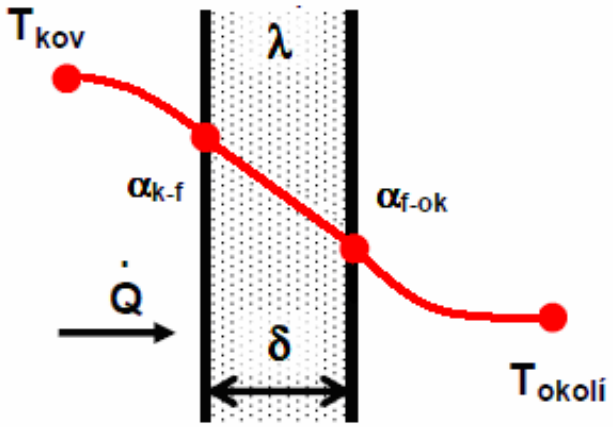
Sálání tepla (radiace) je fyzikální proces, při kterém látka emituje do prostoru energii (záření). Je to stav, kdy každé těleso vysílá všemi směry záření o vlnové délce 0,7–10 μm. Tyto infračervené paprsky se šíří vždy z teplejšího tělesa do chladnějšího [9].

Při odlévání tvarově složitých odlitků a u forem, tvořených více odlitky, dochází ke vzájemnému osálávání jednotlivých stěn a elementů stromečku. Přestup tepla je proto nutné řešit jako přenos v úplné nebo částečné uzávěře prostoru, v němž je nutno zohlednit jak tvarovou konfiguraci vlastní formy, tak radiační vliv okolního prostředí Q_{ok-1}, obr. 3.4 [5].



Obr. 3.4 Přestup tepla sáláním mezi elementy formy [5]

Na obr. 3.5 je v řezu schematicky znázorněn přestup tepla z odlitku přes stěnu formy do okolí. Tepelný tok je do okolí přenášen jen ve směru přes stěnu formy o šířce δ, teplota se mění pouze v závislosti na poloze napříč stěnou formy [4].



Obr. 3.5 Schéma přestupu tepla z odlitku přes stěnu formy do okolí [4]

Celková intenzita tepelného toku z formy do okolí je závislá na rozdílu teplot vnějšího povrchu formy T_f a teploty okolí T_{ok}, ochlazované ploše S a na součiniteli přestupu tepla mezi formou a okolím α_{f-ok}, vztah (3.5), který je tvořen složkou konvektivní (proudění) α_{kon} a složkou radiační (sálání) α_{rad}, vztah (3.6) [5].

Celková intenzita tepelného toku z formy do okolí [5]:

$$\dot{Q}_{f-ok} = \alpha_{f-ok} \cdot \left(T_f - T_{ok}\right) \cdot S \qquad (3.5)$$

kde $\alpha_{f\text{-}ok}$ – součinitel přestupu tepla mezi formou a okolím
T_f – teplota formy
T_{ok} – teplota okolí
S – plocha mezi formou a okolím

Součinitel přestupu tepla mezi formou a okolím [5]:

$$\alpha_{f-ok} = \left(\alpha_{kon} + \alpha_{rad}\right) \qquad (3.6)$$

kde α_{kon} – součinitel přestupu tepla konvekcí
α_{rad} – součinitel přestupu tepla radiací

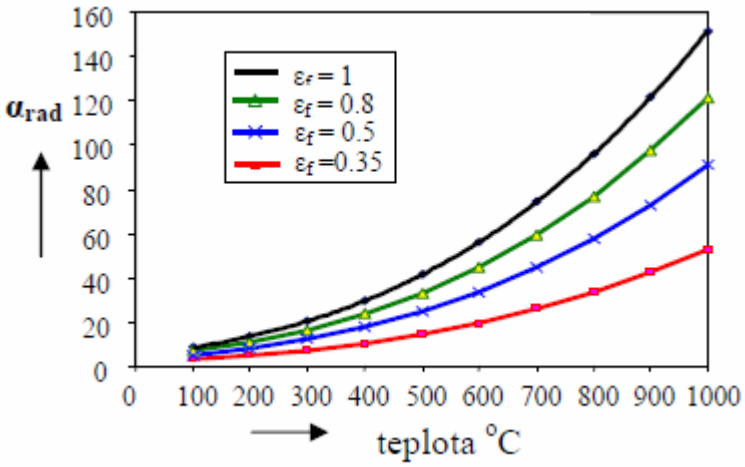
Součinitel přestupu tepla radiací je při teplotách odlévání mnohem větší než součinitel konvektivní, se vzrůstající teplotou výrazně roste a je závislý na emisivitě formy, vztah (3.7), obr. 3.4 [4].

Součinitel přestupu radiací [5]:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_f^2 + T_{ok}^2\right) \cdot \left(T_f + T_{ok}\right) \qquad (3.7)$$

kde ε – emisivita
T_f – teplota formy
T_{ok} – teplota okolí

V termodynamických tabulkách se hodnota emisivity ε pro materiály typu šamotu, křemene apod. pohybuje v rozmezí hodnot 0,6–0,9. Pro zpřesnění těchto hodnot bylo v dřívějších pracích provedeno měření za pomoci termokamery a termočlánků. Porovnáním naměřených hodnot byla určena hodnota emisivity molochitové formy v rozmezí 0,7–0,9 [4].



Obr. 3.4 Závislost součinitele radiačního přestupu tepla α_{rad} na teplotě a emisivitě formy [5]

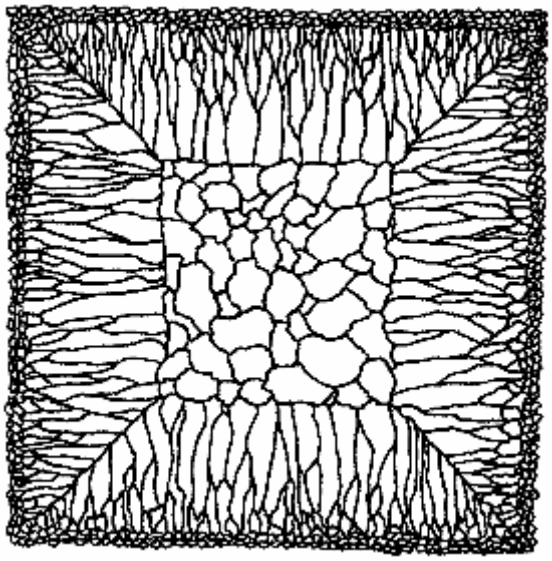
Tuto tepelnou situaci lze řešit pro reálné konfigurace skořepin pouze numerickou simulací. Pro výpočet je nutno s dostatečnou přesností analyzovat okrajové podmínky a vliv geometrického uspořádání celé soustavy [5].

4 KRYSTALIZACE A TUHNUTÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Struktura odlitků, která vzniká při primární krystalizaci, závisí na několika faktorech. Je dána druhem kovu a jeho metalurgickým zpracováním, rychlostí odvodu tepla přes formu a také geometrickou konfigurací (konstrukcí) odlitku [11].

V makroskopické struktuře příčného řezu lze ve většině případů pozorovat tři oddělené oblasti, obr. 4.1 [1]:

1. Oblast přiléhající ke stěně formy – tvořena jemnými rovnoosými zrny s náhodnou orientací
2. Oblast kolumnárních zrn – orientovaných rovnoběžně s odvodem tepla stěnou formy
3. Středová oblast – poměrně velká rovnoosá zrna



Obr. 4.1 Makrostruktura příčného řezu odlitkem [1]

Oblast jemných rovnoosých zrn [1]:

Tato zrna nukleují na stěně formy nebo v její těsné blízkosti. Jde o heterogenní nukleaci, vyvolanou tepelným přechlazením taveniny přiléhající ke stěně formy. Rozsah nukleace je určen tepelnými podmínkami u stěny formy, účinností stěny formy jako podložky pro heterogenní nukleace a přítomností účinných zárodků v přechlazené vrstvě taveniny.

Oblast kolumnárních zrn [1]:

Kolumnární zrna se vyvíjí převážně ze zárodků, vzniklých v první oblasti, která přiléhá ke stěně formy. Vykazují při tom silnou přednostní krystalografickou orientaci, která odpovídá přednostní krystalografické orientaci dendritického růstu. Jen malá část kolumnárních zrn nemá svůj původ v první oblasti. Charakter fázového rozhraní v této oblasti může projít všemi stupni vývoje od rovinného přes buněčný k dendritickému. Osy kolumnárních zrn jsou většinou rovnoběžné se směrem maximálního tepelného toku. Přitom se uplatňuje konkurenční růst zrn, rostoucích z první, přechlazené oblasti a to tak, že zrna, u nichž je přednostní směr růstu (směr hlavní osy dendritu) rovnoběžný s maximálním teplotním gradientem rostou rychleji, než jejich méně příznivě orientovaní sousedé. Tato výhodně orientovaná zrna se rozšiřují a postupně vytlačují méně výhodně orientovaná zrna, takže střední hodnota odchylky orientace se s rostoucí vzdáleností od stěny formy zmenšuje, zatímco střední velikost zrna se zvětšuje.

Středová oblast rovnoosých zrn [1]:

V této oblasti mají rovnoosá zrna nahodilou orientaci a jsou větší něž zrna v oblasti přiléhající ke stěně formy.

Cílem řízené krystalizace kovů je získání pouze jedné oblasti zrn v celém odlitku. Podle požadovaných vlastností může být řízena krystalizace odlitku tak, že se získá struktura tvořená pouze kolumnárními zrny nebo rovnoosými zrny. Z hlediska řízení krystalizace je tedy velice důležité znát příčiny přechodu od krystalizace kolumnárních zrn ke krystalizaci rovnoosých zrn [1].

Je-li cílem řízení krystalizace získání odlitku s izotropními vlastnostmi, je nutné získat jemnozrnnou strukturu. Toho je možné dosáhnout podpořením podmínek pro omezení kolumnárních zrn a vytvoření rovnoosých zrn. Jsou-li ale požadovány anizotropní vlastnosti (magenty, lopatky spalovacích turbín), je zapotřebí podpořit podmínky pro růst kolumnárních zrn [1].

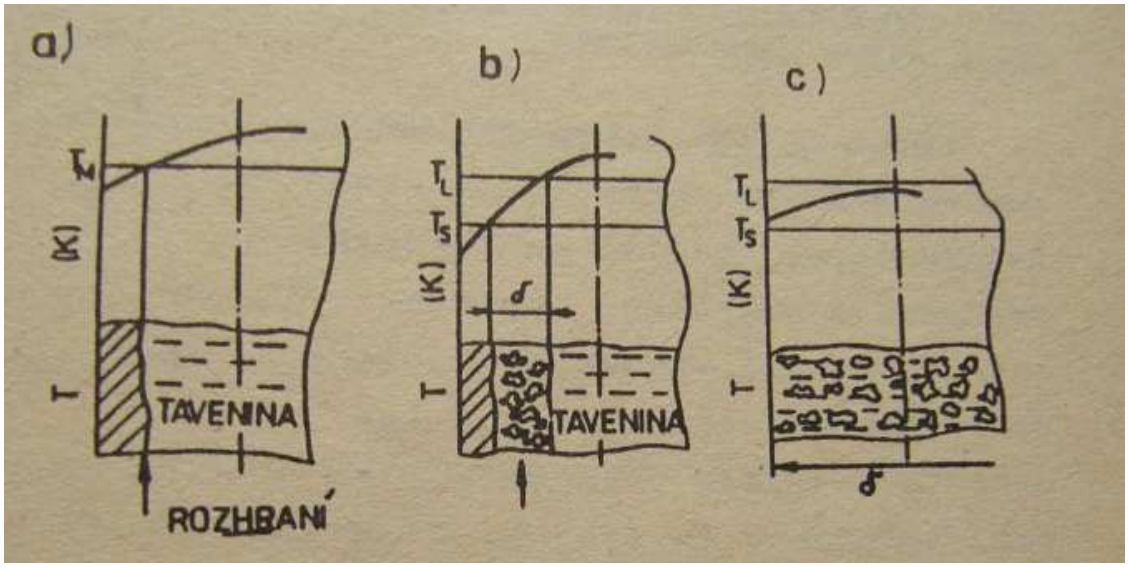
4.1 Teplotní interval

Čisté kovy, eutektické slitiny a slitiny typu chemických sloučenin tuhnou při konstantní teplotě. Slitiny typu tuhých roztoků tuhnou v určitém teplotním intervalu [11].

Tento interval můžeme rozdělit z hlediska šířky nebo jeho rozsahu na [11]:

- slitiny s úzkým intervalem tuhnutí (mosaz, hliníkové bronzy, siluminy s obsahem křemíku 9–13%).
- slitiny se širokým intervalem tuhnutí (cínové, olověné bronzy, siluminy s obsahem křemíku 7–9% a 13–20%)

Při exogenním tuhnutí je souvislá krystalizační fronta od mateřské taveniny oddělena rozhraním rovinným, obr. 4.2a [11].



Obr. 4.2 Schéma průběhu tuhnutí [12]
a) při souvislém krystalizačním rozhraní (rovinné rozhraní)
b) dvoufázové tuhnutí
c) objemové tuhnutí
T_M – teplota tání kovu
T_L – teplota tekuté fáze
T_S – teplota tuhé fáze
δ – tloušťka dvoufázového (kašovitého) pásma

Ve všech ostatních případech se mezi krystalizační frontou a volnou taveninou nachází oblast dvoufázového pásma. Šířka tohoto pásma závisí na intervalu tuhnutí slitiny a intenzitě odvodu krystalizačního tepla z odlitku. Dvoufázové pásmo je tím širší, čím je větší interval $T_L - T_S$ (rozdíl teplot tekuté a tuhé fáze) a nižší intenzita odvodu tepla [11].

Úzké pásmo $T_L - T_S$ se označuje jako dvoufázové tuhnutí, obr. 4.2b, při kterém je kašovité pásmo poměrně úzké a je vymezené ze strany taveniny izolikvidem a ze strany souvislé tuhé fáze izosolidem [11].

Slitiny s velmi širokým intervalem tuhnou objemově. Při tuhnutí má kašovité pásmo značnou šířku, nebo toto pásmo prolíná celý průřez stěny (u malé intenzity chladnutí s malou tloušťkou stěny odlitku), obr. 7.2c [11].

4.2 Segregace prvků

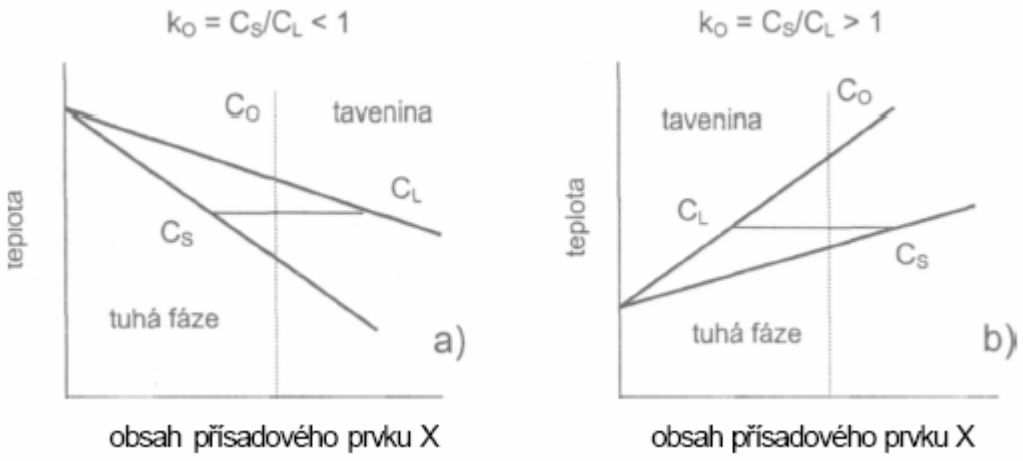
4.2.1 Rozdělovací koeficient

Rozložení prvků ve slitině v průběhu tuhnutí určuje rovnovážný diagram. Poměr koncentrací přísadového prvku v tuhé fázi a ve zbývající tekuté fázi určuje, tzv. rozdělovací koeficient k_o, který je definován jako podíl koncentrací přísadového prvku v tuhé fázi C_S a tekuté fázi C_L, vztah (4.1) [12].

Výpočet rozdělovacího koeficientu [12]:

$$k_o = \frac{C_S}{C_L} \tag{4.1}$$

Jestliže, se teploty tuhnutí s rostoucím obsahem přísadového prvku snižují, je $C_S < C_L$ a $k_o < 1$, obr. 4.3a, když se teplota tuhnutí zvyšuje, je $C_S > C_L$ a $k_o > 1$, obr. 4.3b [12].



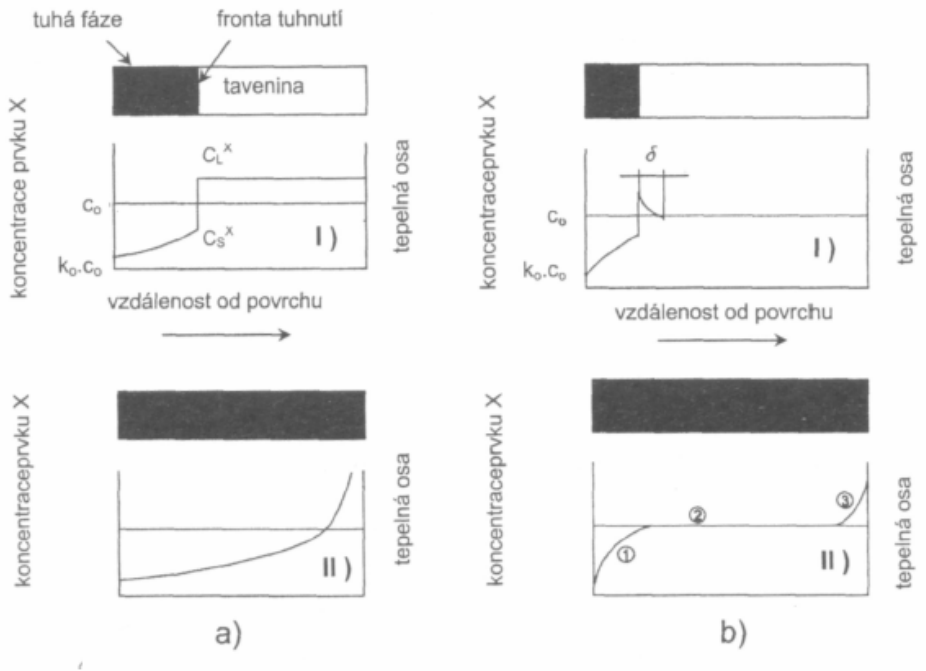
Obr. 4.3 Stanovení hodnoty rozdělovacího koeficientu [12]
a) teploty tuhnutí se s rostoucím obsahem přísadového prvku snižují
b) teploty tuhnutí se s rostoucím obsahem přísadového prvku zvyšují

V praxi to znamená, že se přísadový prvek během tuhnutí koncentruje ve zbývající tekuté fázi, v níž mohou potom vznikat strukturní složky, odpovídající mnohem vyššímu obsahu přísadového prvku. Čím menší je hodnota rozdělovacího koeficientu, tím k větší segregaci dochází [12].

4.2.2 Mechanismy distribuce prvků během tuhnutí

Rozdělovací koeficient uvedený výše, předpokládá rovnovážný stav průběhu tuhnutí s dokonalou difúzí přísadového prvku „X“ v tekutém i tuhém stavu. Tento model ovšem v praxi většinou neplatí, protože v reálných podmínkách difúze v tuhé fázi jen velmi omezená rychlostí a také tavenina není chemicky homogenní [12].

Rychlost difúze v tuhém stavu závisí na mechanismu difúze a na teplotě. V tekutém stavu probíhá difúze 10x až 100x rychleji, než v tuhém stavu [12].

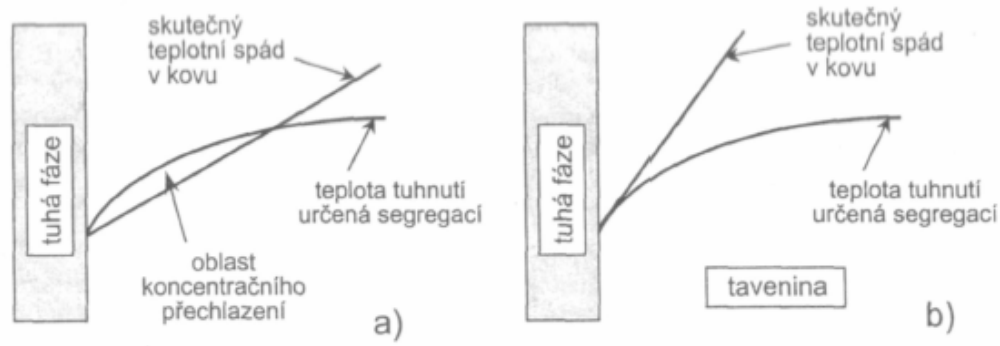


Obr. 4.4 Rozložení přísadového prvku X v tekutém stavu a v tuhé fázi [12]
a) nedochází k difúzi v tuhé fázi – dokonalá difúze v tavenině
b) nedochází k difúzi v tuhé fázi – omezená difúze v tavenině
I) situace během tuhnutí
II) situace po ztuhnutí

4.2.3 Koncentrační přechlazení

V praxi je tuhnutí odlitku neizotermický proces, tzn. že v průběhu tuhnutí se neustále mění stupeň přechlazení taveniny před rozhraním. Se stupněm přechlazení se zároveň mění schopnost taveniny vytvářet zárodky a také morfologie fázového rozhraní. Díky tomu převážná většina slévárenských slitin neželezných kovů z počátku (v okrajové oblasti odlitku) tuhnou exogenně a postupně přechází na endogenní tuhnutí [12].

Důsledkem obohacení taveniny přísadovým prvkem X v difúzní vrstvě je snížení teploty kovu před krystalizační frontou (podle příslušného rovnovážného diagramu) – podle křivky na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Vznik koncentračního přechlazení [11]
a) malý teplotní gradient
b) velký teplotní gradient

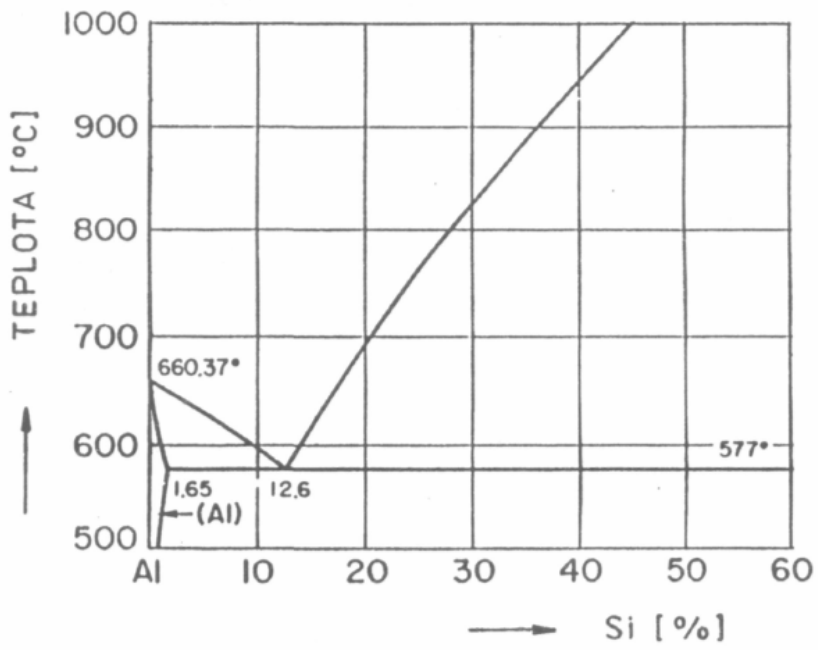
Při malém teplotním gradientu (tj. při málo intenzivním ochlazování), obr. 4.5a, jsou skutečné teploty kovu před krystalizační frontou nižší, než rovnovážné krystalizační teploty, odpovídající místní koncentraci prvku X. Rozdíl mezi skutečnou teplotou kovu a teplotou, která odpovídá místnímu chemickému složení se nazývá koncentrační (konstituční) přechlazení [12].

Při velkém teplotním gradientu (tj. při intenzivním ochlazování), obr. 4.5b, neprotíná čára skutečných teplot čáru rovnovážných teplot – koncentrační přechlazení nevzniká [12].

Z teorie vyplývá, že čím menší je teplotní gradient v tavenině před frontou tuhnutí, viz. obr. 4.2b, tím větší je tendence k dendritickému tuhnutí, protože vzniká větší koncentrační přechlazení. Při rychlém ochlazování je koncentrační přechlazení malá, popřípadě k němu vůbec nedochází, obr. 4.2a [12].

4.3 Struktura slitin hliníku

Slitiny Al–Si běžně se běžně nazývají siluminy. Křemík má v těchto slitinách velmi malou rozpustnost (pouze 1,65 %) a při poklesu teploty se dále snižuje. Ve slévárenských slitinách je vždy obsah křemíku vyšší než je jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku α(Al), proto vždy obsahují eutektikum α(Al)–Si. Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 %Si a eutektická teplota je 577 °C. Rovnovážný diagram Al–Si je uveden na obr. 4.6 [12].



Obr. 4.6 Rovnovážný diagram Al–Si [12]

Slitina vybraná k odlévání experimentálních vzorků je AlSi7Mg. Nachází se v podeutektické oblasti. Zde je struktura tvořena sítí primárních dendritů fáze α(Al) a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem křemíku se zvyšuje obsah eutektika [12].

4.3.1 Morfologie eutektika ve slitinách Al–Si

Křemík se prakticky ve slitinách Al–Si vylučuje jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Velikost částic eutektického křemíku může být v rozmezí od méně než 1 μm až po více než 2 μm. V eutektiku se může vylučovat ve třech různých podobách [12].

Druh eutektika souvisí s mechanismem krystalizace eutektického křemíku. Kde jako krystalizační zárodky křemíku slouží částice fosforu hlinitého AlP. Fosfor se do taveniny dostává jako nečistota zejména ze vsázkových surovin, vyzdívkových materiálů, popřípadě ze šrotu z nadeutektických slitin (fosforu se využívá pro jejich očkování) [12].

Podle tvaru částic křemíku se i typ eutektika nazývá [12]:

– zrnité
– lamelární
– modifikované

Zrnité eutektikum [12]:

Vzniká při obsahu nad asi 5–10 ppm P tvorbou krystalizačních zárodků AlP. Eutektický křemík se vylučuje ve tvaru polyedrických zrn nebo hrubých lamel.

Lamelární eutektikum [12]:

Je typem eutektika, které vzniká v čistých slitinách a velmi nízkým obsahem sodíku a obsahem fosforu (pouze asi 1–2 ppm). K růstu částic Si dochází podobným mechanismem jako u eutektika zrnitého. Protože podmínky pro nukleaci lamelárního křemíku jsou méně příznivé (menší obsah fosforu dává menší počet zárodků), krystalizuje lamelární eutektikum při větším přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou (asi 2–5 K). Křemík tvoří jemné lamely, uspořádané vedle sebe víceméně paralelně. Eutektická zrna jsou podstatně menší než u zrnitého eutektika.

Modifikované eutektikum [12]:

Vzniká za přítomnosti modifikačních prvků. Skládá se z modifikované vláknité struktury. Tato struktura ovšem nemusí vzniknout pouze vlivem chemických modifikátorů, může vzniknout i při velmi rychlém tuhnutí s rychlostí potupu krystalizační fronty 400–1000 μm/s. Díky tomu procesu se zjemní struktura [12].

4.3.2 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al-Si

Byly vybrány pouze prvky, které se nachází ve struktuře experimentálních vzorků.

Hořčík [12]:

Hořčík je ve slitinách Al-Si velmi důležitým prvkem, který umožňuje provádět vytvrzování za tepla. Přidává se v množství 0,3–07 %. V litém stavu tvoří hořčík intermetalickou fázi Mg_2Si, která tvoří eutektikum Al–Si–Mg_2Si s teplotou tuhnutí asi 555 °C. Toto eutektikum tvoří ve struktuře drobné kostrovité útvary. Vzhledem k tomu, že za vysokých teplot je rozpustnost Mg v Al značně vysoká, při homogenizačním žíhání se částice Mg_2Si v matrici zcela rozpouští.

Železo [12]:

Železo je prvkem, který se obvykle považuje za nečistotu. Jeho vliv s espojuje zejména s nepříznivým účinkem na mechanické vlastnosti. V tuhém hliníku nemá železo téměř žádnou rozpustnost (má velmi nízký rozdělovací koeficient) a proto již při malém obsahu tvoří různé intermetalické sloučeniny. Nejdůležitějšími jsou

jehlicová fáze Al_5FeSi, označovaná jako fáze β–AlFeSi a tavrově více kompaktní fáze $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$, označovaná jako α–AlFeMnSi a podle tvaru jako „čínské písmo“ nebo také „rybí kost“ [12].

Fáze β–AlFeSi vzniká v rozmezí intervalu tuhnutí při teplotě kolem 580 °C, tj. před vyloučením lamel křemíku. Má monokrystalickou mřížku a tvoří hrubé deskovité útvary (na výbrusu viditelné jako jehlice), které porušují strukturu siluminu a výrazně zhoršují jeho vlastnosti [12].

Fáze α–AlFeMnSi má hexagonální mřížku a vzniká zejména za přítomnosti manganu, který částečně nahrazuje atomy železa, při teplotě přibližně kolem 590 °C [12] .

Tvrdé fáze (kalové fáze, sludge) [12]:

Tzv. „kal“ je intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě. Je to polyedrická fáze, chemicky v podstatě fáze α–AlFeMnSi, která vzniká peritektickou přeměnou. Teplota vzniku „kalové“ fáze závisí na komplexním vlivu Fe, Mn a Cr, který se vyjadřuje tzv. koeficientem segregace, vztah (4.2).

Koeficient segregace [12]:

$$f_S = \%Fe + 2 \cdot \%Mn + 3 \cdot Cr \qquad (4.1)$$

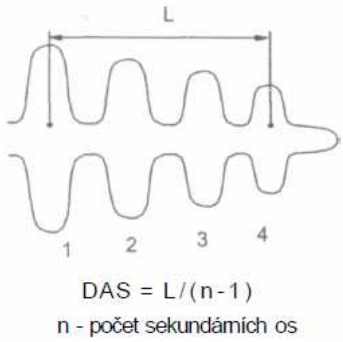
4.3.3 Metodika měření DAS

Jak již bylo zmíněno jednou ze složek struktury podeutektických siluminů je síť primárních dendritů fáze α(Al).

Nejdůležitějším kritériem pro popis dendritické struktury je vzdálenost sekundárních os dendritů, tzv. DAS (dendrite arm spacing) [12].

Primární osy dendritů rostou vždy ve směru teplotního gradientu (proti směru odvodu tepla). Větvení dendritů je pravidelné a dochází k němu ve směru konkrétních krystalizačních směrů. Hustota sekundárních a vyšších větví dendritů je závislá na době tuhnutí v daném místě a na složení slitiny [12].

Hodnoty DAS lze zjistit u metalografického výbrusu na vhodném dendritu, kde se změří vzdálenost přes několik sekundárních větví a vydělí se počtem mezer, obr. 7.2 [12].



Obr. 7.2 Metodika měření DAS

S velikostí DAS souvisí i řada dalších strukturních jevů. Čím jemnější je struktura (tzn. menší hodnota DAS), tím menší jsou segregační vzdálenosti. Při menším rozsahu segregací proto vznikají menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty se vylučují jako oddělené částice v mezidendritických prostorech a netvoří síťoví [12].

Hodnota DAS závisí pouze na rychlosti chladnutí v intervalu tuhnutí – čím kratší doba tuhnutí, tím menší DAS [12].

5 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK

5.1 Experimentální skořepiny

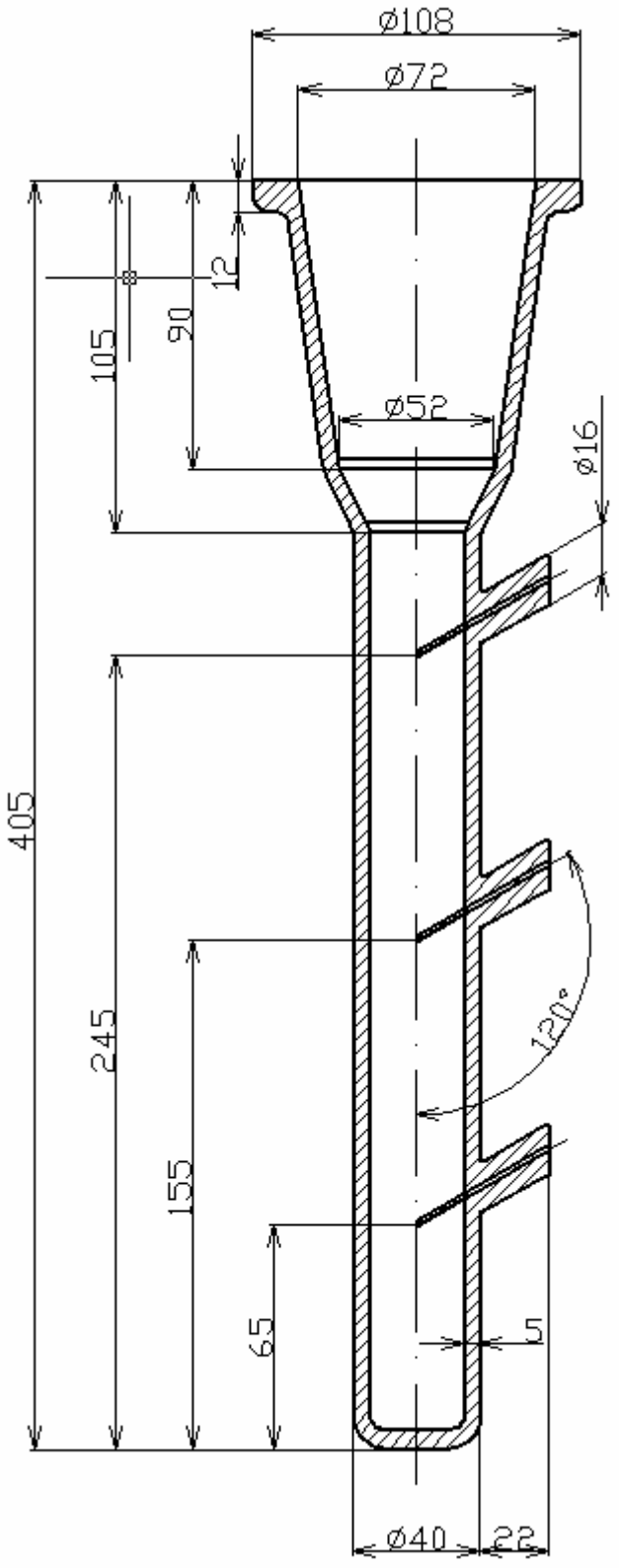
Podle výrobního postupu v kapitole 3.1 bylo vyrobeno sedm skořepin z molochitu. Molochit se skládá z mulitu (56%) ve sklovité obálce amorfního oxidu křemičitého (44%) [3].

Při výrobě bylo použito pět vrstev obalů, tj. tloušťka 5 mm. Celková hmotnost jedné skořepiny byla přibližně 0,5 kg.

Pro zjednodušení výchozího tvaru zkušebního vzorku byly skořepiny vyrobeny pomocí jednoduchého modelu, který se skládá ze tří částí. První část tvoří vtok s funkcí nálitku, pro následné dosazování kovu, tvaru rotačního komolého kužele s rozměry horního průměru vtoku Ø72 mm, spodního průměru vtoku Ø52 mm a výškou 90 mm. Druhou částí je krček mezi vtokem a samotným zkušebním tělesa, který má také tvar rotačního komolého kužele s rozměry horního průměru vtoku Ø52 mm, spodního průměru vtoku Ø30 mm a výškou 15 mm. Třetí částí je zkušební těleso ve tvaru tyče s kruhovým průřezem a s rozměry Ø30–300 mm.

Pro možnost měření teplot termočlánky bylo nutné umístit do voskového modelu tři křemenné trubičky se zatavenými konci. Trubičky se umisťovaly ve výšce 65 mm, 155 mm a 245 mm od spodní hrany modelu a byly umístěny od středu modelu pod úhlem 30°.

Obr. 5.1 Zkušební skořepina

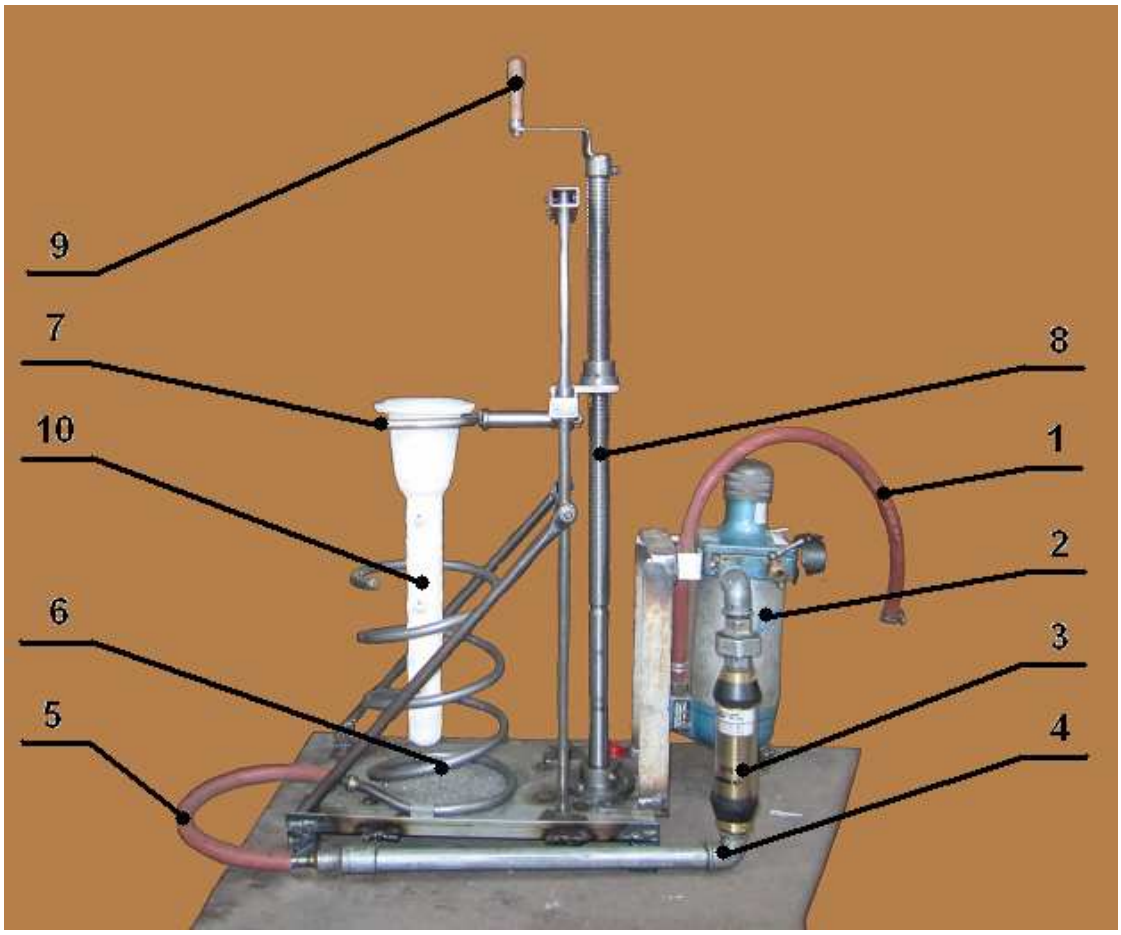


Pozn.: Nekótované poloměry R6
Vnější průměr křemenné trubičky Ø5,2 mm
Vnitřní průměr křemenné trubičky Ø3,6 mm

Obr. 5.2 Schéma zkušební skořepiny

5.2 Zařízení pro chlazení skořepinových forem

Pro ochlazování a možnost řízení krystalizace slitin odlévaných do vyrobených skořepinových forem, bylo navrhnuto a sestaveno chladící zařízení, obr. 5.3.



Obr. 5.3 Chladící zařízení

Pozn. k obr. 5.3:

č.1 – pryžová hadice

č.2 – regulátor tlaku

č.3 – průtokoměr

č.4 – kovová spojovací trubka

č.5 – pryžová hadice

č.6 – kovová trubka s otvory pro foukání vzduchu stočená do šroubovice

č.7 – držák na skořepinu

č.8 – tyč se závity

č.9 – klika pro spouštění

č.10 – skořepina

Chladící zařízení je napojeno na přívod vzduchu přes pryžovou hadici č.1, kterou prochází vzduch do regulátoru tlaku č.2, na kterém je nastaven požadovaný tlak. Z regulátoru tlaku projde vzduch do průtokoměru č.3, na kterém se odečte průtok vzduchu v jednotkách psi. Průtokoměr je napojen na kovovou trubku č.4, která má na svém druhém konci připojenou další pryžovou hadici č.5, která vede na kovovou trubku č.6 s otvory Ø1,2 mm, stočenou ve tvaru šroubovice.

Skořepina č.10 je připevněna v držáku č.7. Držák je upevněn na tyč kruhového průřezu s metrickým závitem č.8. Tato tyč je zakončena klikou pro spouštění č.9.

Po odlití kovu do skořepinové formy je skořepina spouštěna pomalým otáčením kliky, v závislosti na čase, do proudu vzduchu, který uniká otvory ve šroubovici. Dochází tak k ochlazování slitiny ode dna skořepiny směrem nahoru. A tím se dosáhne řízeného ochlazování roztavené slitiny.

1 – Pryžová hadice

- označení EN 559 – 2 MPa (20BAR) – 10 mm – (-30 °C) – 2006

2 – Regulátor tlaku

- nastavitelné rozmezí tlaku 0–10.10^5 Pa

3 – Průtokoměr

- Omega – AIR – SCFM
- standardní kalibrace Ø100 psi, 70 F, max. 600 psi
- nastavitelné rozmezí průtoku 4–22 psi, tj. přibližně $0,3.10^5$–$1,5.10^5$ Pa

5 – Pryžová hadice

- označení EN 559 – 2 MPa (20BAR) – 10 mm – (-30 °C) – 2006

6 – Kovová trubka s otvory pro foukání vzduchu stočená do šroubovice

- průměr kovové trubky Ø12 mm
- celková délka trubky 2400 mm
- výška šroubovice 290 mm
- vnější průměr šroubovice Ø170 mm
- vnitřní průměr šroubovice Ø146 mm
- 4 závity
- 19 dírek pro foukání vzduchu
- průměr dírky Ø1,2 mm
- vzdálenost jednotlivých dírek od sebe 100 mm

7 – Držák na skořepinu

- ohnutá trubka do tvaru podkovy průměru Ø12,5 mm
- celková délka trubky 350 mm
- vnitřní průměr držáku Ø85 mm
- vnější průměr držáku Ø110 mm

8 – Tyč se závity

- celková délka tyče 73,5 cm
- metrický závit
- 97 závitů
- rozteč závitů 5 mm
- stoupání 2 mm

Jednotka tlaku psi je definovaná jako libra síly na čtverečný palec, tj. tlak odpovídající gravitační síle působící prostřednictvím tělesa o hmotnosti jedné libry na plochu jednoho čtverečného palce [10].

Převod jednotek [10]:

$$1\text{psi} \approx 6894{,}757\text{Pa} \tag{5.1}$$

5.3 Zařízení pro měření teploty

U každé skořepiny se provedlo měření teploty taveniny při ochlazování skořepiny a to buď při samovolném chladnutí a nebo s pomocí chladícího zařízení, viz. obr. 5.3. Teplota taveniny při ochlazování se měřila v tepelné ose zkušebního vzorku pomocí třech termočlánků typu „K“ (termočlánek CrNi-Cr) s průměrem Ø0,8 mm a délkou 1040 mm, které byly umístěny ve skořepině ve výšce 75 mm, 165 mm a 255 mm ode dna skořepiny. Proti mechanickému působení taveniny byly chráněny křemennými trubičkami s vnějším průměrem Ø5,2 mm a vnitřním průměrem Ø3,6 mm. Termočlánky byly napojeny na kompenzační vedení s označením „K“, kterými prochází termoelektrické napětí do A/D převodníku a toto napětí je dále přenášeno v digitalizované formě do počítače.

5.4 Tavení a odlévání slitiny do experimentálních skořepin

Pro natavení slitiny byla použita elektrická pec. Před samotným odléváním byla změřena licí teplota kovu a stažena struska. Odlévání se provádělo postupně do sedmi skořepin, které měly různé počáteční podmínky (studená skořepina nebo teplá skořepina) a také byly nastaveny odlišné intenzity ochlazování skořepin.

Tab.5.1 Hodnoty nastavených počátečních podmínek jednotlivých vzorků

	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3	Vzorek č.4	Vzorek č.5	Vzorek č.6	Vzorek č.7
Licí teplota slitiny	707 °C	710 °C	700 °C	710 °C	707 °C	703 °C	705 °C
Teplota skořepiny	20 °C	20 °C	430 °C	230 °C	290 °C	430 °C	430 °C
Způsob ochlazování	Samovolně	Proudem vzduchu	Samovolně	Proudem vzduchu	Proudem vzduchu	Proudem vzduchu	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	---	$1{,}3.10^5$ Pa	---	$1{,}3.10^5$ Pa	$1{,}3.10^5$ Pa	$1{,}3.10^5$ Pa	3.10^5 Pa
Průtokoměr	---	22 psi	---	22 psi	22 psi	22 psi	Malá kapacita
Doba spouštění skořepiny	---	1 min 25 *s*	---	1 min	2 min 55 *s*	4 min 25 *s*	3 min 15 *s*
Rychlost spouštění skořepiny	---	0,003 m/*s*	---	0,005 m/*s*	0,002 m/*s*	0,001 m/*s*	0,0015 m/*s*

Pozn.: 22 psi = $1{,}5.10^5$ Pa

Studené skořepiny měly teplotu okolního vzduchu. Po připevnění skořepiny do držáku chladícího zařízení, byly do předem připravených otvorů umístěny termočlánky. Poté byl z pece vytažen kelímek s natavenou slitinou, byla změřena licí teplota kovu a stažena struska. Přešlo se k samotnému odlévání a následnému chlazení skořepiny.

Teplé skořepiny byly ohřívány v žíhací peci na teplotu 600 °C. Pro dosažení potřebných teplot při měření, byly z pece vytaženy a umístěny do držáku chladícího zařízení. Do předem připravených otvorů se umístily termočlánky a začala se měřit teplota. Během této doby se z pece vytáhl kelímek s natavenou slitinou, opět byla změřena licí teplota kovu a stažena struska. Při dosažení požadované teploty skořepiny se provedlo odlévání a přešlo se k jejímu chlazení.

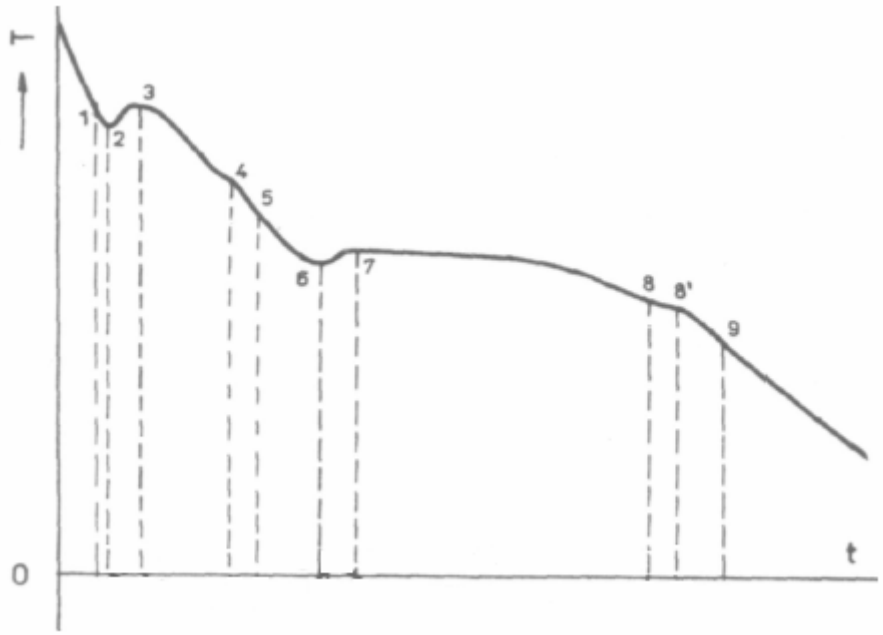
Licí teploty kovu byly u všech natavených slitin kolem 705°C. Teploty skořepiny byly navoleny tak, aby bylo možné vzájemné porovnání naměřených teplot jednotlivých vzorků.

Pro odlévání, byla vybrána slitina AlSi7Mg. Tato slitiny má označení podle normy ČSN 42 4332, obsahuje 7 % křemíku a 1 % hořčíku. Díky obsaženému hořčíku umožňuje vytvrzování za tepla. Hořčík při běžné rychlosti ochlazování ve slitině vytváří fázi Mg_2Si. V litém stavu má tato slitina průměrné vlastnosti. Teprve při vytvrzování dosáhne vysokých mechanických vlastností, ale mírně se sníží její tažnost [12].

5.5 Křivky chladnutí

Za pomoci termočlánků se naměřily teplotní změny při ochlazování a z těchto hodnot se sestavily jednotlivé průběhy křivek chladnutí. Tvar křivek je závislý na intenzitě odvodu tepla ze vzorku kovu do skořepiny, ze skořepiny do okolí a také na průběhu uvolňování skupenského tepla při krystalizaci v různých fázích tuhnutí.

Byl určen inflexní bod konce tuhnutí, pro všechny křivky, přibližně 541 °C, který je vyobrazen na každém obrázku vzorku. Určení inflexního bodu tuhnutí bylo provedeno za pomoci teoretické křivky ochlazování (závislost teplota–čas pro obecnou slitinu typu Al–Si–X), která je na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Křivka ochlazování [12]

1 – teplota nuklease primární fáze T_{NL}
2 – teplota přechlazení na likvidu T_{PL}
3 – teplota likvidu T_L
4 – teplota tuhnutí primární intermetalické fáze
5 – teplota nuklease eutektika T_{NE}
6 – teplota přechlazení na eutektické teplotě T_{PE}
7 – teplota tuhnutí eutektika T_E
8 – teplota tuhnutí vícesložkového eutektika (intermetalické fáze)
9 – konec tuhnutí – teplota solidu T_S

Každá z etap krystalizace je zahájena nukleací příslušné fáze. Teplota nukleace bývá na křivce chladnutí nezřetelná (často jen inflexní bod). Tuhnutí slitiny tedy začíná nukleací primární fáze v bodě 1, eutektické fáze v bodě 5 a končí na teplotě solidu v bodě 9 [12].

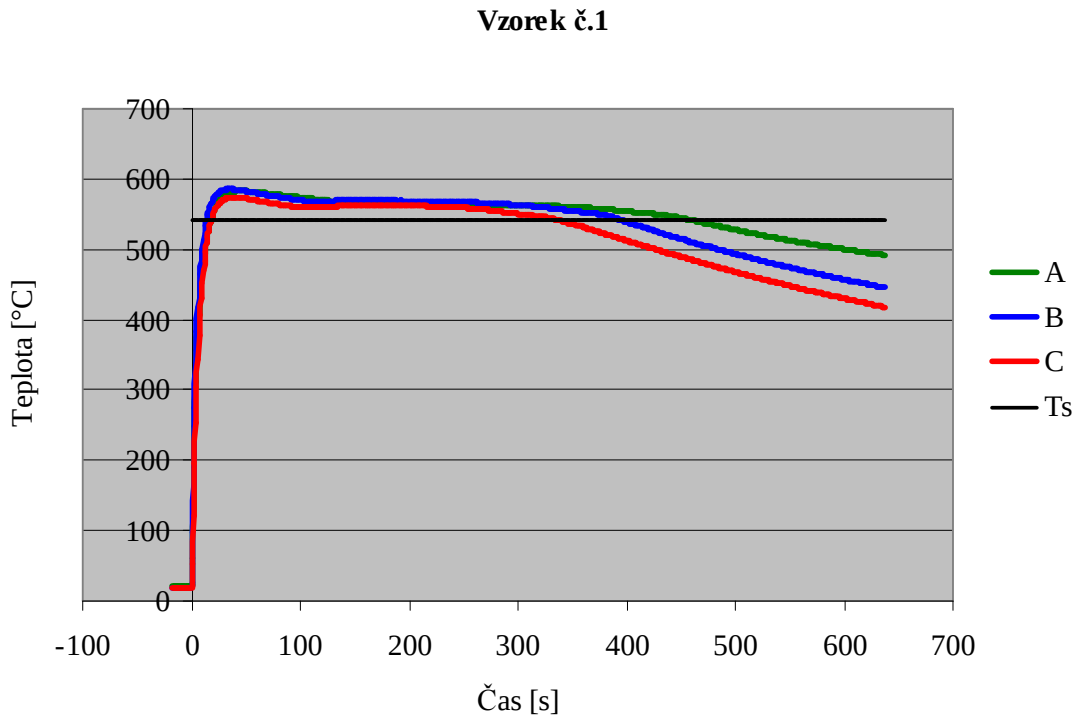
Pro zjednodušení popisu grafů byly označeny jednotlivé křivky následovně:

- A – teplota změřená termočlánkem v horní části skořepiny ve výšce 75 mm ode dna skořepiny
- B – teplota měřená termočlánkem ve střední části skořepiny ve výšce 165 mm ode dna skořepiny
- C – teplota měřená termočlánkem ve spodní části skořepiny ve výšce 255 mm ode dna skořepiny
- T_S – teplota solidu – křivka určující inflexní bod konce tuhnutí (teplota 541 °C) jednotlivých částí vzorku

5.5.1 Vzorek číslo 1

Tab.5.2 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.1

Licí teplota slitiny	707 °C
Teplota skořepiny	Studená skořepina cca 20 °C
Způsob ochlazování	Samovolně
Regulátor tlaku	---
Průtokoměr	---
Doba spouštění	---
Rychlost spouštění	---



Obr.5.5 Křivky chladnutí u vzorku č.1

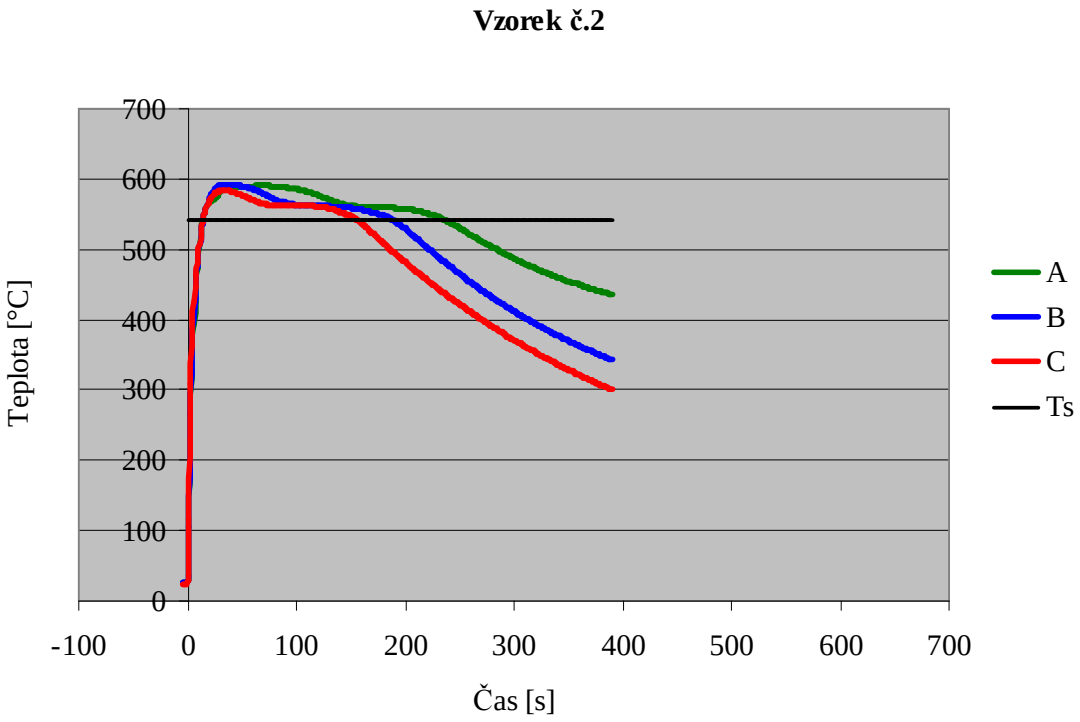
Tab.5.3 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.1

T_S na křivce A	481 s
T_S na křivce B	416 s
T_S na křivce C	359 s

5.5.2 Vzorek číslo 2

Tab.5.4 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.2

Licí teplota slitiny	710 °C
Teplota skořepiny	Studená skořepina cca 20 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	1 min 25 s
Rychlost spouštění	0,003 m/s



Obr. 5.6 Křivky chladnutí u vzorku č.2

Tab.5.5 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.2

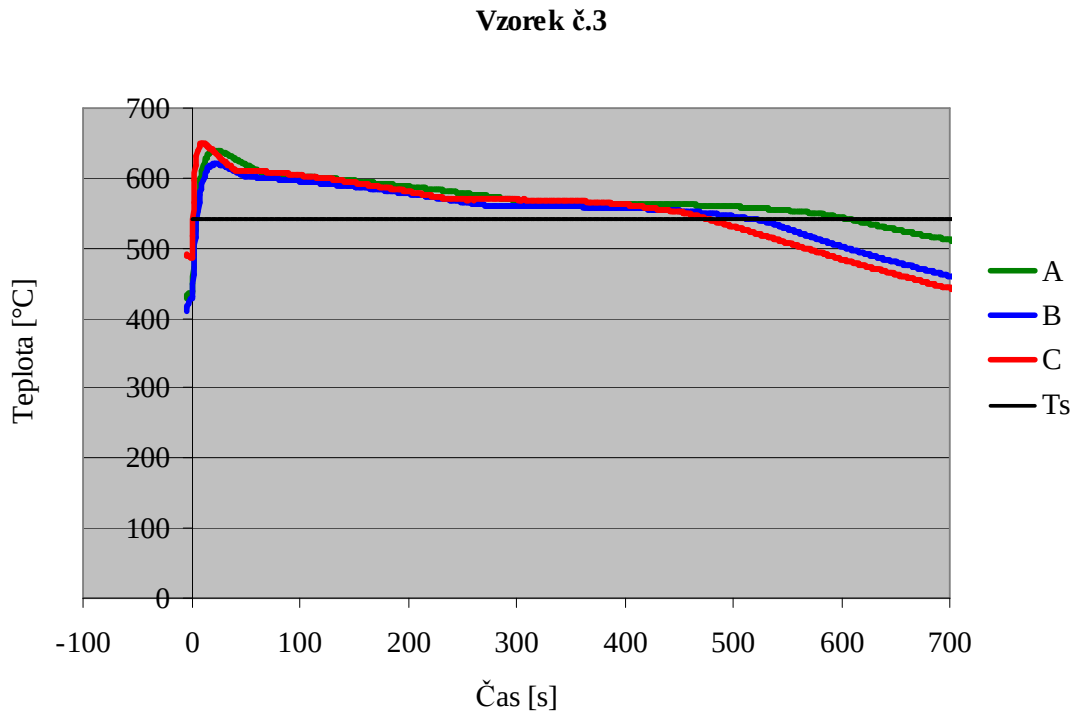
T_S na křivce A	244 s
T_S na křivce B	196 s
T_S na křivce C	163 s

Pozn.: Při odlévání praskla skořepina a část kovu vytekla.

5.5.3 Vzorek číslo 3

Tab.5.6 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.3

Licí teplota slitiny	700 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Samovolně
Regulátor tlaku	---
Průtokoměr	---
Doba spouštění	---
Rychlost spouštění	---



Obr. 5.7 Křivky chladnutí u vzorku č.3

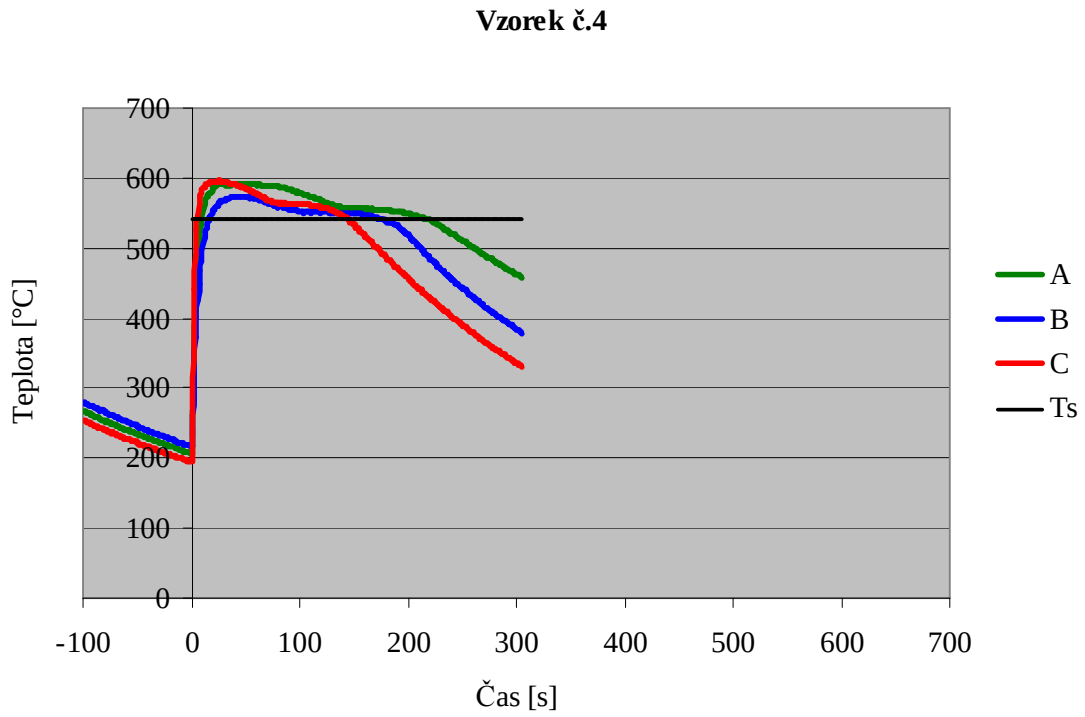
Tab.5.7 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.3

T_S na křivce A	615 s
T_S na křivce B	528 s
T_S na křivce C	485 s

5.5.4 Vzorek číslo 4

Tab.5.8 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.4

Licí teplota slitiny	710 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 230 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	1 min
Rychlost spouštění	0,005 m/s



Obr. 5.8 Křivky chladnutí u vzorku č.4

Tab.5.9 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.4

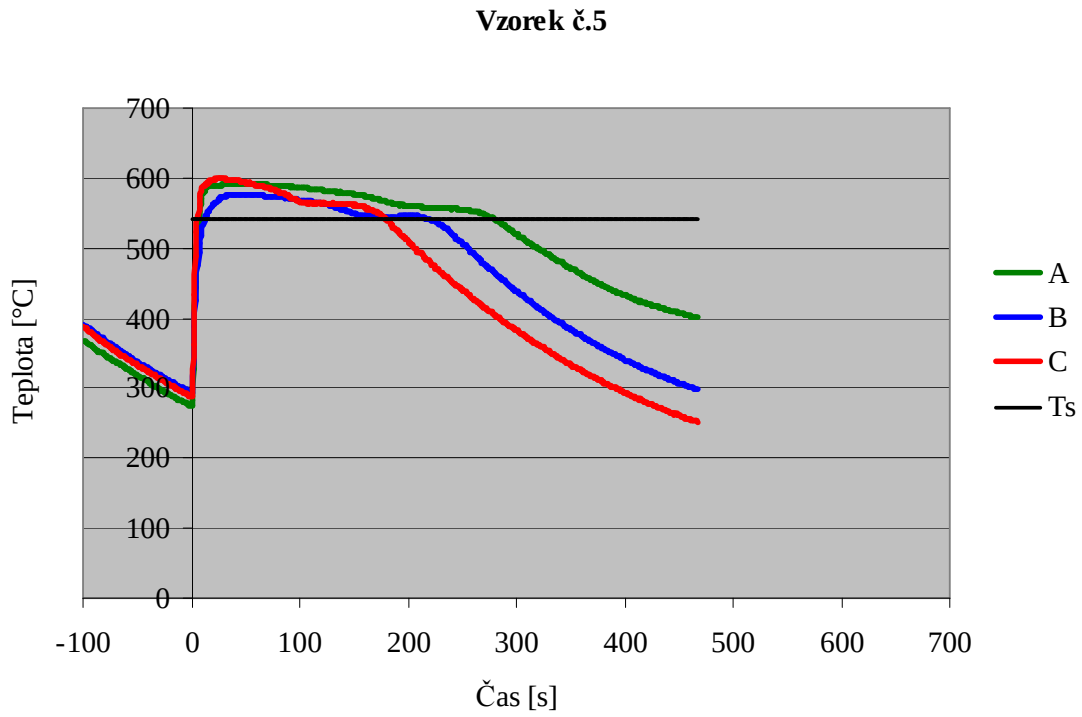
T_S na křivce A	218 s
T_S na křivce B	174 s
T_S na křivce C	145 s

Pozn.: Při odlévání praskla skořepina a část kovu vytekla.

5.5.5 Vzorek číslo 5

Tab.5.10 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.5

Licí teplota slitiny	707 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 290 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	2 min 55 s
Rychlost spouštění	0,002 m/s



Obr. 5.9 Křivky chladnutí u vzorku č.5

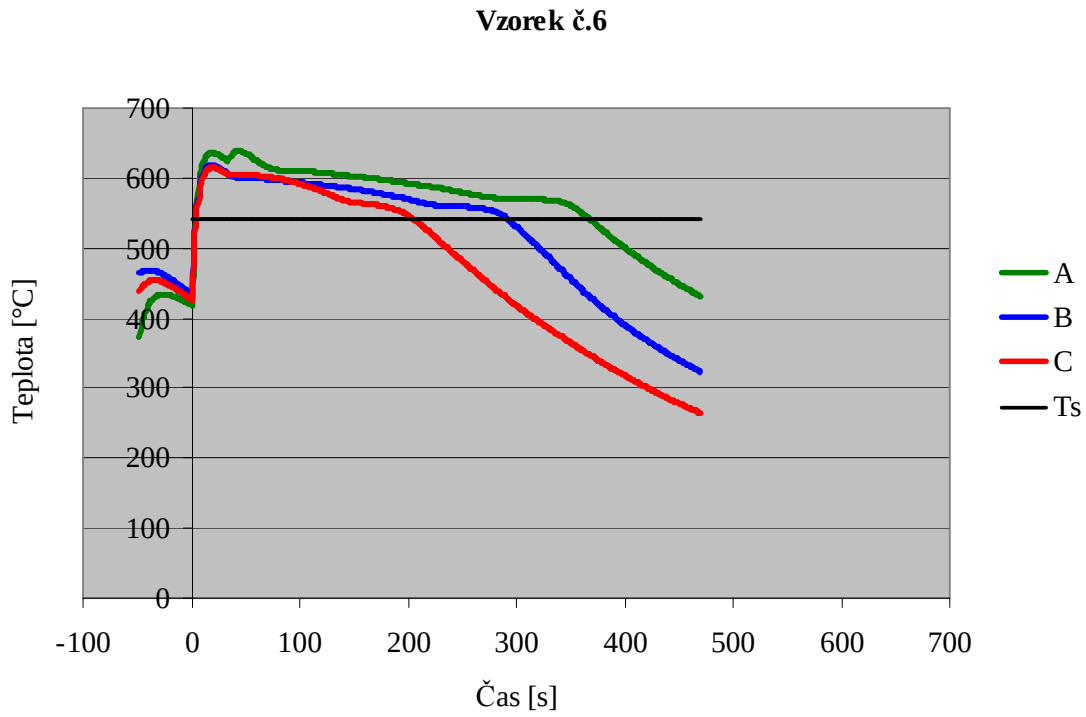
Tab.5.11 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.5

T_S na křivce A	280 s
T_S na křivce B	219 s
T_S na křivce C	180 s

5.5.6 Vzorek číslo 6

Tab.5.12 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.6

Licí teplota slitiny	703 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	4 min 25 s
Rychlost spouštění	0,001 m/s



Obr. 5.10 Křivky chladnutí u vzorku č.6

Tab.5.13 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.6

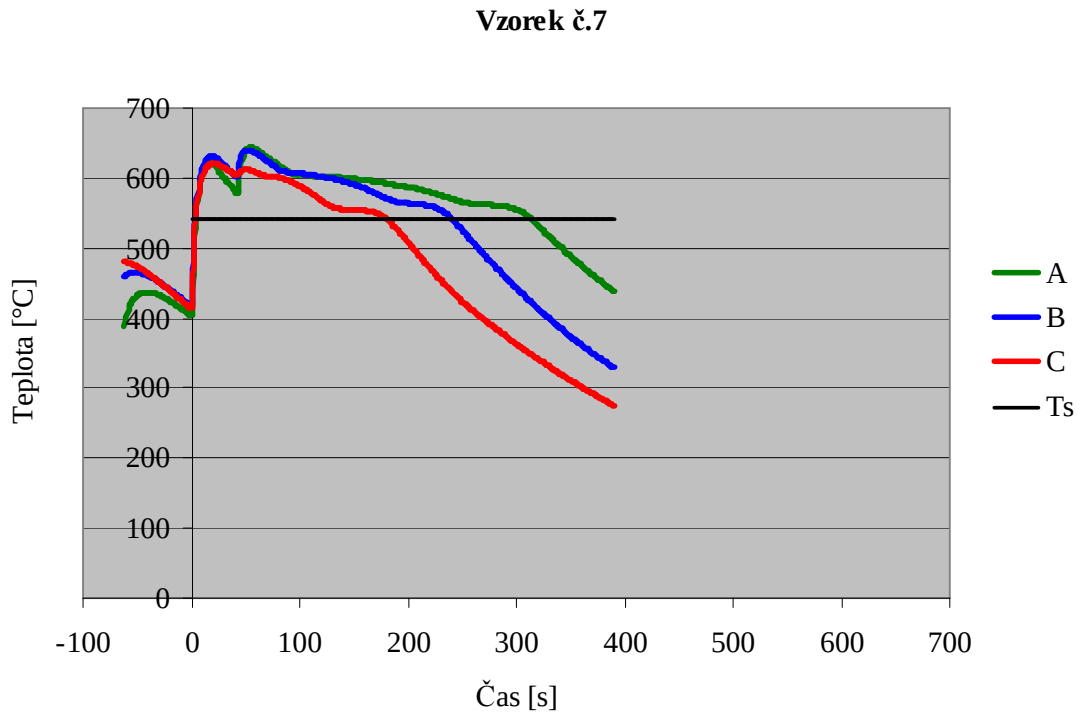
T_S na křivce A	367 s
T_S na křivce B	292 s
T_S na křivce C	205 s

Pozn.: Při odlévání praskla skořepina a část kovu vytekla.

5.5.7 Vzorek číslo 7

Tab.5.14 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorku č.7

Licí teplota slitiny	705 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	3.10^5 Pa
Průtokoměr	Nestačila jeho kapacita
Doba spouštění	3 min 15 s
Rychlost spouštění	0,0015 m/s



Obr. 5.11 Křivky chladnutí u vzorku č.7

Tab.5.15 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorku č.7

T_S na křivce A	313 s
T_S na křivce B	240 s
T_S na křivce C	181 s

Pozn.: Při odlévání praskla skořepina a část kovu vytekla.

5.6 Hodnocení křivek chladnutí

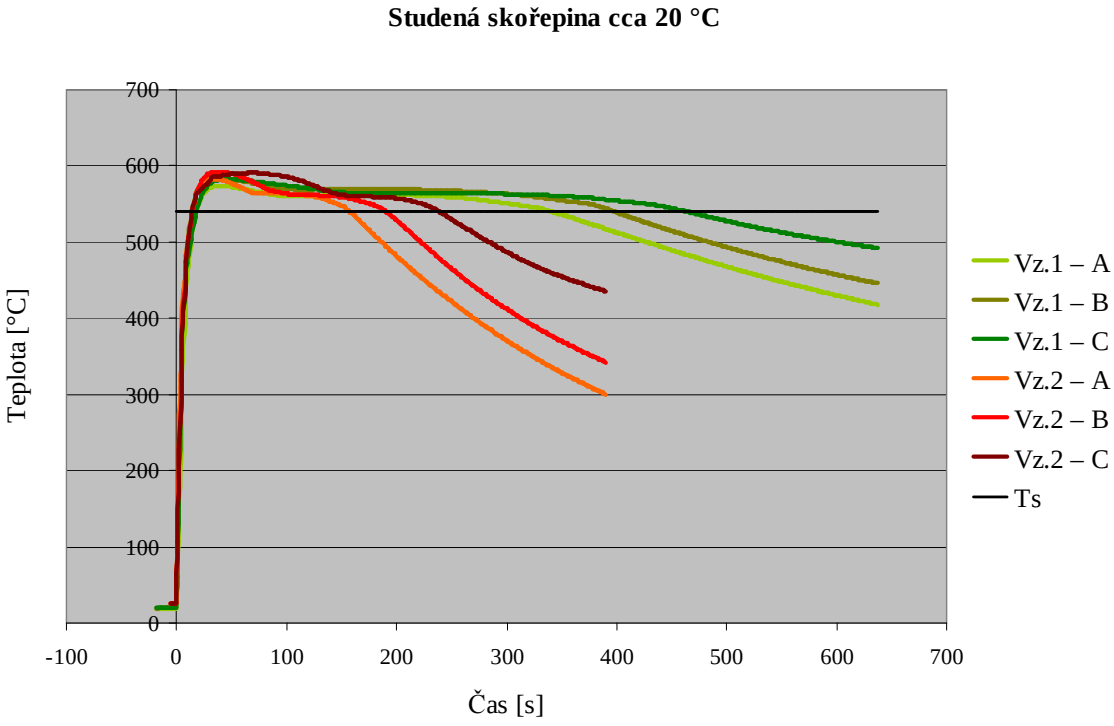
5.6.1 Porovnání vzorků litých do studených skořepin cca 20 °C

Porovnávaly se zkušební vzorky lité do studených skořepin, které měly cca 20 °C. Byly použity hodnoty pro křivky chladnutí vzorku č.1 a vzorku č.2.

Hodnoty vzorku č.1 byly měřeny po odlití slitiny do studené skořepiny při jejím samovolném chlazení na vzduchu. Zatím co hodnoty vzorku č.2 byly měřeny po odlití slitiny do studené skořepiny při chlazení proudem vzduchu.

Tab.5.16 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorků litých do studených skořepin

Vzorek č.1	Samovolné chlazení	T_S na křivce A	481 s
		T_S na křivce B	416 s
		T_S na křivce C	359 s
Vzorek č.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,003 m/s	T_S na křivce A	244 s
		T_S na křivce B	196 s
		T_S na křivce C	163 s



Obr. 5.12 Křivky chladnutí u zkušebních vzorků litých do studené skořepiny

Z tab.5.16 a obr. 5.12 je patrné, že se za pomoci chlazení skořepiny proudem vzduchu dosáhne rychlejšího tuhnutí slitiny a zkrácení doby tuhnutí skoro o jednu polovinu oproti samovolnému chladnutí slitiny na vzduchu ve studené skořepině.

Pozn.: Tento výsledek může být nepatrně ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání vzorku č.2 a vytečením menšího množství kovu touto prasklinou.

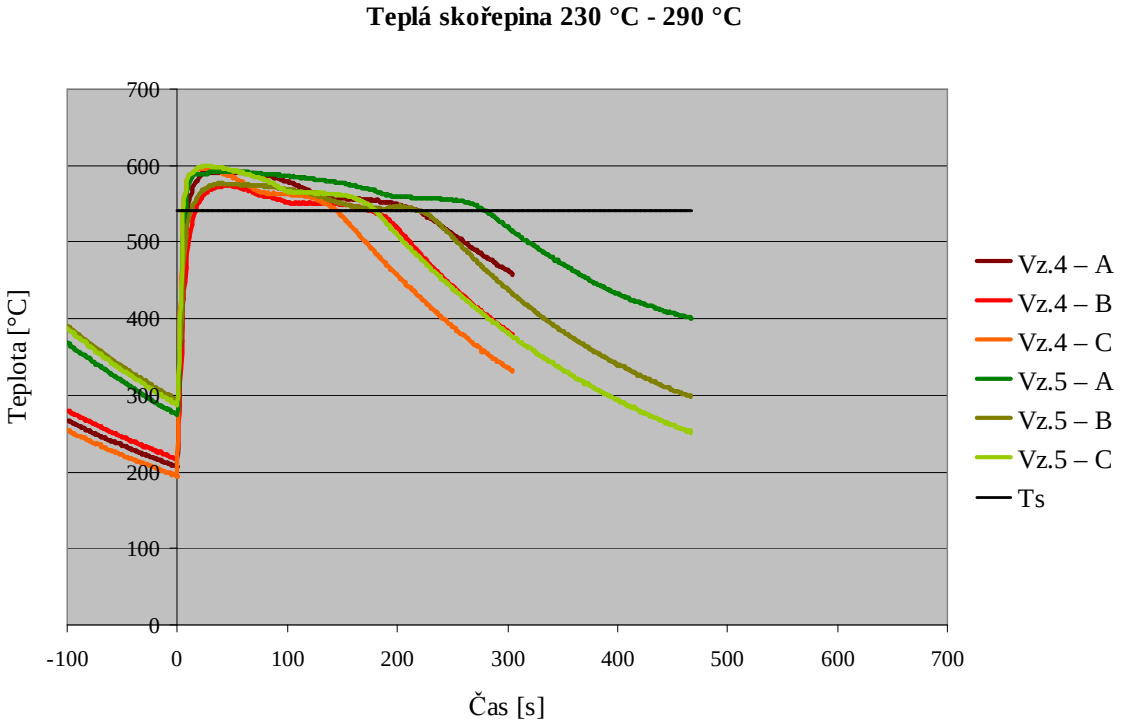
5.6.2 Porovnání vzorků litých do teplé skořepiny v rozmezí 230–290 °C

Porovnávaly se zkušební vzorky lité do teplých skořepin, které měly teplotu v rozmezí 230– 290 °C. Byly použity hodnoty pro křivky chladnutí vzorku č.4 a vzorku č.5.

Hodnoty vzorku č.4 a vzorku č.5 byly měřeny po odlití slitiny do teplé skořepiny při chlazení proudem vzduchu pomocí vyrobeného chladícího zařízení s rozdílnými rychlostmi spouštění skořepiny do proudu vzduchu.

Tab.5.17 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorků litých do teplých skořepin

Vzorek č.4	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,005 m/s	T_S na křivce A	218 s
		T_S na křivce B	174 s
		T_S na křivce C	145 s
Vzorek č.5	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,002 m/s	T_S na křivce A	280 s
		T_S na křivce B	219 s
		T_S na křivce C	180 s



Obr. 5.13 Křivky chladnutí u zkušebních vzorků litých do teplé skořepiny

Z tab.5.17 a obr. 5.13 je patrné, že při vyšší rychlosti spouštění skořepiny do proudu vzduchu je doba tuhnutí kratší než doba tuhnutí u pomaleji spouštěné skořepiny. Důvodem je, že se při rychlejším spouštění ochlazuje vetší část skořepiny.

Pozn.: Tento výsledek může být nepatrně ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání vzorku č.4 a vytečení menšího množství kovu touto prasklinou.

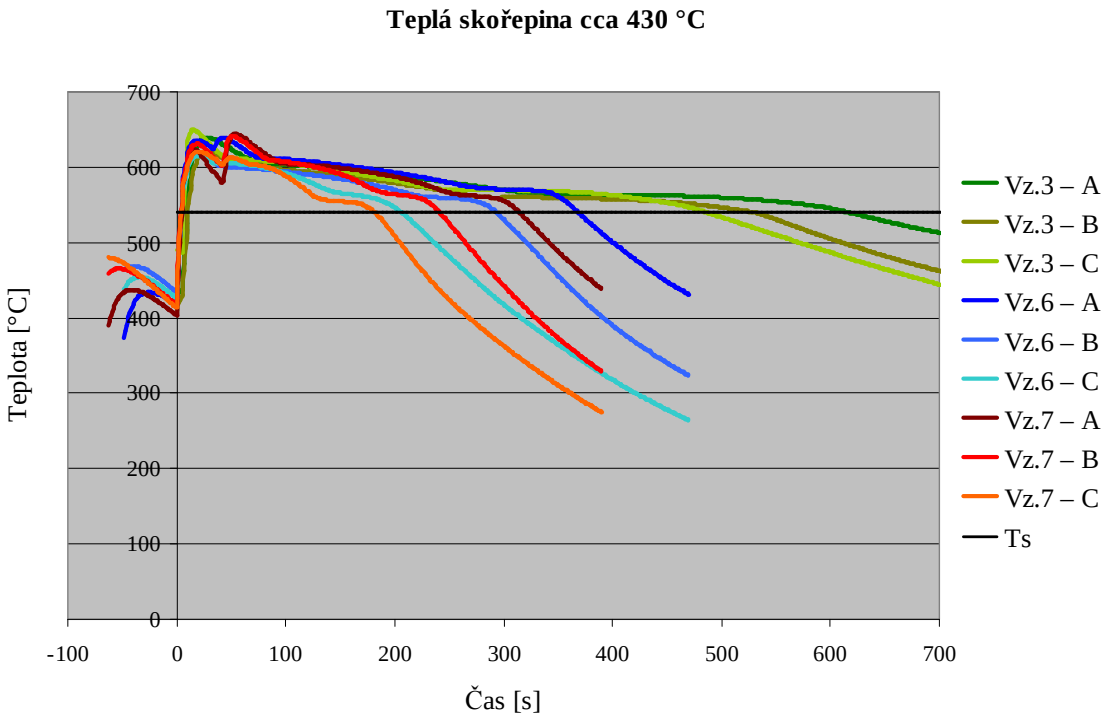
5.6.3 Porovnání vzorků litých do teplých skořepin cca 430 °C

Porovnávaly se zkušební vzorky lité do teplých skořepin, které měly cca 430 °C. Byly použity hodnoty pro křivky chladnutí vzorku č.3, vzorku č.6 a vzorku č.7.

Hodnoty vzorku č.3 byly měřeny po odlití slitiny do teplé skořepiny při jejím samovolném ochlazení na vzduchu. Zatím co hodnoty vzorku č.6 a vzorku č.7 byly měřeny po odlití slitiny do teplé skořepiny při ochlazování proudem vzduchu, tyto vzorky měly ještě navíc rozdílné rychlosti spouštění skořepiny do proudu vzduchu a také rozdílnou hodnotu tlaku a průtoku vzduchu.

Tab.5.18 Doby tuhnutí v jednotlivých částech vzorků litých do teplých skořepin

Vzorek č.3	Samovolné chlazení	T_S na křivce A	615 s
		T_S na křivce B	528 s
		T_S na křivce C	485 s
Vzorek č.6	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,001 m/s	T_S na křivce A	367 s
		T_S na křivce B	292 s
		T_S na křivce C	205 s
Vzorek č.7	Chlazení proudem vzduchu Tlak 3.10^5 Pa Malá kapacita průtokoměru Rychlost spouštění 0,0015 m/s	T_S na křivce A	313 s
		T_S na křivce B	240 s
		T_S na křivce C	181 s



Obr. 5.14 Křivky chladnutí u zkušebních vzorků litých do teplé skořepiny

Z tab.5.18 a obr. 5.14 je patrné, že se za pomoci chlazení teplé skořepiny proudem vzduchu dosáhne rychlejšího tuhnutí slitiny a zkrácení doby tuhnutí o necelou jednu polovinu oproti samovolnému chladnutí slitiny na vzduchu v teplé skořepině. Také je pozorovatelný rozdíl mezi křivkami chladnutí slitin chlazených proudem vzduchu s rozdílnou hodnotou tlaku na regulátoru tlaku, tzn. že při větším tlaku proudu vzduchu (větší intenzitě chlazení) se sníží doba tuhnutí o jednu sedminu.

Pozn.: Tento výsledek může být nepatrně ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání vzorku č.6 a vzorku č.7 a vytečení menšího množství kovu touto prasklinou.

6 NUMERICKÁ SIMULACE PŘESTUPU TEPLA

Numerická simulace přestupu tepla byla řešena na základě naměřených hodnot křivek tuhnutí jednotlivých experimentálních vzorků, označených jako č.1–č.7. Simulace byla provedena v programu ProCAST2009 firmy ESI Group.

Vytvořila se simulace, do které se zadaly počáteční podmínky (lisí teplota slitiny, teplota skořepiny, způsob ochlazování, rychlost spouštění skořepiny do proudu vzduchu), které byly naměřeny u každého experimentálního vzorku, viz. kapitola 5. Pro shodu křivek tuhnutí simulace s křivkami naměřenými při experimentu, bylo zapotřebí v každé simulaci měnit hodnoty intenzity foukání vzduchu (ovlivnění přestupu tepla mezi formou a okolím) a přestup tepla mezi kovem a formou.

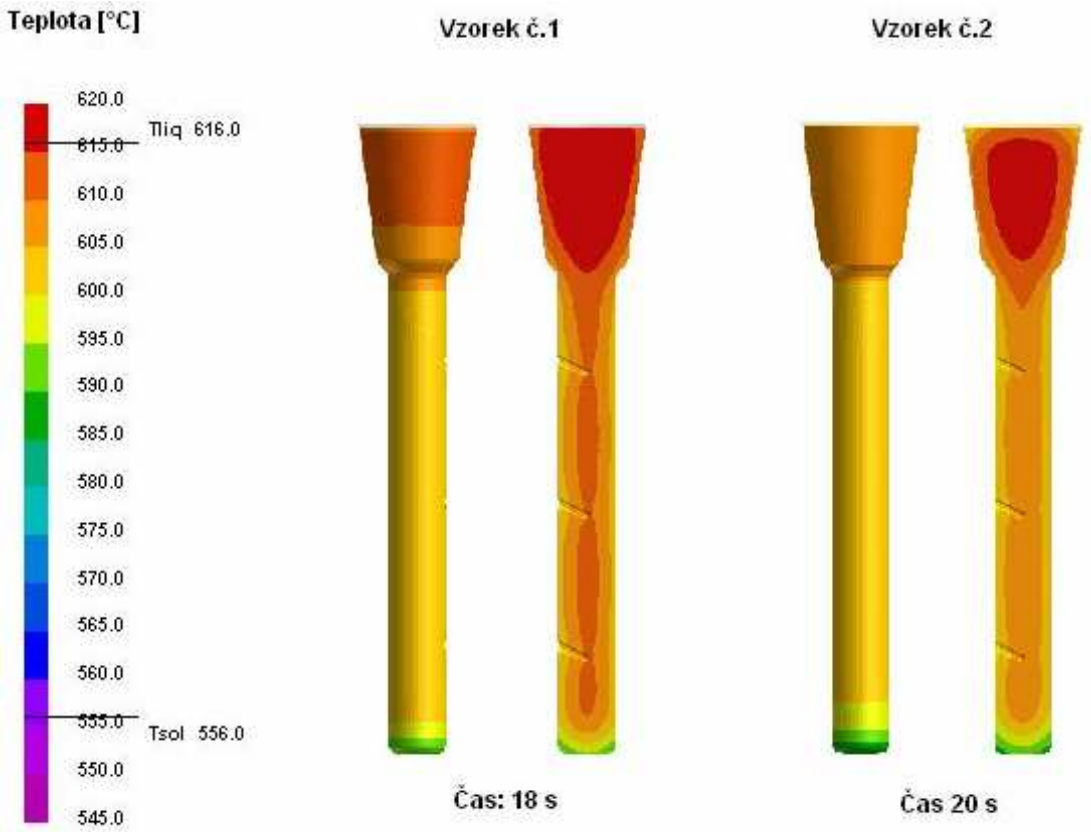
Po vytvoření všech potřebných simulací bylo provedeno vzájemné porovnání jednotlivých přestupů tepla v závislosti na nastavených počátečních podmínkách (studená skořepina nebo teplá skořepina). Přestup tepla se porovnával v oblasti počátku tuhnutí (teploty 605–610 °C) a před koncem tuhnutí (teploty 570–580 °C) a byl zobrazen ve dvou polohách, jednou je vnější strana vzorku a druhou je její řez.

6.1 Simulace přestupu tepla u studených skořepin cca 20 °C

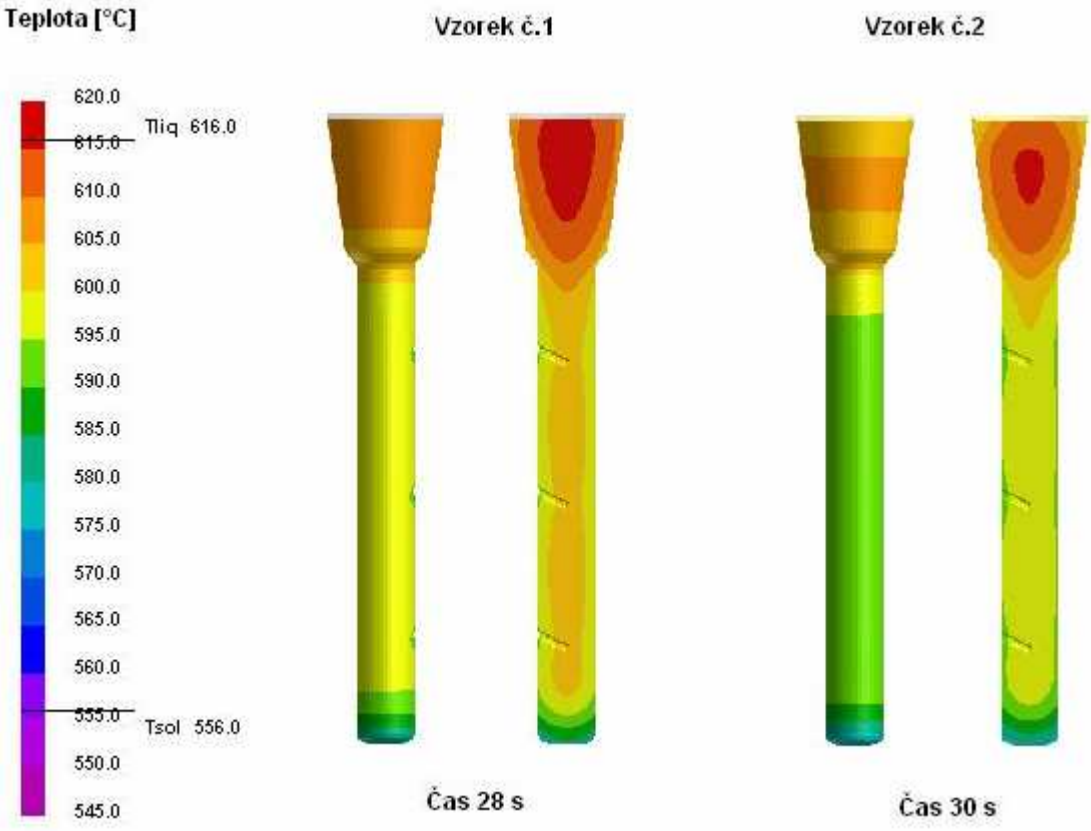
Porovnávaly se simulace experimentálních vzorků litých do studených skořepin s teplotou cca 20 °C (vzorek č.1 a vzorek č.2). Vzorek č.1 je samovolně chlazen na vzduchu a vzorek č.2 je chlazen proudem vzduchu. Počáteční podmínky simulace byly navoleny podle tab. 6.1.

Tab.6.1 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorků č.1 a č.2

	Vzorek č.1	**Vzorek č.2**
Lící teplota slitiny	707 °C	710 °C
Teplota skořepiny	Studená skořepina cca 20 °C	Studená skořepina cca 20 °C
Způsob ochlazování	Samovolně	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	---	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	---	22 PSI
Doba spouštění	---	1 min 25 s
Rychlost spouštění	---	0,003 m/s



Obr. 6.1 Přestup tepla u vzorku č.1 a č.2 – počátek tuhnutí



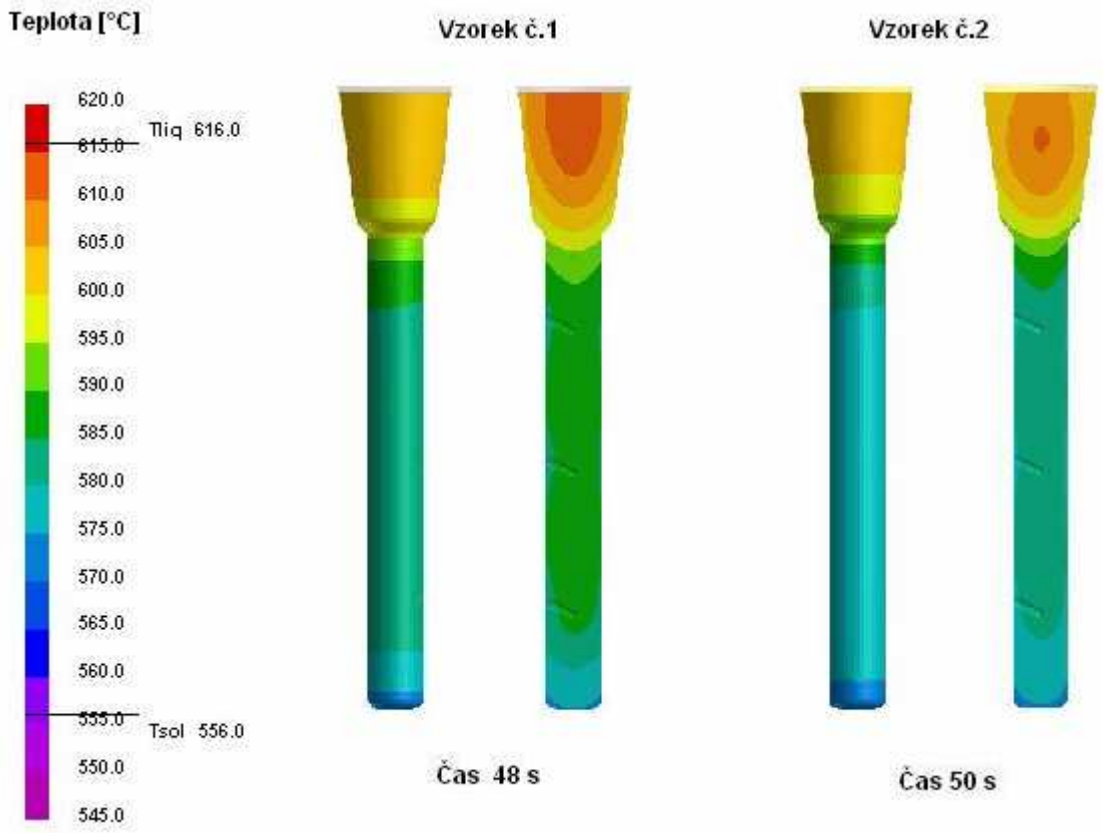
Obr. 6.2 Přestup tepla u vzorku č.1 a č.2 – počátek tuhnutí eutektika

Na obr. 6.1 jsou porovnávány přestupy tepla počátku tuhnutí vzorku č.1 a vzorku č.2. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že vzorek chlazený proudem vzduchu začíná tuhnout dříve než vzorek chladnoucí samovolně na vzduchu.

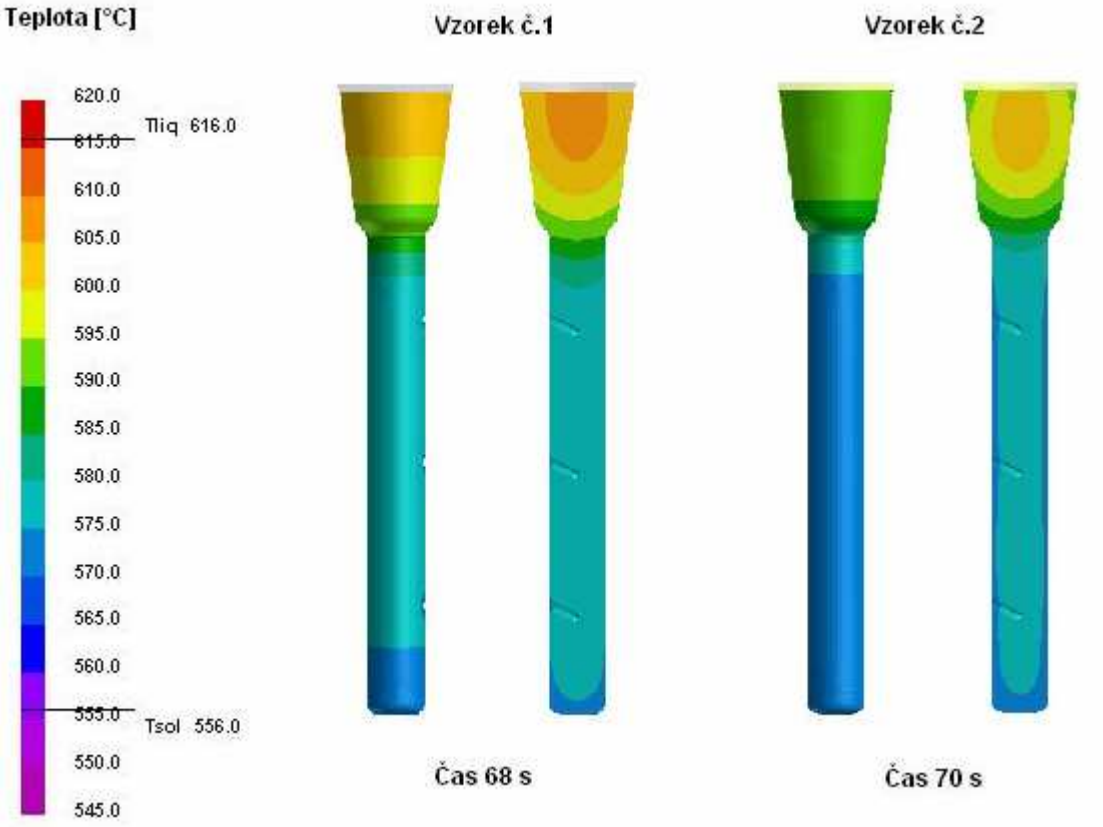
Na obr. 6.2 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 580–585 °C) počátku tuhnutí eutektika vzorku č.1 a vzorku č.2. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorku chlazeného proudem vzduchu začíná tuhnout eutektikum dříve než u vzorku chladnoucího samovolně na vzduchu.

Na obr. 6.3 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 575–585 °C) při tuhnutí eutektika vzorku č.1 a vzorku č.2. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorku chlazeného proudem vzduchu tuhne eutektikum rychleji než u odlitku chladnoucího samovolně na vzduchu. Je také vidět rozdíl teplotních gradientů při teplotě cca 575–580 °C. Vzorek č.1 má při této teplotě strmý teplotní gradient ve spodní části vzorku, zatím co vzorek č.2 má při této teplotě méně strmý gradient ve střední části vzorku, tzn. že má vzorek č.2 v této oblasti větší náchylnost na vznik vad typu ředin.

Na obr. 6.4 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 570–580 °C) při konci tuhnutí eutektika vzorku č.1 a vzorku č.2. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorku chlazeného proudem vzduchu se dosáhne konce tuhnutí eutektika mnohem dříve než u vzorku chladnoucího samovolně na vzduchu. Je také vidět rozdíl teplotních gradientů při teplotě cca 570–575 °C. Vzorek č.1 má při této teplotě strmý teplotní gradient ve spodní části vzorku, zatím co vzorek č.2 má při této teplotě méně strmý gradient ve střední části vzorku, tzn. že v této oblasti je větší náchylnost na vznik vad typu ředin. Také je vidět, že ve střední části vzorku č.1 při teplotě (575–580 °C) dochází teprve k tuhnutí eutektika, které u vzorku č.2 tuhlo již v čase 50 s, viz. obr. 6.3. Tato oblast má málo strmý teplotní gradient a je zde velké riziko vzniku vad typu ředin.



Obr. 6.3 Přestup tepla u vzorku č.1 a č.2 – tuhnutí eutektika



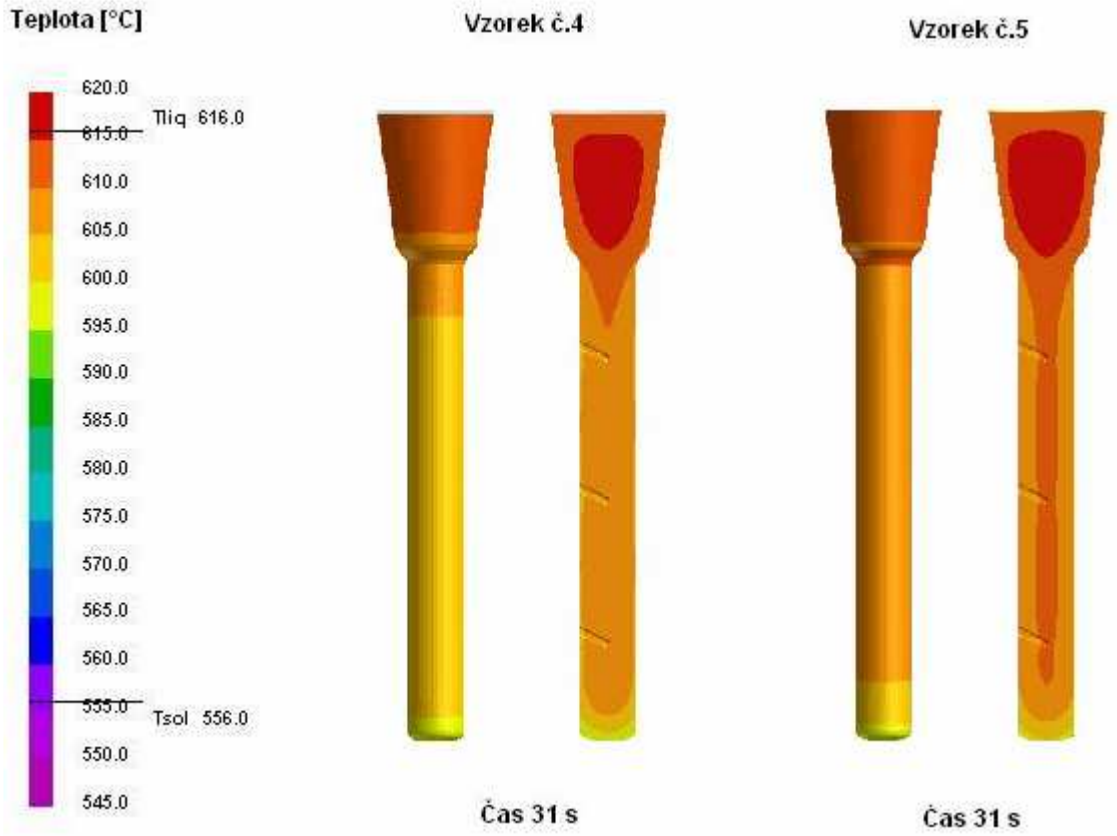
Obr. 6.4 Přestup tepla u vzorku č.1 a č.2

6.2 Simulace přestupu tepla u teplých skořepina 230–290 °C

Porovnávaly se simulace experimentálních vzorků litých do teplých skořepin s teplotou cca 230–290 °C (vzorek č.4 a vzorek č.5). Vzorek č.4 je chlazen proudem vzduchu a je do něj rychleji spuštěn oproti vzorku č.5, který je chlazen proudem vzduchu, ale je do něj pomaleji spuštěn. Počáteční podmínky simulace byly navoleny podle tab. 6.2.

Tab.6.2 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorků č.4 a č.5

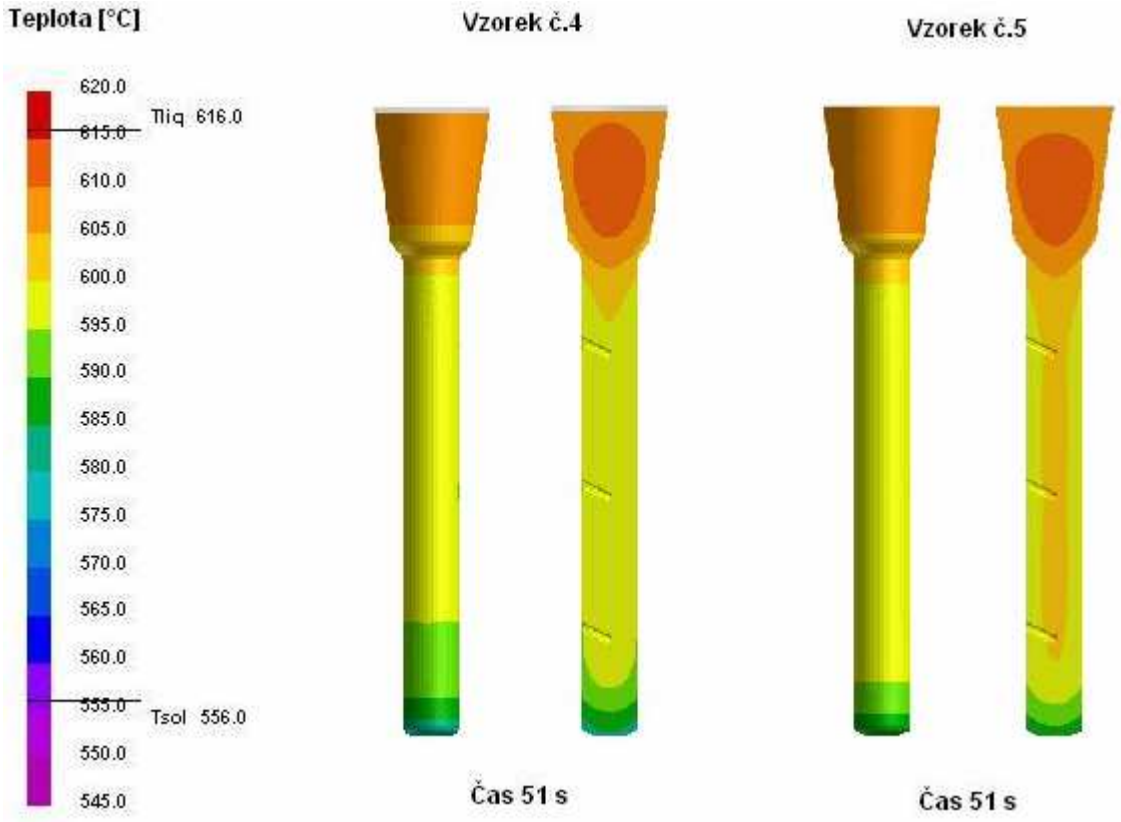
	Vzorek č.4	**Vzorek č.5**
Lící teplota slitiny	710 °C	707 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 230 °C	Teplá skořepina 290 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI	22 PSI
Doba spouštění	1 min	2 min 55 s
Rychlost spouštění	0,005 m/s	0,002 m/s



Obr. 6.5 Přestup tepla u vzorku č.4 a č.5 – počátek tuhnutí

Na obr. 6.5 jsou porovnávány přestupy tepla počátku tuhnutí vzorku č.4 a vzorku č.5. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že vzorek spouštěný do proudu vzduchu rychleji začíná tuhnout dříve než vzorek spuštěný do proudu vzduchu pomaleji.

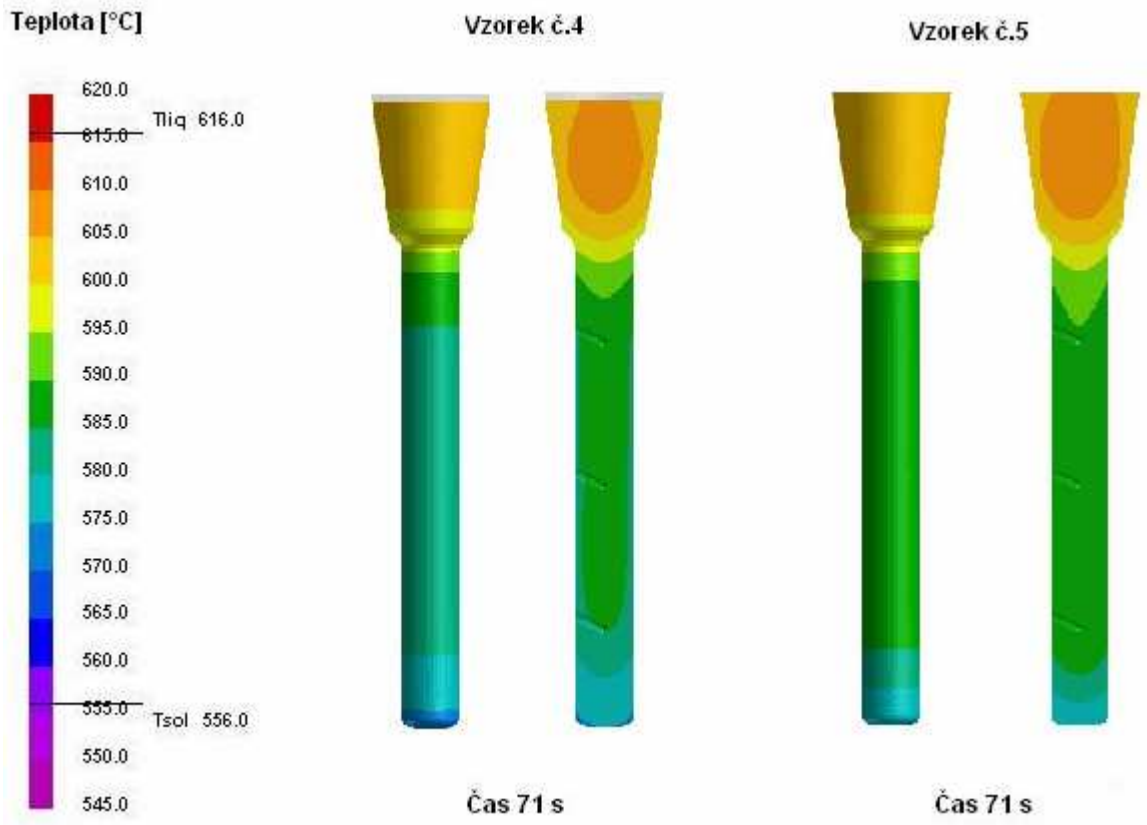
Na obr. 6.6 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 580–585 °C) počátku tuhnutí eutektika vzorku č.4 a vzorku č.5. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorku spouštěného rychleji do proudu vzduchu začíná tuhnout eutektikum dříve než u vzorku spouštěného do proudu vzduchu pomaleji.



Obr. 6.6 Přestup tepla u vzorku č.4 a č.5 – počátek tuhnutí eutektika

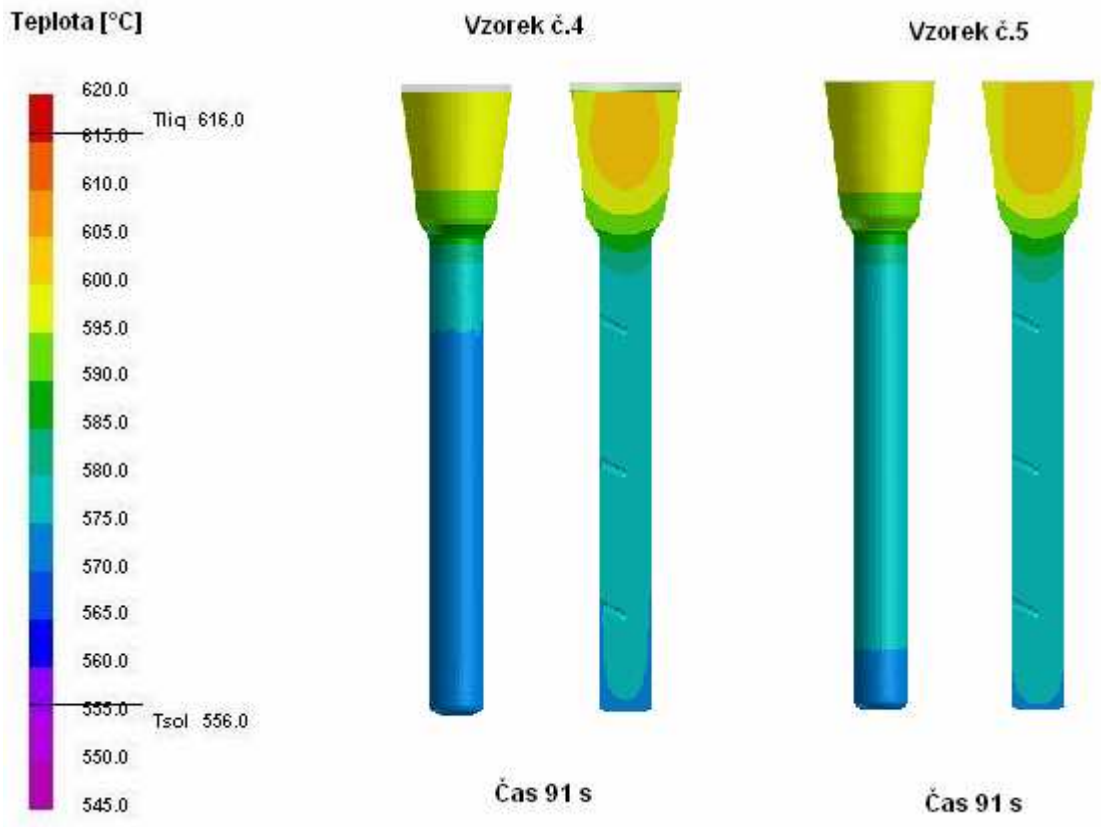
Na obr. 6.7 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 575–585 °C) při tuhnutí eutektika vzorku č.4 a vzorku č.5. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorku rychleji spouštěného do proudu vzduchu tuhne eutektikum rychleji než u vzorku spouštěného do proudu vzduchu pomaleji. Je také vidět rozdíl teplotních gradientů při teplotě

cca 575–580 °C. Vzorek č.4 má při této teplotě málo strmý teplotní gradient ve střední části vzorku, zatím co vzorek č.5 má při této teplotě strmý teplotní gradient ve spodní části vzorku, tzn. že je u vzorku č.4 v této oblasti větší náchylnost na vznik vad typu ředin.



Obr. 6.7 Přestup tepla u vzorku č.4 a č.5 – tuhnutí eutektika

Na obr. 6.8 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 570–580 °C) při konci tuhnutí eutektika vzorku č.4 a vzorku č.5. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že se u vzorku rychleji spouštěného do proudu vzduchu dosáhne konce tuhnutí eutektika mnohem dříve než u vzorku spouštěného do proudu vzduchu pomaleji. Je také vidět rozdíl teplotních gradientů při teplotě cca 570–575 °C. Vzorek č.4 má při této teplotě málo strmý teplotní gradient ve střední části vzorku, zatím co vzorek č.5 má při této teplotě strmý gradient ve spodní části vzorku, tzn. že u vzorku č.4 je v této oblasti větší náchylnost na vznik vad typu ředin. Také je vidět, že ve střední části vzorku č.5 při teplotě (575–580 °C) dochází teprve k tuhnutí eutektika, které u vzorku č.4 tuhlo již v čase 71 s, viz. obr. 6.7. Tato oblast má málo strmý teplotní gradient a je zde velké riziko vzniku vad typu ředin.



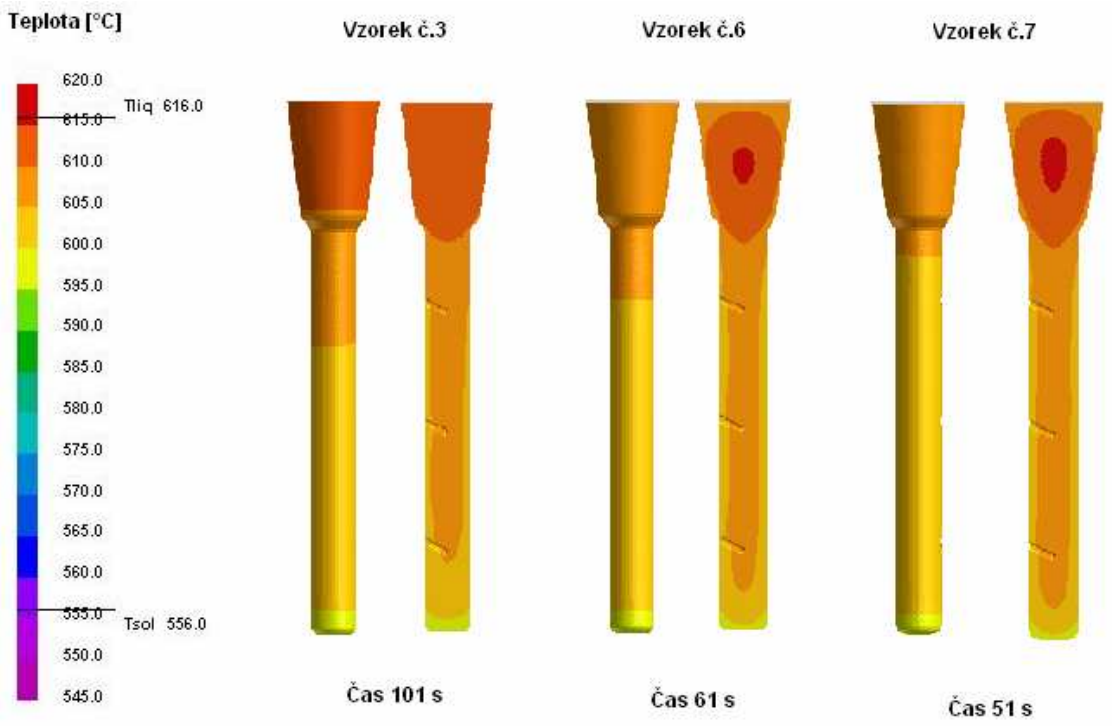
Obr. 6.8 Přestup tepla u vzorku č.1 a č.2 – konec tuhnutí eutektika

6.3 Simulace přestupu tepla u teplých skořepina 430 °C

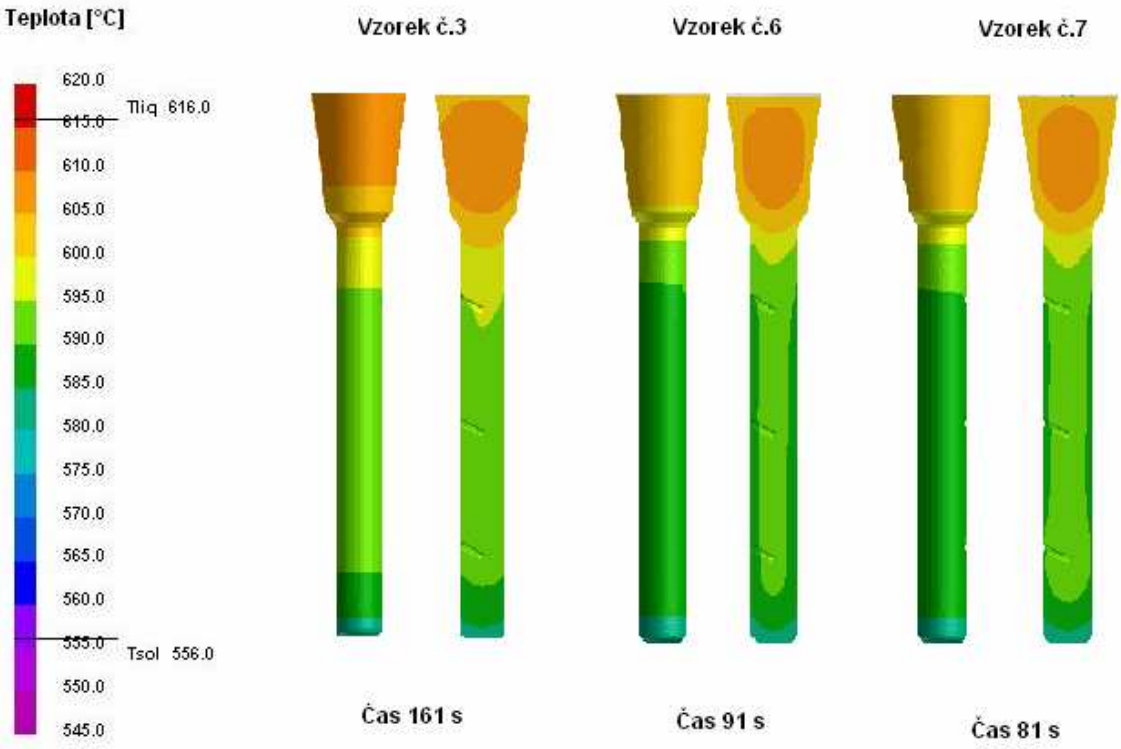
Porovnávaly se simulace experimentálních vzorků litých do teplých skořepin s teplotou cca 430 °C (vzorek č.3, vzorek č.6 a vzorek č.7). Vzorek č.3 samovolně chladl na vzduchu, vzorek č.6 a vzorek č.7 byl chlazen proudem vzduchu s rozdílnou hodnotou tlaku vzduchu. Počáteční podmínky simulace byly navoleny podle tab. 6.3.

Tab.6.3 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí vzorků č.3, č.6 a č.7

	Vzorek č.3	**Vzorek č.6**	**Vzorek č.7**
Licí teplota slitiny	700 °C	703 °C	705 °C
Teplota skořepiny	430 °C	430 °C	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Samovolně	Proudem vzduchu	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	---	1,3.105 Pa	3.105 Pa
Průtokoměr	---	22 PSI	Nestačila jeho kapacita
Doba spouštění	---	4 min 25 s	3 min 15 s
Rychlost spouštění	---	0,001 m/s	0,0015 m/s



Obr. 6.9 Přestup tepla u vzorku č.3, č.6 a č.7 – počátek tuhnutí



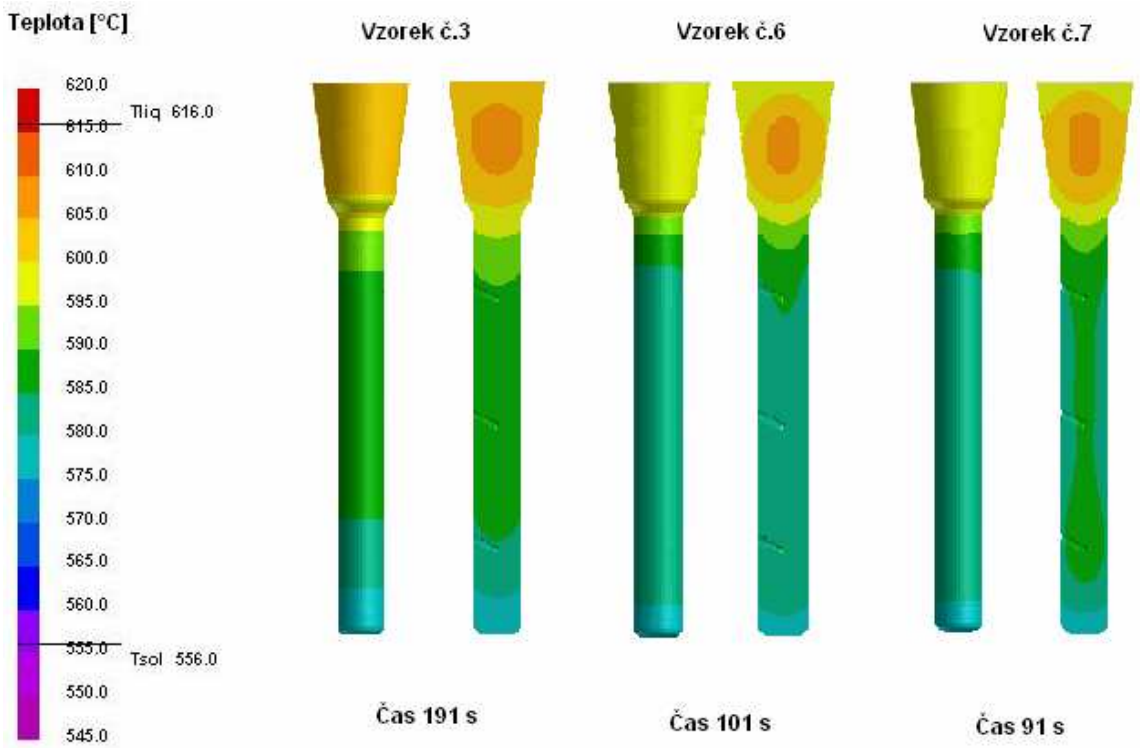
Obr. 6.10 Přestup tepla u vzorku č.3, č.6 a č.7 – tuhnutí eutektika

Na obr. 6.9 jsou porovnávány přestupy tepla počátku tuhnutí vzorku č.3, vzorku č.6 a vzorku č.7. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že vzorky chlazené proudem vzduchu začínají tuhnout dříve než vzorek chladnoucí samovolně na vzduchu. Dále je pozorovatelný rozdíl počátku tuhnutí mezi vzorky chlazenými proudem vzduchu. Vzorek chlazený proudem vzduchu s větším tlakem začíná tuhnout dříve než vzorek chlazený proudem vzduchu s menším tlakem vzduchu.

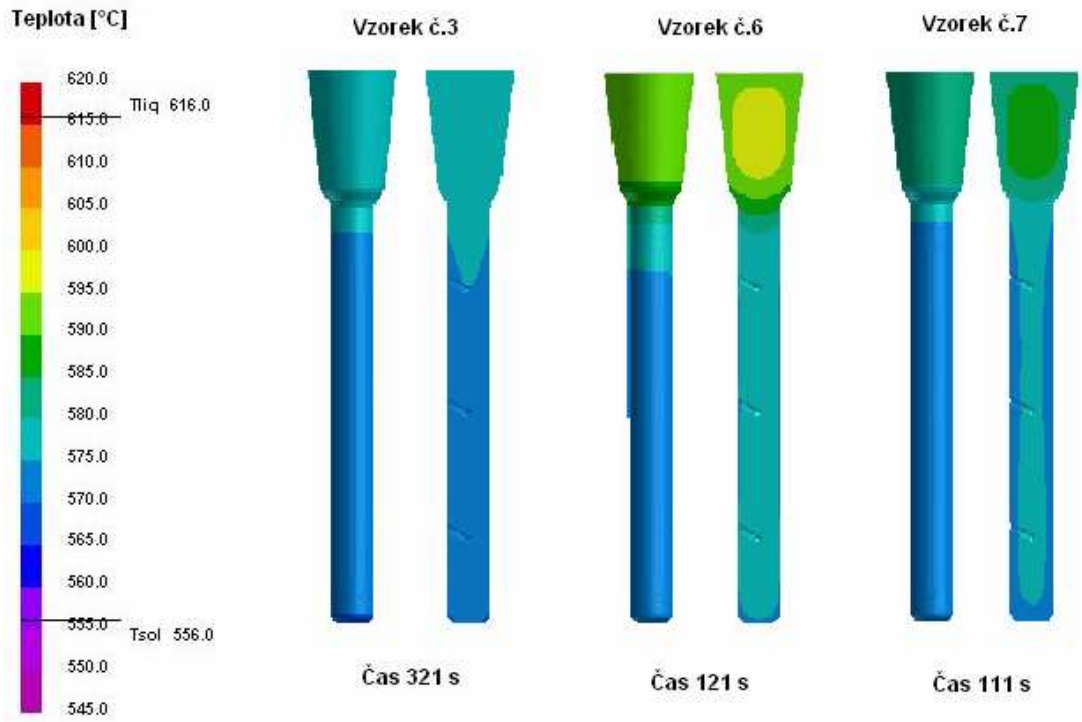
Na obr. 6.10 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 580–585 °C) počátku tuhnutí eutektika vzorku č.3, vzorku č.6 a vzorku č.7. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorků chlazených proudem vzduchu začíná tuhnout eutektikum dříve než u vzorku chladnoucího samovolně na vzduchu. Je také vidět, že u vzorku, který se chladí proudem vzduchu s větším tlakem začíná tuhnutí eutektika dříve než u vzorku chlazeného proudem vzduchu s tlakem menším.

Na obr. 6.11 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 575–585 °C) při tuhnutí eutektika vzorku č.3, vzorku č.6 a vzorku č.7. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorků chlazených proudem vzduchu tuhne eutektikum rychleji než u vzorku chladnoucího samovolně na vzduchu. Je také vidět rozdíl teplotních gradientů při teplotě cca 575–580 °C. Vzorek č.3 má při této teplotě strmý teplotní gradient ve spodní části vzorku, zatím co vzorek č.6 a vzorek č.7 má při této teplotě méně strmý gradient ve střední části vzorku, tzn. že v této oblasti je větší náchylnost na vznik vad typu ředin.

Na obr. 6.12 jsou porovnávány přestupy tepla (cca 570–575 °C) při konci tuhnutí eutektika vzorku č.3, vzorku č.6 a vzorku č.7. Na pravé straně u jednotlivých vzorků je možné vidět přestup tepla na povrchu vzorku, na levé straně je vidět řez tímto vzorkem, na kterém lze pozorovat dosazování kovu nálitkem. Je patrné, že u vzorků chlazených proudem vzduchu se dosáhne konce tuhnutí eutektika mnohem dříve než u vzorku chladnoucího samovolně na vzduchu.



Obr. 6.11 Přestup tepla u vzorku č.3, č.6 a č.7 – tuhnutí eutektika



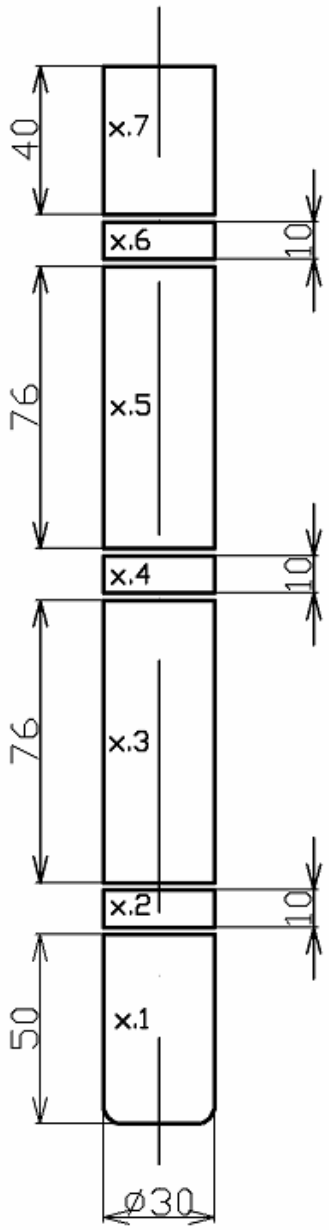
Obr. 6.13 Přestup tepla u vzorku č.3, č.6 a č.7 – konec tuhnutí eutektika

7 HODNOCENÍ STRUKTURY EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ

Na připravených vzorcích se provedlo hodnocení DAS (dendrite arm spacing) a vyhodnocení struktury jednotlivých vzorků, které byly získány nařezáním odlitých zkušebních vzorků označených jako č.1–č.7.

7.1 Příprava vzorků

U experimentálních odlitků č.1–č.7 byly odřezány vtoky a zkušební část byla nařezána na sedm dílů, obr. 7.1.



Obr. 7.1 Schéma rozřezání odlitků na zkušební vzorky

Každý díl byl označen x.x, kde první „x“ znamená číslo experimentálního odlitku a druhé „x“ znamená část odlitku ze které tento díl pochází, viz. obr. 7.1. Značení dílů odlitku bylo provedeno od spodní části experimentálního odlitku směrem nahoru.

U vzorků označených x.2, x.4 a x.6, s rozměry Ø30 mm a výškou 10 mm, byly na soustruhu zarovnány čela, pro snadnější provedení metalografického výbrusu. Poté byly vzorky očištěny a upnuty do brousícího a leštícího zařízení pro automatickou preparaci metalografických vzorků. Vzorky byly vybroušeny na brusném papíře P1200 (FEPA), jako chladící médium byla použita voda. Po vybroušení vzorků přišlo na řadu leštění. Použil se leštící kotouč 9 μm a leštící diamantová pasta Dia Duo 9 μm (Diamond Suspension and Lubricant in One – Diamantová suspenze a mazivo v jednom), následoval leštící kotouč 3 μm a leštící diamantová pasta Dia Duo 3 μm a jako poslední byl použit leštící kotouč 1 μm a leštící diamantová pasta Dia Duo 1 μm. Po každém leštění byly vzorky opláchnuty etylalkoholem a následně vysušeny horkým vzduchem. Před hodnocením jejich struktury, byly pro zvýraznění fází naleptány 0,5% kyselinou fluorovodíkovou ve vodě (HF).

Vzorky označeny jako x.1 (s rozměry Ø30 mm a výškou 50 mm), x.3 (s rozměry Ø30 mm a výškou 76 mm), x.5 (s rozměry Ø30 mm a výškou 76 mm), a x.7 (s rozměry Ø30 mm a výškou 40 mm), byly vyfrézovaný do středu vzorku (do jeho tepelné osy). Poté byly vzorky očištěny a probíhalo jejich broušení a leštění na ručním brousícím a leštícím zařízení. Broušení probíhalo v několika krocích a jako chladící médium byla použita voda. Využívaly se vodní brusné papíry Carborundum 100, Carborundum 220, CW–C P400, CW–C P800, P1000A. Poté přišlo na řadu leštění na sametových kotoučích, na kterých se postupně využívaly diamantové pasty Urdimant s velikostí částic 6 μm, 2 μm a 0,7 μm (D6, D2, D0,7). Jako chladící médium byl využíván etylalkohol. Po každém leštění byly vzorky opláchnuty etylalkoholem a následně vysušeny horkým vzduchem.

Po vybroušení a vyleštění potřebných vzorků se přešlo k samotnému vyhodnocení jejich struktury.

7.2 Vyhodnocení DAS

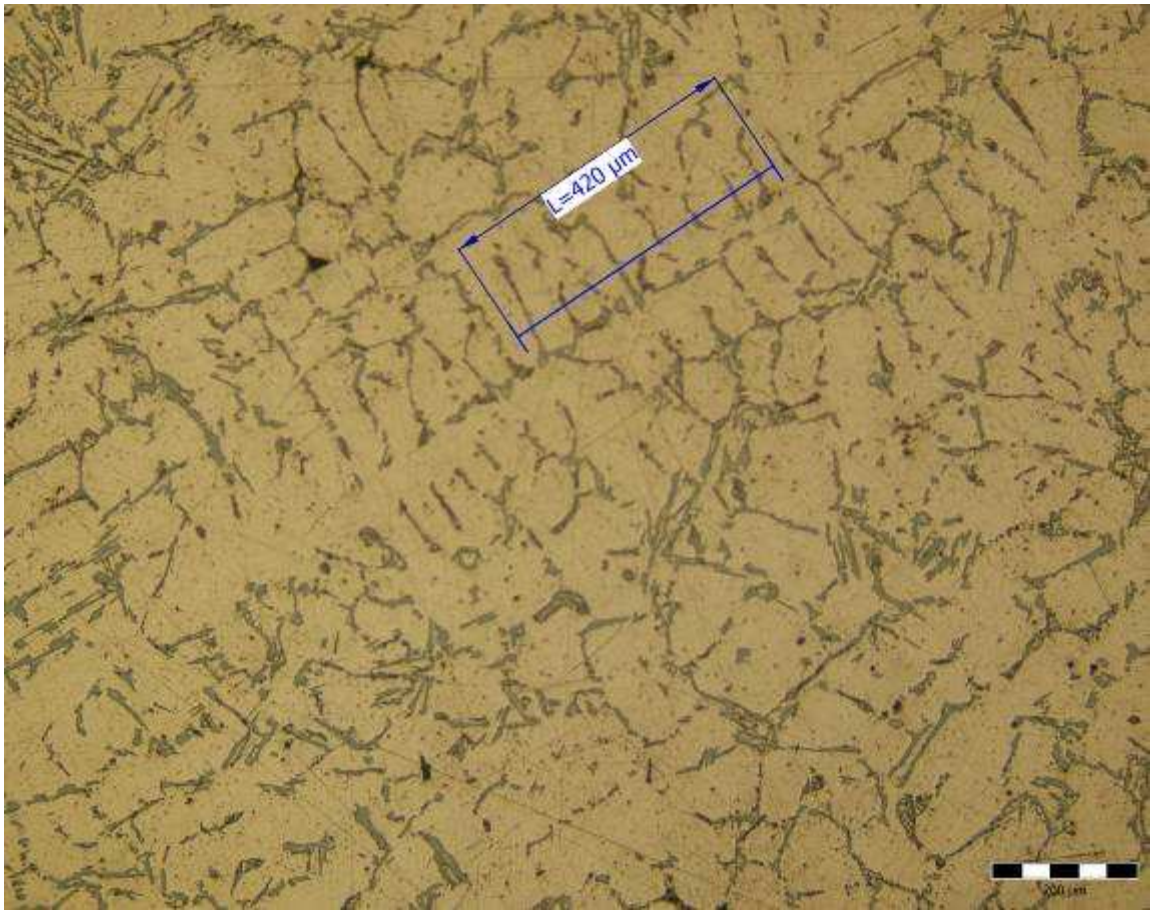
Hodnocení bylo provedeno u každého ze vzorků, které se nachází ve spodní části, označené jako x.2, a v horní části, označené jako x.6, experimentálního odlitku. DAS byl hodnocen na metalografických výbrusech, které byly naleptány 0,5% kyselinou fluorovodíkovou (HF). Na mikroskopu bylo nastaveno zvětšení 100x, změřila se délka přes několik sekundárních větví dendritů, vypočítal se DAS u jednotlivých vzorků a následně se provedlo jeho porovnání.

7.2.1 Vzorek č.1

U odlitku, ze kterého byly vzorky 1.2 a 1.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.1 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.1

Licí teplota slitiny	707 °C
Teplota skořepiny	Studená skořepina cca 20 °C
Způsob ochlazování	Samovolně
Regulátor tlaku	---
Průtokoměr	---
Doba spouštění	---
Rychlost spouštění	---

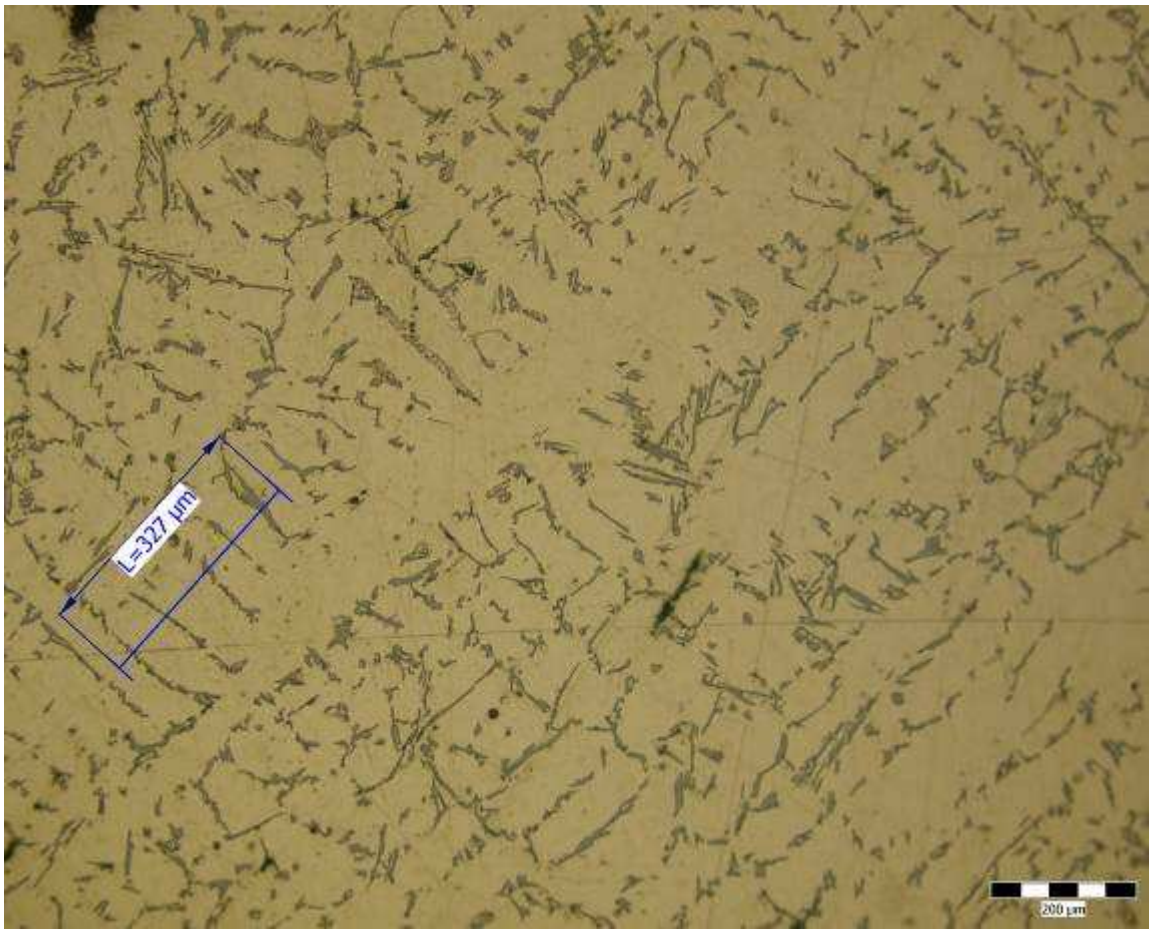


Obr. 7.2 DAS u vzorku č.1.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 420 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.1.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{420}{9-1} \doteq \underline{\underline{53\mu m}} \qquad (7.1)$$



Obr. 7.3 DAS u vzorku č.1.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes šest sekundárních větví dendritu L = 327 μm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.1.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{327}{6-1} \doteq \underline{\underline{65\mu m}} \qquad (7.2)$$

Tab.7.2 Hodnoty DAS u vzorku č.1

Vzorek č.1.2	Samovolné chladnutí	DAS = 53 μm
Vzorek č.1.6	Samovolné chladnutí	DAS = 65 μm

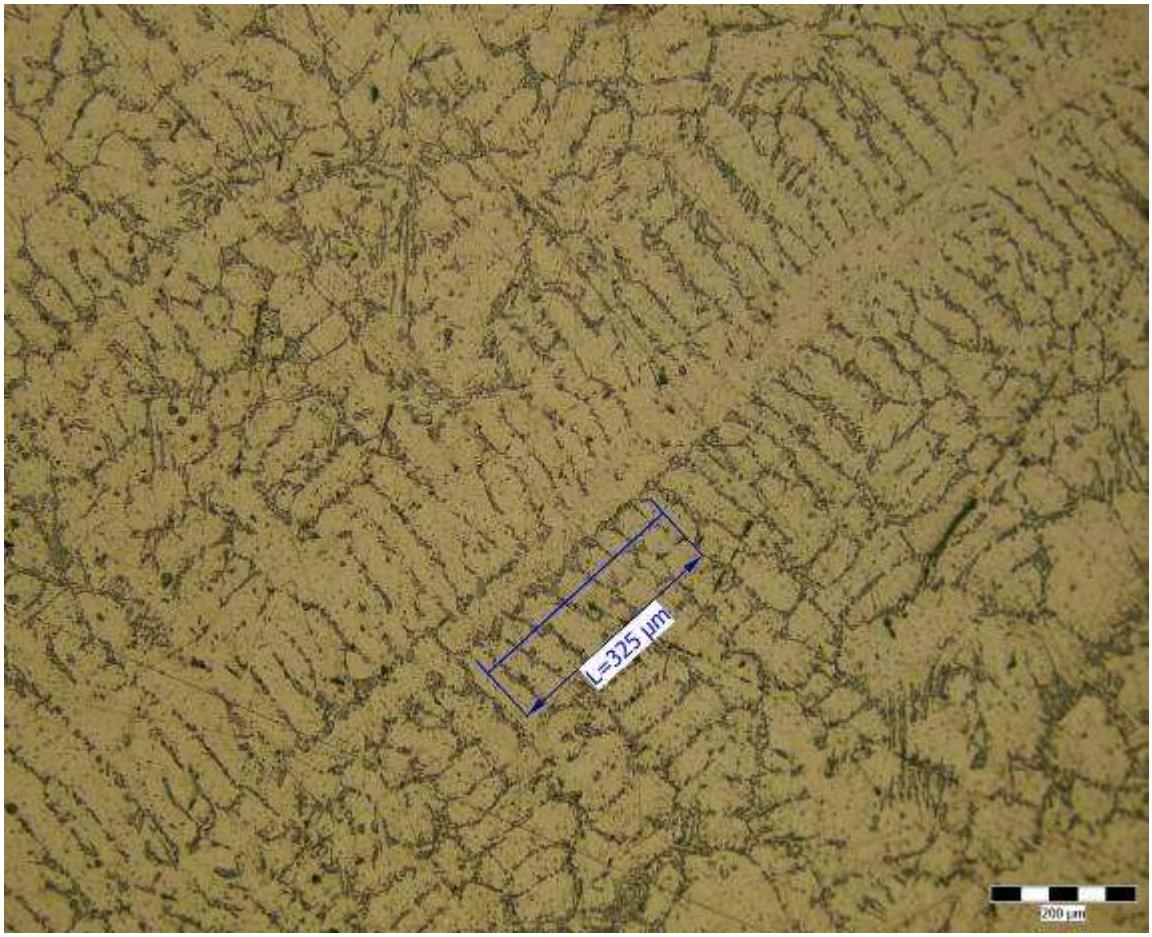
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 1.2 a 1.6 bylo zjištěno, že při samovolném chladnutí skořepiny tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.2 Vzorek č.2

U odlitku, ze kterého byly vzorky 2.2 a 2.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.3 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.2

Licí teplota slitiny	710 °C
Teplota skořepiny	Studená skořepina cca 20 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	1 min 25 s
Rychlost spouštění	0,003 m/s

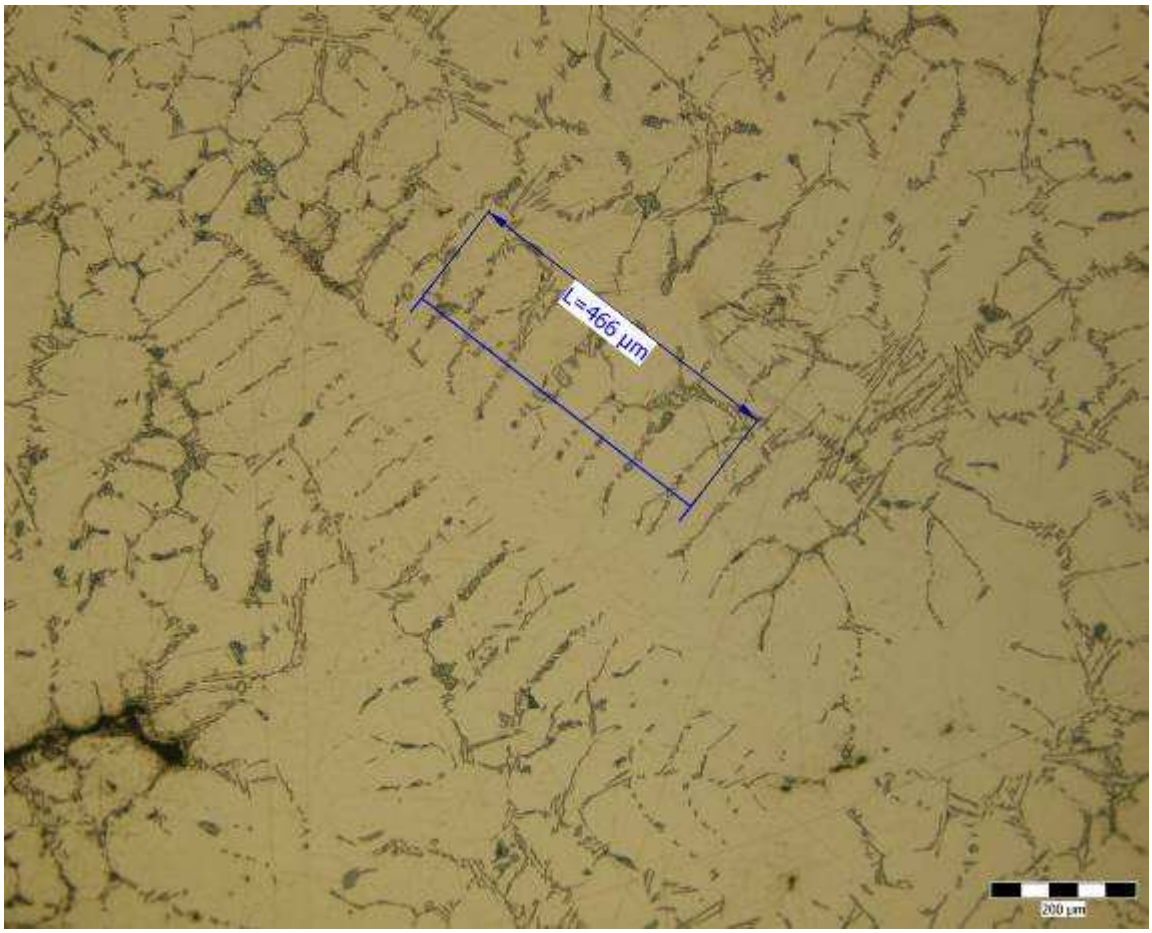


Obr. 7.4 DAS u vzorku č.2.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 325 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.2.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{325}{9-1} \doteq \underline{\underline{41\mu m}} \qquad (7.3)$$



Obr. 7.5 DAS u vzorku č.2.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 466 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.2.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{466}{9-1} \doteq \underline{\underline{58\mu m}} \qquad (7.4)$$

Tab.7.4 Hodnoty DAS u vzorku č.2

Vzorek č.2.2	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 41 µm
Vzorek č.2.6	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 58 µm

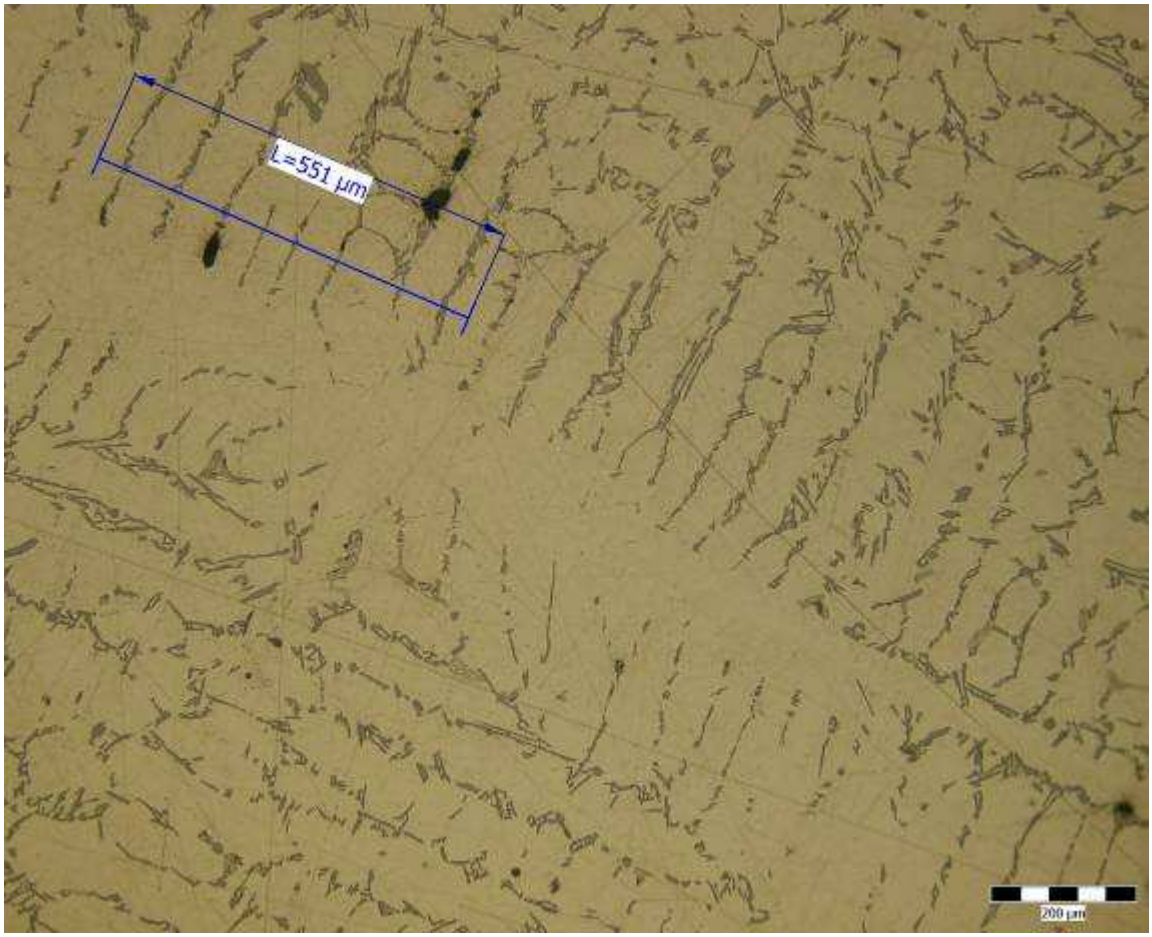
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 2.2 a 2.6 bylo zjištěno, že při chlazení skořepiny proudem vzduchu tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. A také díky řízenému ochlazování od spodku skořepiny. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.3 Vzorek č.3

U odlitku, ze kterého byly vzorky 3.2 a 3.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.5 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.3

Licí teplota slitiny	700 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Samovolně
Regulátor tlaku	---
Průtokoměr	---
Doba spouštění	---
Rychlost spouštění	---

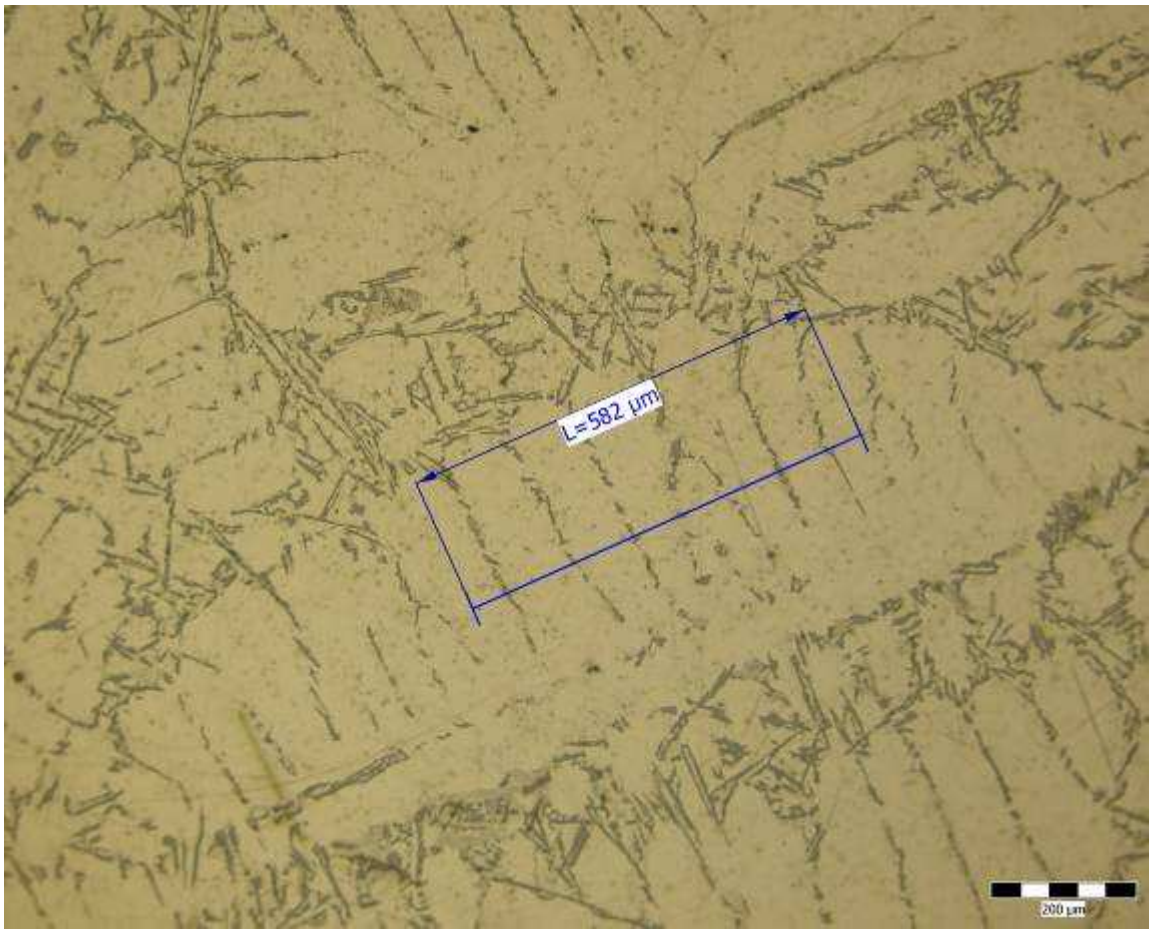


Obr. 7.6 DAS u vzorku č.3.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 551 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.3.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{551}{9-1} \doteq \underline{\underline{69\mu m}} \qquad (7.5)$$



Obr. 7.7 DAS u vzorku č.3.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes osm sekundárních větví dendritu L = 582 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.3.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{582}{8-1} \doteq \underline{\underline{83\mu m}} \qquad (7.6)$$

Tab.7.6 Hodnoty DAS u vzorku č.3

Vzorek č.3.2	Samovolné chladnutí	DAS = 69 µm
Vzorek č.3.6	Samovolné chladnutí	DAS = 83 µm

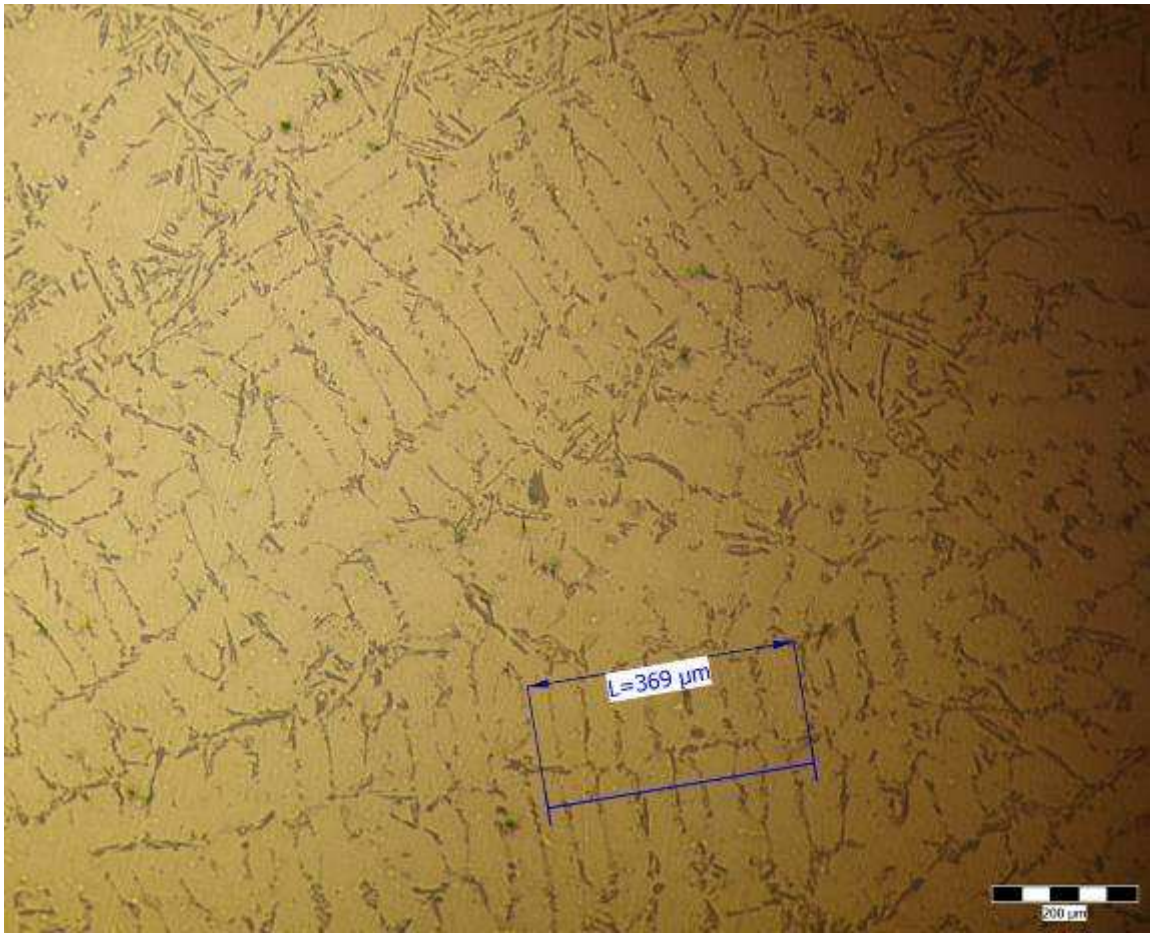
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 3.2 a 3.6 bylo zjištěno, že při samovolném chladnutí teplé skořepiny (cca 430 °C) tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.4 Vzorek č.4

U odlitku, ze kterého byly vzorky 4.2 a 4.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.7 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.4

Licí teplota slitiny	710 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 230 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	1 min
Rychlost spouštění	0,005 m/s

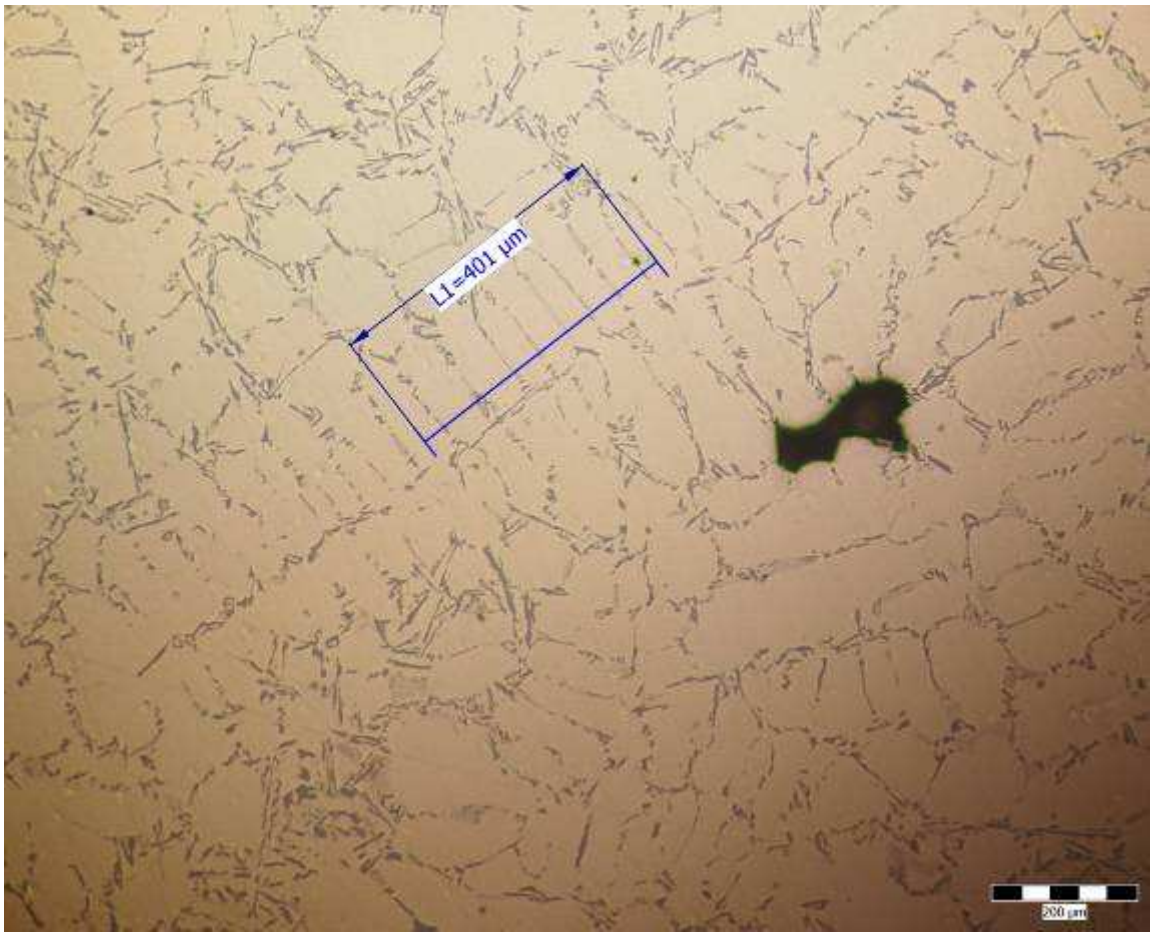


Obr. 7.8 DAS u vzorku č.4.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 369 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.4.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{369}{9-1} \doteq \underline{\underline{46\mu m}} \qquad (7.7)$$



Obr. 7.9 DAS u vzorku č.4.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 401 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.4.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{401}{9-1} \doteq \underline{\underline{50\mu m}} \qquad (7.8)$$

Tab.7.8 Hodnoty DAS u vzorku č.4

Vzorek č.4.2	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 46 µm
Vzorek č.4.6	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 50 µm

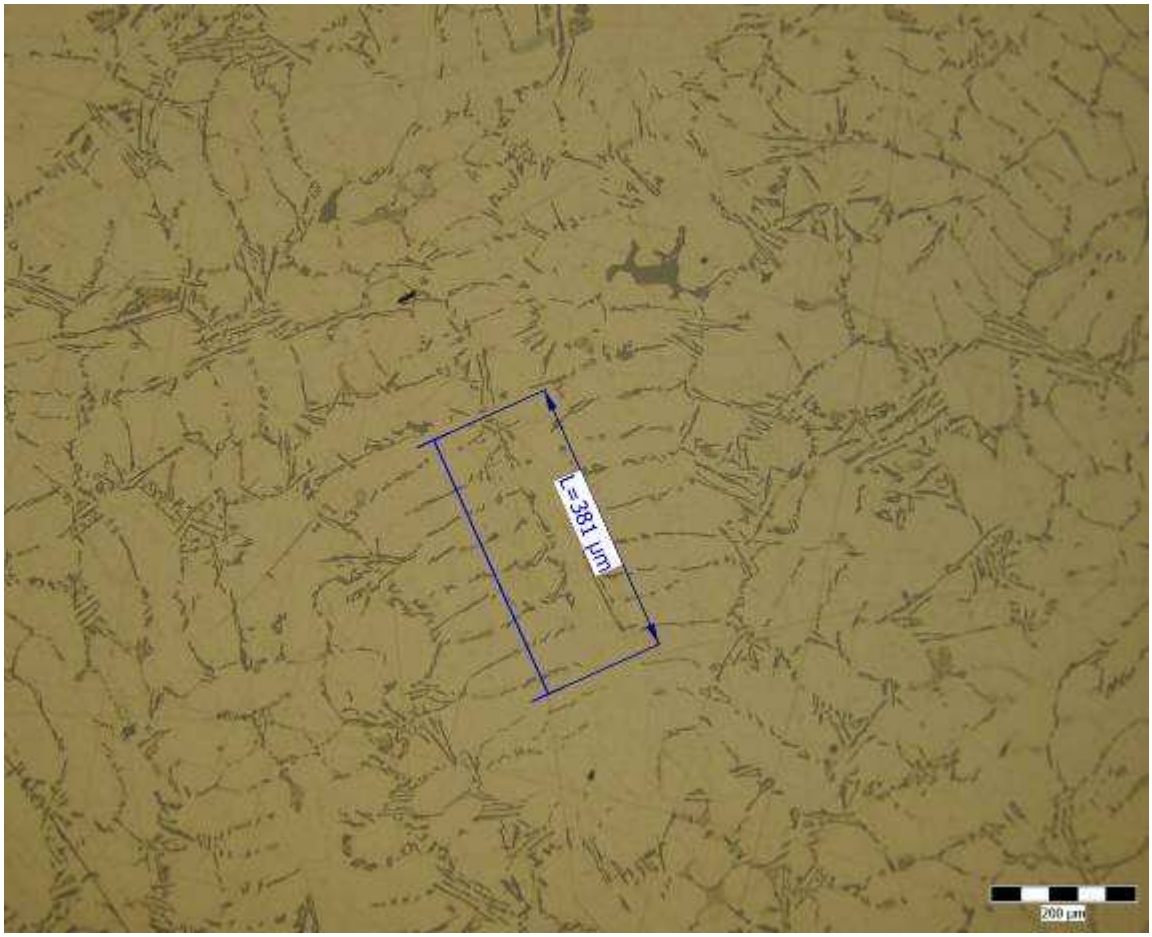
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 4.2 a 4.6 bylo zjištěno, že při chlazení teplé skořepiny (cca 230 °C) proudem vzduchu tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. A také díky řízenému ochlazování od spodku skořepiny. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.5 Vzorek č.5

U odlitku, ze kterého byly vzorky 5.2 a 5.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.9 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.5

Licí teplota slitiny	707 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 290 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	2 min 55 s
Rychlost spouštění	0,002 m/s

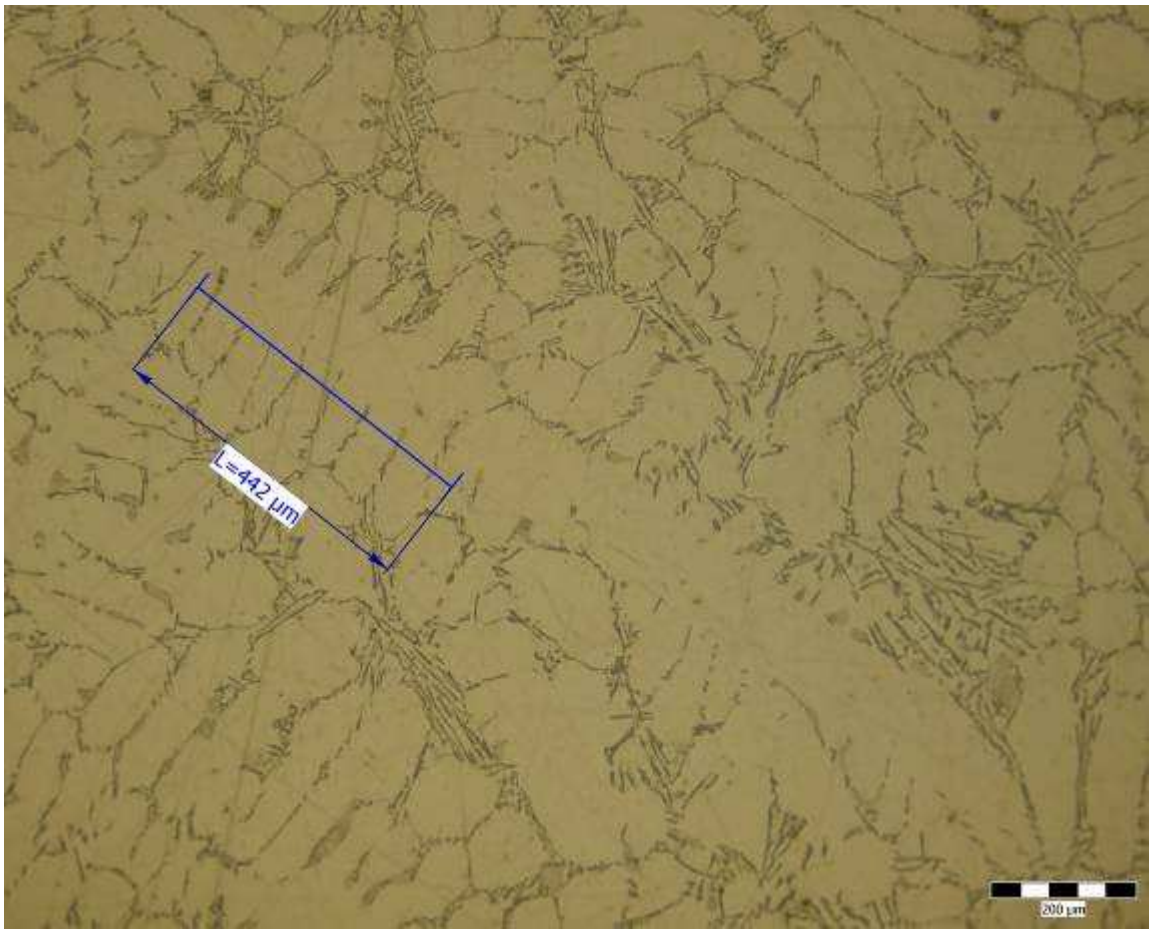


Obr. 7.10 DAS u vzorku č.5.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 381 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.5.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{381}{9-1} \doteq \underline{\underline{48\mu m}} \qquad (7.9)$$



Obr. 7.11 DAS u vzorku č.5.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 442 μm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.5.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{442}{9-1} \doteq \underline{\underline{55\mu m}} \qquad (7.10)$$

Tab.7.10 Hodnoty DAS u vzorku č.5

Vzorek č.5.2	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 48 μm
Vzorek č.5.6	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 55 μm

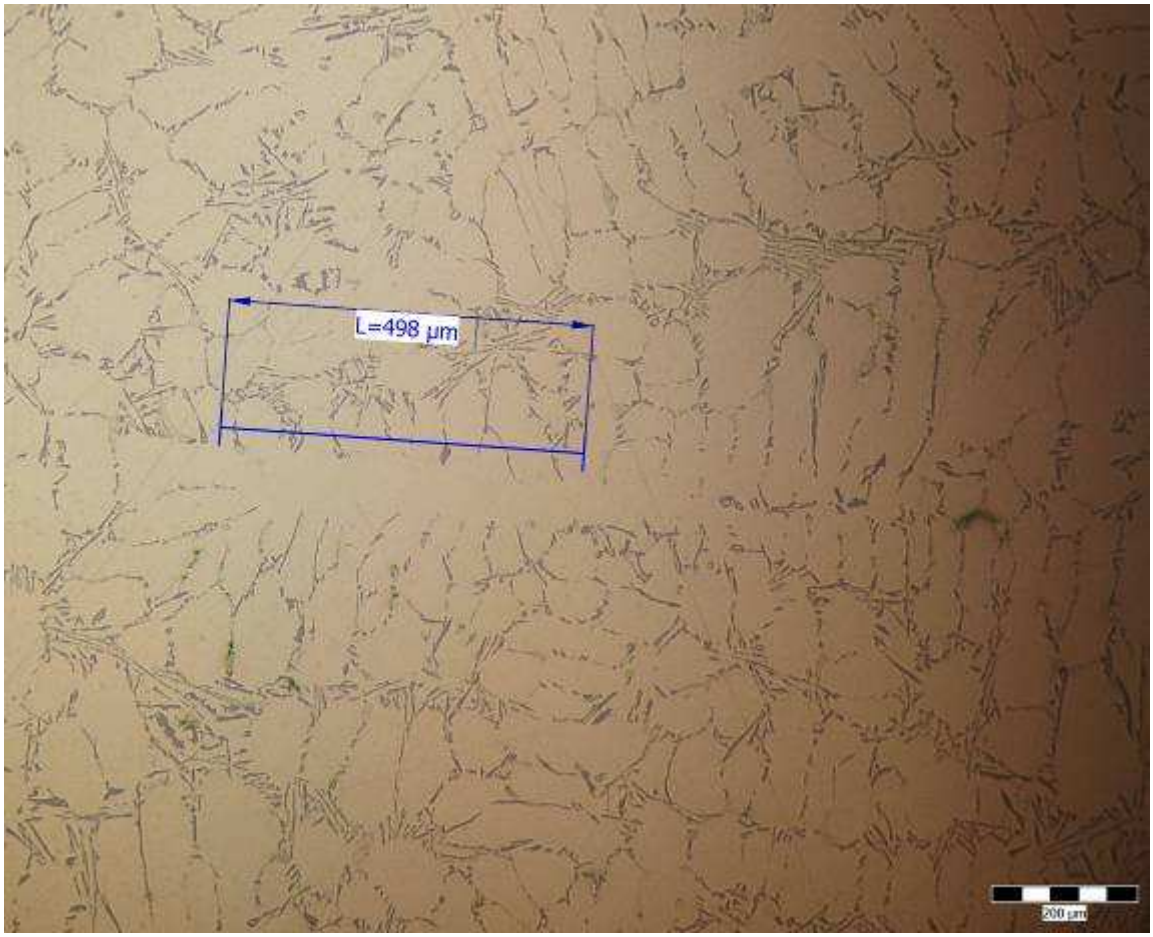
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 5.2 a 5.6 bylo zjištěno, že při chlazení teplé skořepiny (cca 290 °C) proudem vzduchu tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. A také díky řízenému ochlazování od spodku skořepiny. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.6 Vzorek č.6

U odlitku, ze kterého byly vzorky 6.2 a 6.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.11 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.6

Licí teplota slitiny	703 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	4 min 25 s
Rychlost spouštění	0,001 m/s

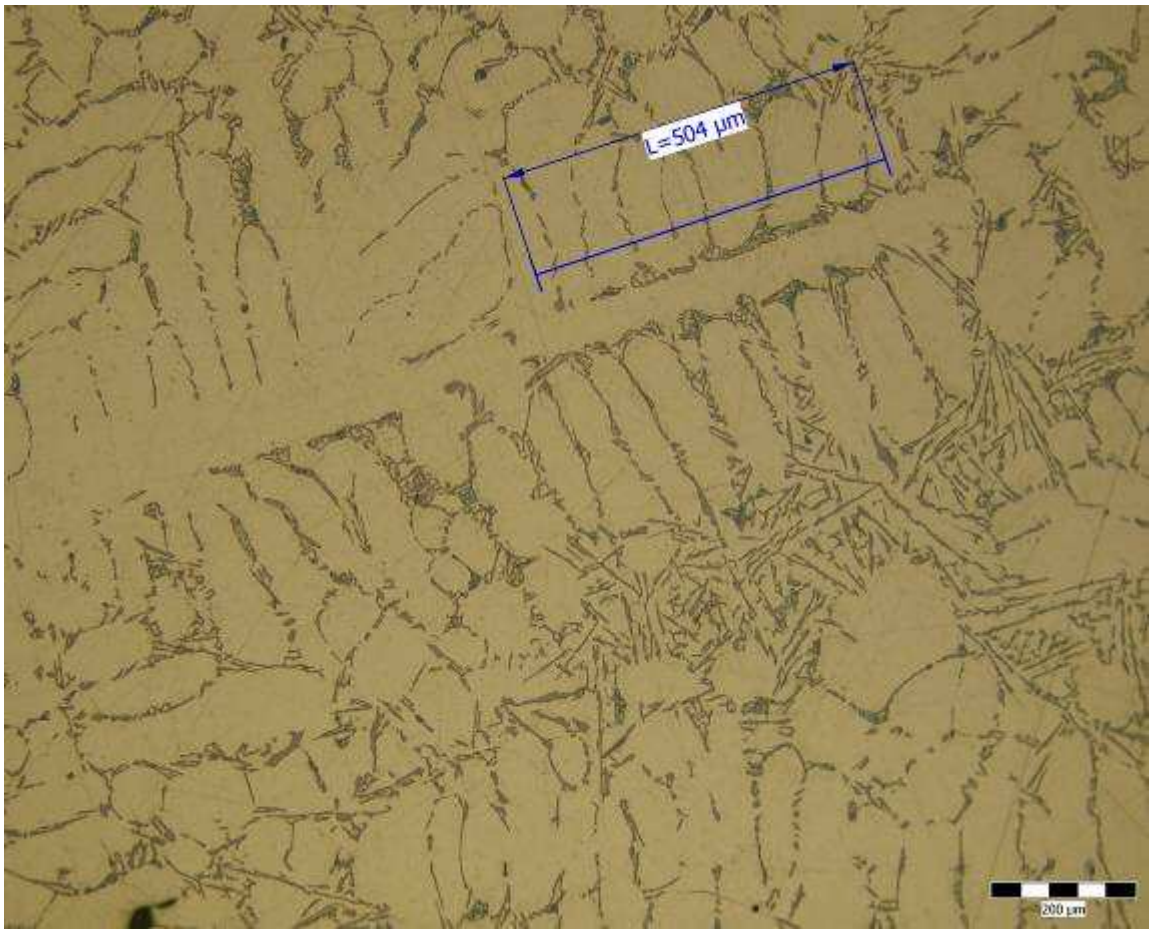


Obr. 7.12 DAS u vzorku č.6.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes deset sekundárních větví dendritu L = 498 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.6.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{498}{10-1} \doteq \underline{\underline{55\mu m}} \qquad (7.11)$$



Obr. 7.13 DAS u vzorku č.6.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 504 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.6.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{504}{9-1} \doteq \underline{\underline{63\mu m}} \qquad (7.12)$$

Tab.7.12 Hodnoty DAS u vzorku č.6

Vzorek č.6.2	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 55 µm
Vzorek č.6.6	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 63 µm

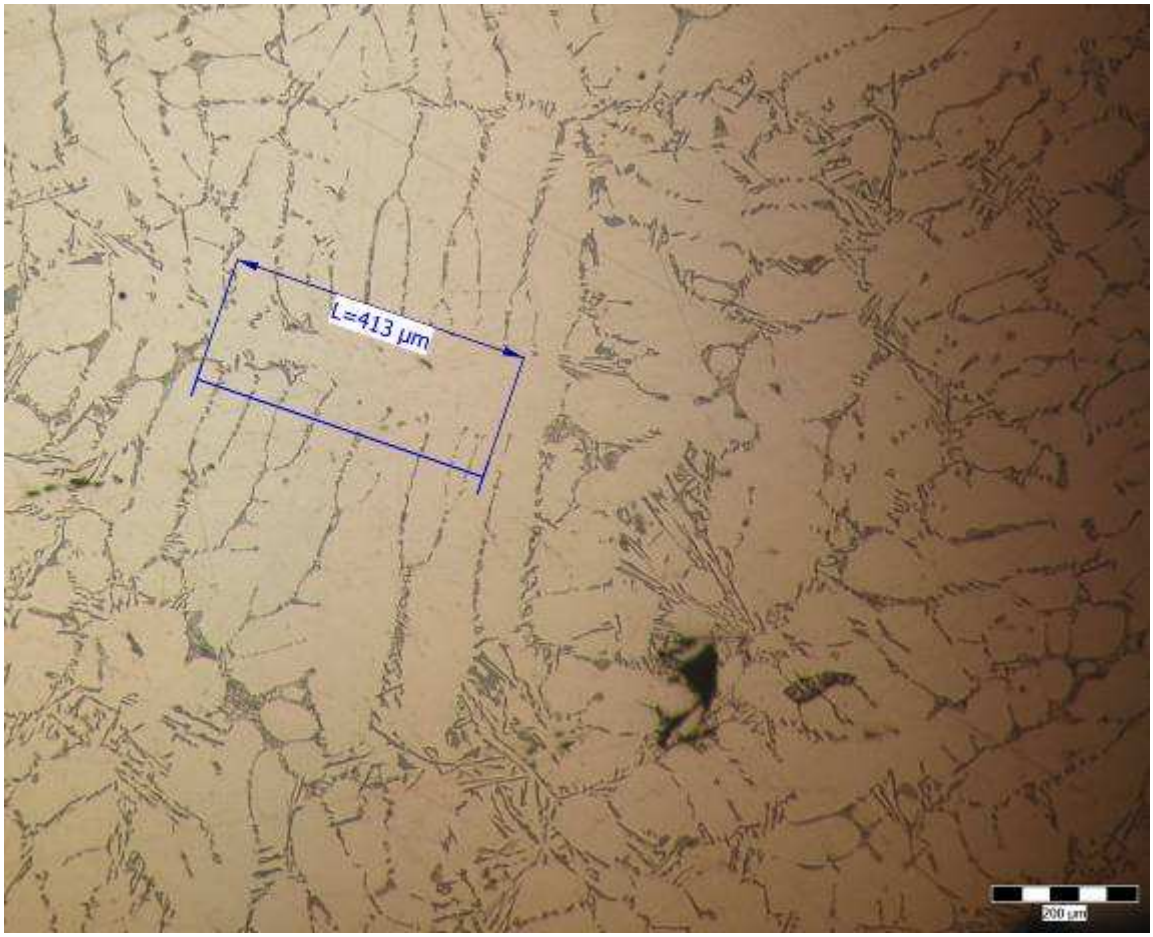
Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 6.2 a 6.6 bylo zjištěno, že při chlazení teplé skořepiny (cca 430 °C) proudem vzduchu tuhne slitina ve spodní části odlitku rychleji než v horní části. Je to způsobeno díky vtoku s funkcí nálitku, který dosazuje kov do odlitku během tuhnutí a sám tuhne jako poslední. A také díky řízenému ochlazování od spodku skořepiny. Díky tomu jsou ovlivněny vzdálenosti sekundárních os dendritů a tedy i hodnoty DAS. Čím je totiž rychlejší chladnutí slitiny, tím jsou vzdálenosti sekundárních os menší a je menší i hodnota DAS.

7.2.7 Vzorek č.7

U odlitku, ze kterého byly vzorky 7.2 a 7.6 získány, byly nastaveny počáteční podmínky pro ochlazování následovně:

Tab.7.13 Počáteční podmínky odlévaní a chladnutí odlitku č.7

Licí teplota slitiny	703 °C
Teplota skořepiny	Teplá skořepina 430 °C
Způsob ochlazování	Proudem vzduchu
Regulátor tlaku	$1{,}3.10^5$ Pa
Průtokoměr	22 PSI
Doba spouštění	4 min 25 s
Rychlost spouštění	0,001 m/s

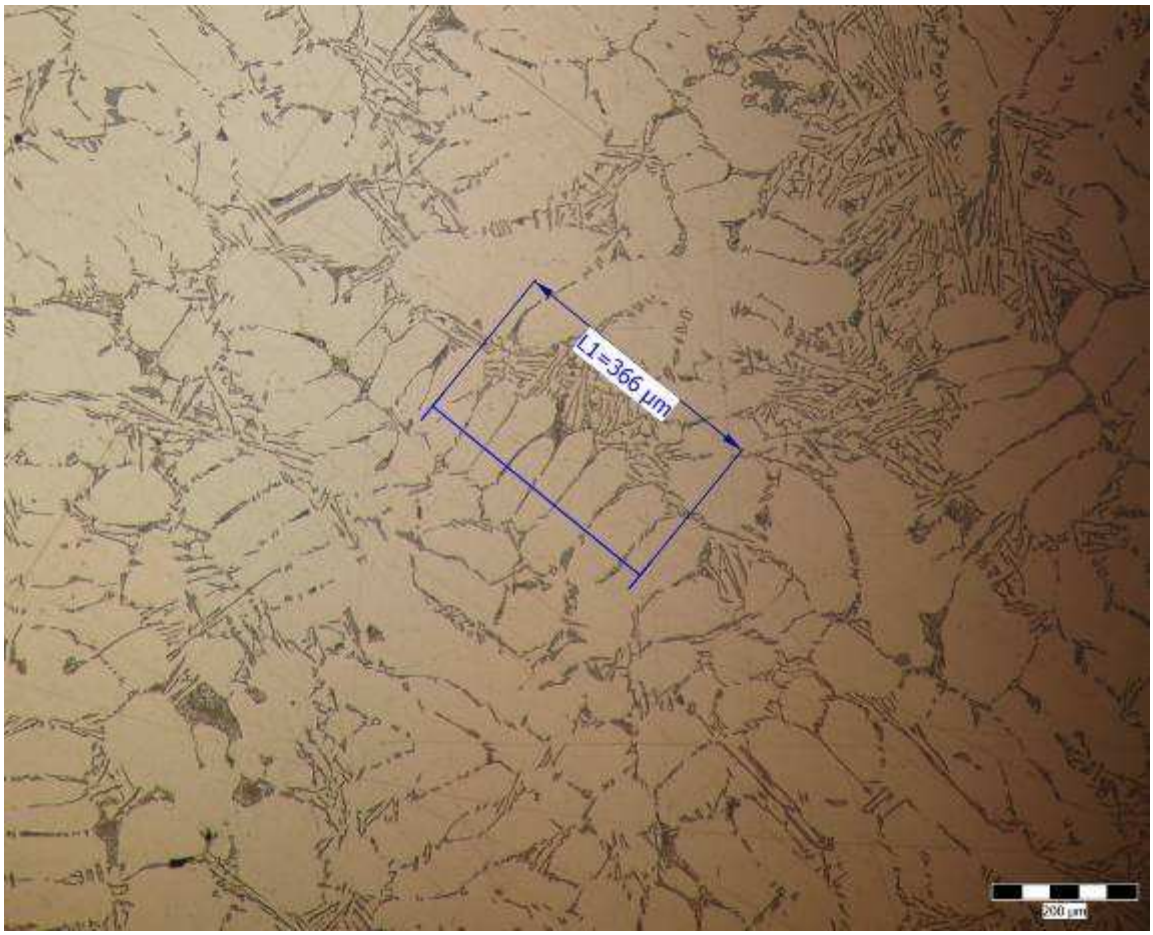


Obr. 7.14 DAS u vzorku č.7.2, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes deset sekundárních větví dendritu L = 413 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.7.2:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{413}{10-1} \doteq \underline{\underline{46\mu m}} \qquad (7.13)$$



Obr. 7.15 DAS u vzorku č.7.6, zvětšení 100x

Byla naměřena vzdálenost přes devět sekundárních větví dendritu L = 366 µm.

Výpočet hodnoty DAS vzorku č.7.6:

$$DAS = \frac{L}{n-1} = \frac{366}{9-1} \doteq \underline{\underline{46\mu m}} \qquad (7.14)$$

Tab.7.14 Hodnoty DAS u vzorku č.7

Vzorek č.7.2	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 46 µm
Vzorek č.7.6	Chlazení proudem vzduchu	DAS = 46 µm

Při porovnání hodnot DAS naměřených u vzorků označených jako 7.2 a 7.6 bylo zjištěno, že při chlazení teplé skořepiny (cca 430 °C) proudem vzduchu tuhne slitina ve spodní části odlitku stejně jako v horní části.

7.2.8 Porovnání DAS jednotlivých vzorků

Z naměřených hodnot DAS u jednotlivých vzorků označených jako x.2 a x.6, které se nacházely ve spodní a střední části experimentálního odlitku, byly sestaveny tabulky, ve kterých se porovnává hodnota DAS v závislosti na teplotě skořepiny (studená nebo teplá skořepina).

Tab.7.15 Hodnoty DAS u vzorků litých do studené skořepiny cca 20 °C

Vzorek č.1	Vzorek č.1.2	Samovolné chlazení	DAS = 53 μm
	Vzorek č.1.6		DAS = 65 μm
Vzorek č.2	Vzorek č.2.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,003 m/s	DAS = 41 μm
	Vzorek č.2.6		DAS = 58 μm

Z tab.7.15, po porovnání hodnot DAS u vzorků litých do studené skořepiny cca 20 °C, které jsou označeny jako 1.2, 1.6, 2.2 a 2.6, vyplývá že za pomocí ochlazování skořepiny proudem vzduchu se vzdálenost sekundárních os dendritů zmenšila. Toto zmenšení je patrné jak u vzorků x.2 (spodní část experimentálního odlitku) tak u vzorku .x.6 (horní část experimentálního odlitku).

Tab.7.16 Hodnoty DAS u vzorků litých do teplé skořepiny 230–290 °C

Vzorek č.4	Vzorek č.4.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,005 m/s	DAS = 46 μm
	Vzorek č.4.6		DAS = 50 μm
Vzorek č.5	Vzorek č.5.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,002 m/s	DAS = 48 μm
	Vzorek č.5.6		DAS = 55 μm

Z tab.7.16, po porovnání hodnot DAS u vzorků litých do teplé skořepiny v rozmezí cca 230–290 °C, označených jako 4.2, 4.6, 5.2 a 5.6, vyplývá že se hodnota vzdáleností sekundárních os dendritů zmenšila díky rychlejšímu spouštění skořepiny do proudu vzduchu. Protože při rychlejším spouštění skořepiny do proudu vzduchu se chladí větší plocha skořepiny než u pomaleji spouštěné skořepiny. Zmenšení sekundárních os dendritů je patrné jak u vzorku x.2 (spodní část experimentálního odlitku) tak u vzorku x.6 (horní část experimentálního odlitku).

Tab.7.17 Hodnoty DAS u vzorků litých do teplé skořepiny cca 430 °C

Vzorek č.3	Vzorek č.3.2	Samovolné chlazení	DAS = 69 μm
	Vzorek č.3.6		DAS = 83 μm
Vzorek č.6	Vzorek č.6.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak 1,3.10^5 Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,001 m/s	DAS = 55 μm
	Vzorek č.6.6		DAS = 63 μm
Vzorek č.7	Vzorek č.7.2	Chlazení proudem vzduchu Tlak 3.10^5 Pa Malá kapacita průtokoměru Rychlost spouštění 0,0015 m/s	DAS = 46 μm
	Vzorek č.7.6		DAS = 46 μm

Z tab.7.17, po porovnání hodnot DAS u vzorků litých do teplé skořepiny cca 430 °C, označených jako 3.2, 3.6, 6.2, 6.6, 7.2 a 7.6, vyplývá že se hodnota vzdáleností sekundárních os dendritů zmenšila díky ochlazování skořepiny proudem vzduchu. Toto zmenšení je patrné jak u vzorků x.2 (spodní část experimentálního odlitku) tak u vzorku x.6 (horní část experimentálního odlitku). Také je patrné zmenšení sekundárních os dendritů na vzorku 6.2, 6.6, 7.2 a 7.6, kde byl navolen odlišný tlak vzduchu, tzn. že zvýšením tlaku vzduchu se dosáhne menších hodnot DAS.

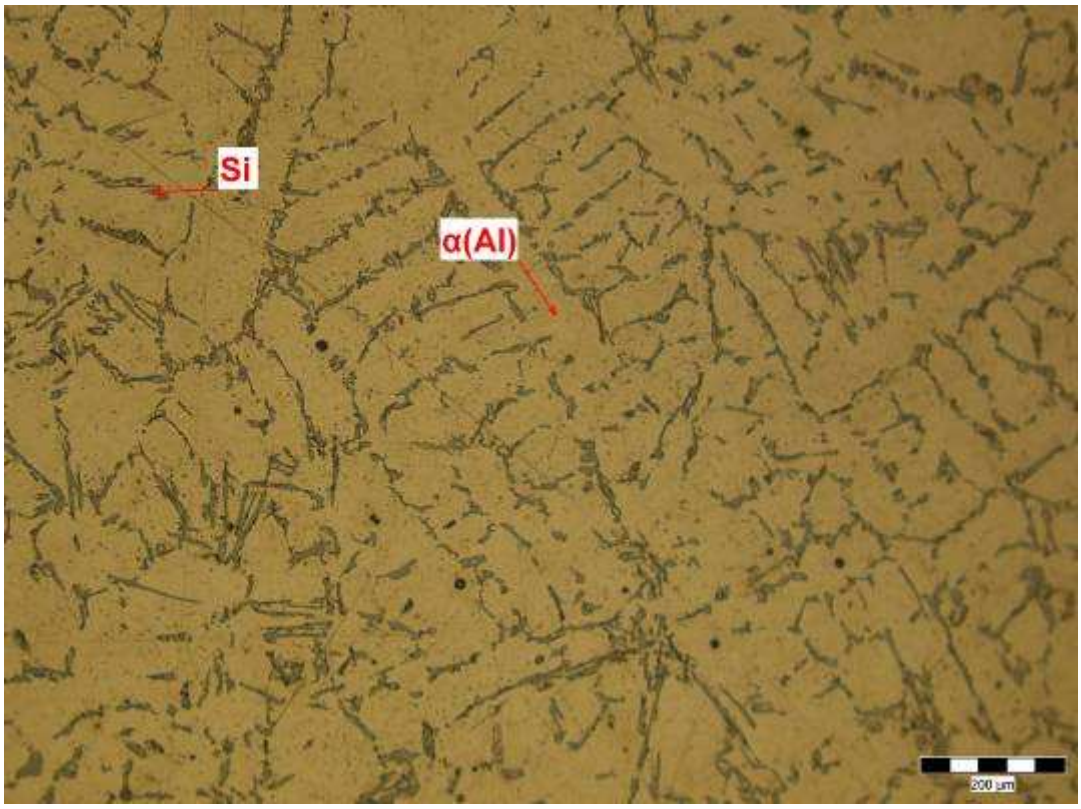
7.3 Vyhodnocení struktury

Struktura byla vyhodnocována na vzorcích označených jako x.2 (spodní část experimentálního vzorku), x.4 (střední část experimentálního vzorku) a x.6 (horní část experimentálního vzorku). Tyto vzorky byly po broušení a leštění, důkladně očištěny etylalkoholem a osušeny. Poté následovalo naleptání 0,5% kyselinou fluorovodíkovou ve vodě (HF). Kyselina byla nalita do Petriho misky a vzorek byl vyleštěnou částí ponořen do kyseliny. Leptadlo bylo potřeba opatrně rozvířit, tím se dosáhlo jednotného vyleptání povrchu. Leptání bylo zastaveno ve chvíli kdy se dosáhlo požadovaného zmatnění povrchu. Poté byl vzorek důkladně očištěn etylalkoholem a vysušen horkým vzduchem.

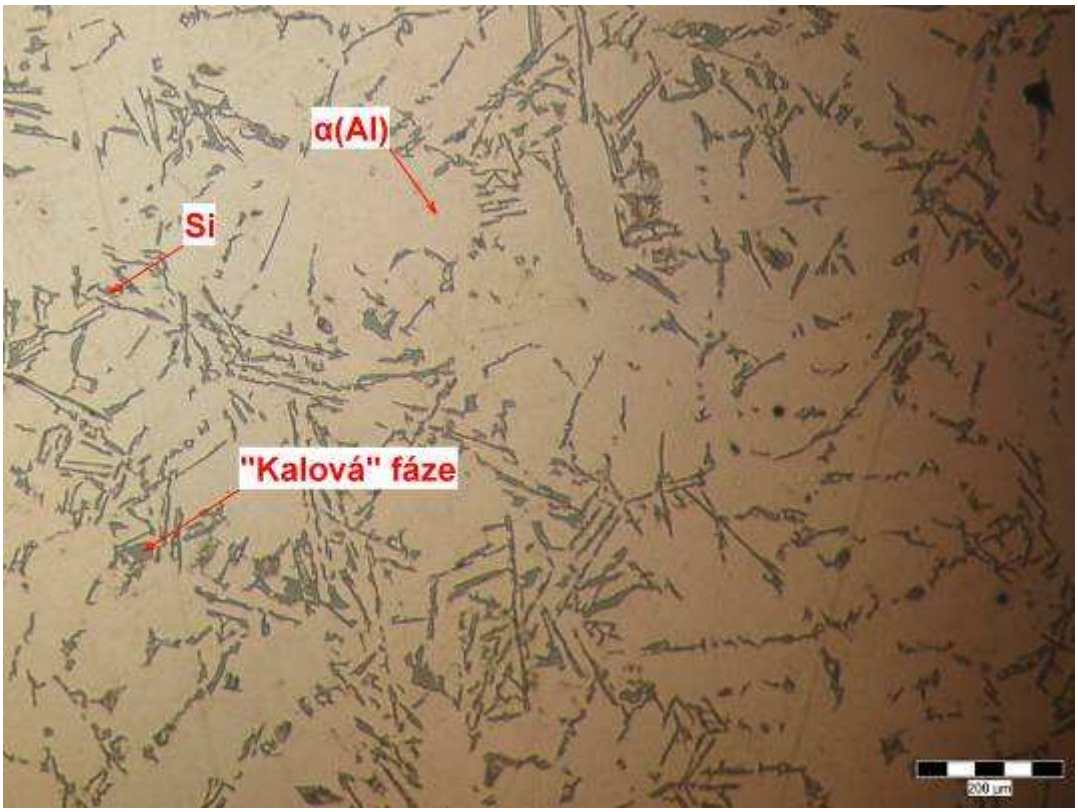
Struktura byla zkoumána na mikroskopu a byla nastavena u všech vzorků velikost zvětšení 100x.

7.3.1 Struktura vzorku č.1

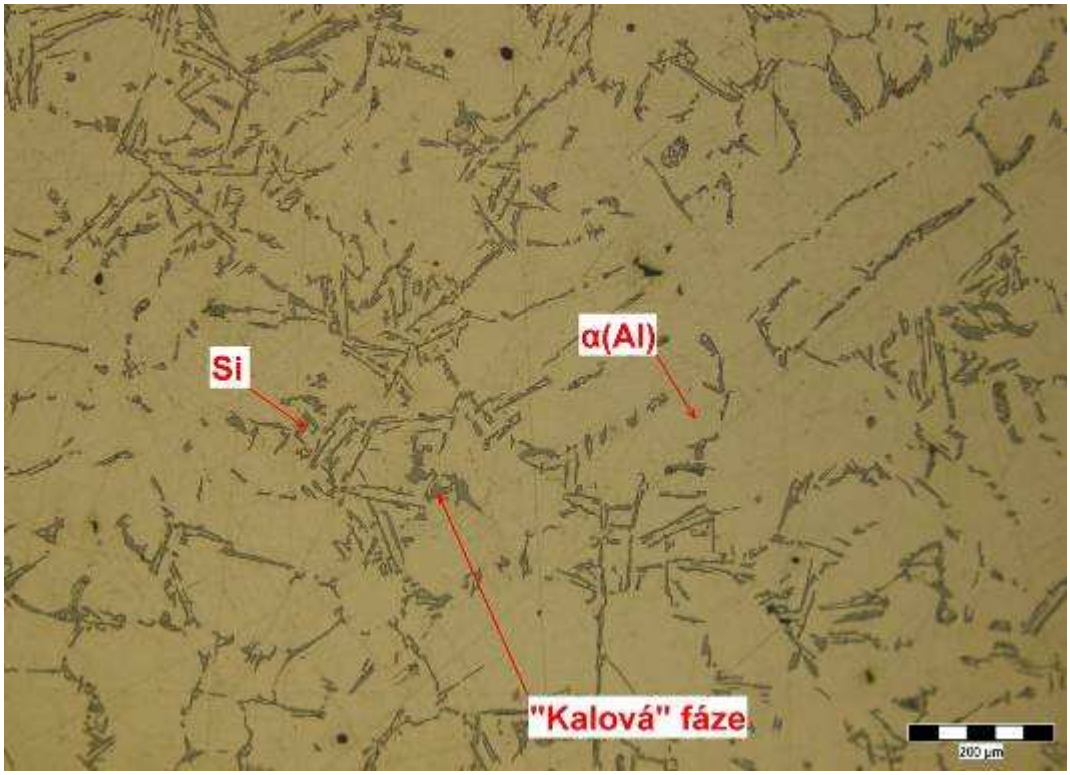
U vzorku č.1 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.1.2, č.1.4 a č.1.6.



Obr. 7.16 Struktura vzorku č.1.2, zvětšení 100x



Obr. 7.17 Struktura vzorku č.1.4, zvětšení 100x



Obr. 7.18 Struktura vzorku č.1.6, zvětšení 100x

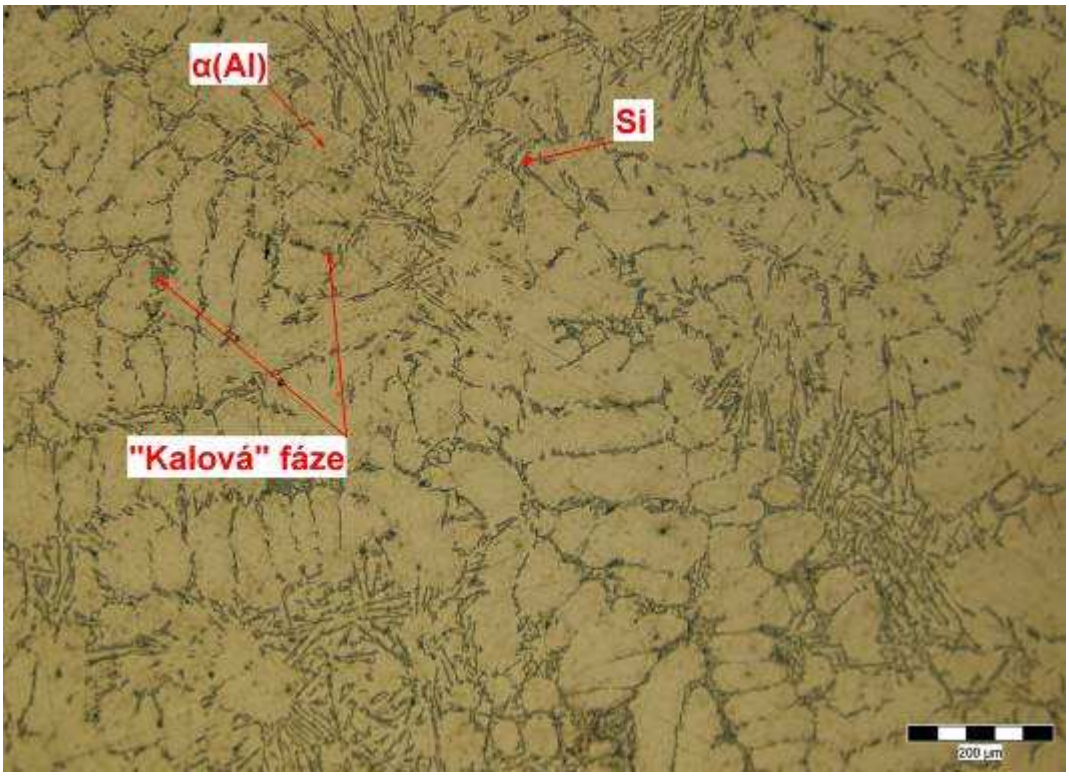
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.1.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.1.4 v jeho středu a vzorek č.1.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do studené skořepiny a chladl samovolně na vzduchu.

U vzorku č.1 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

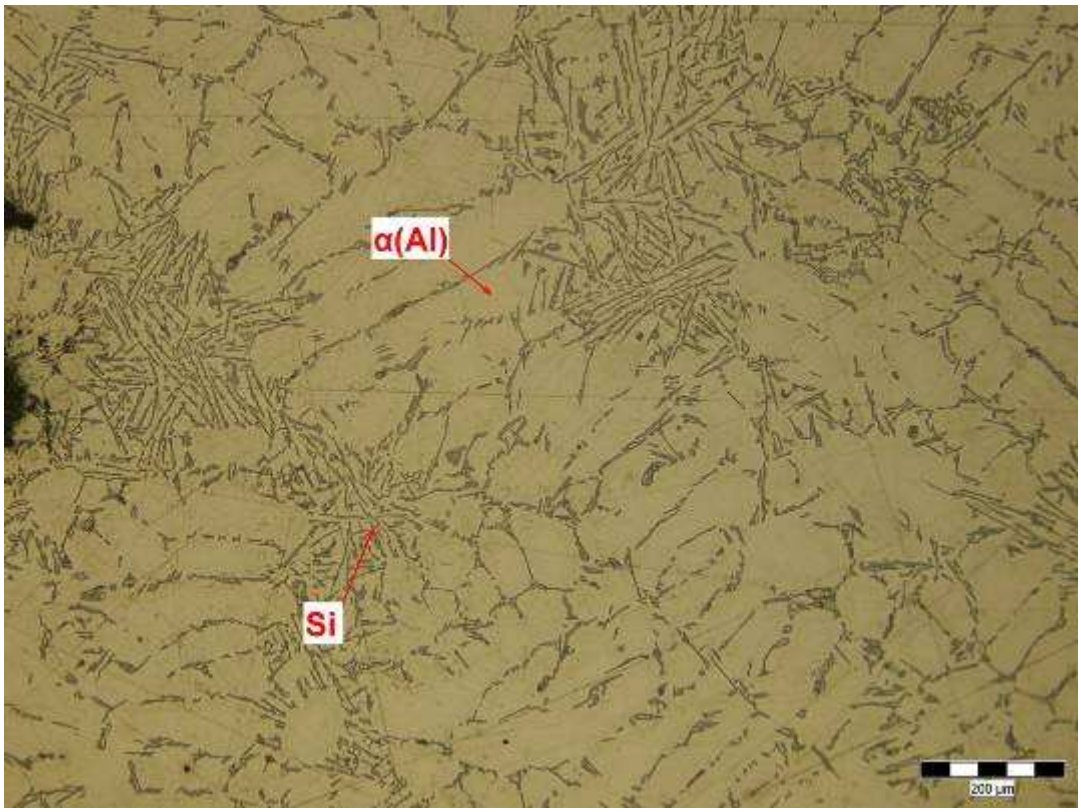
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je zrnité, tzn. že křemík tvoří hrubé lamely nebo polyedrická zrna
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.2 Struktura vzorku č.2

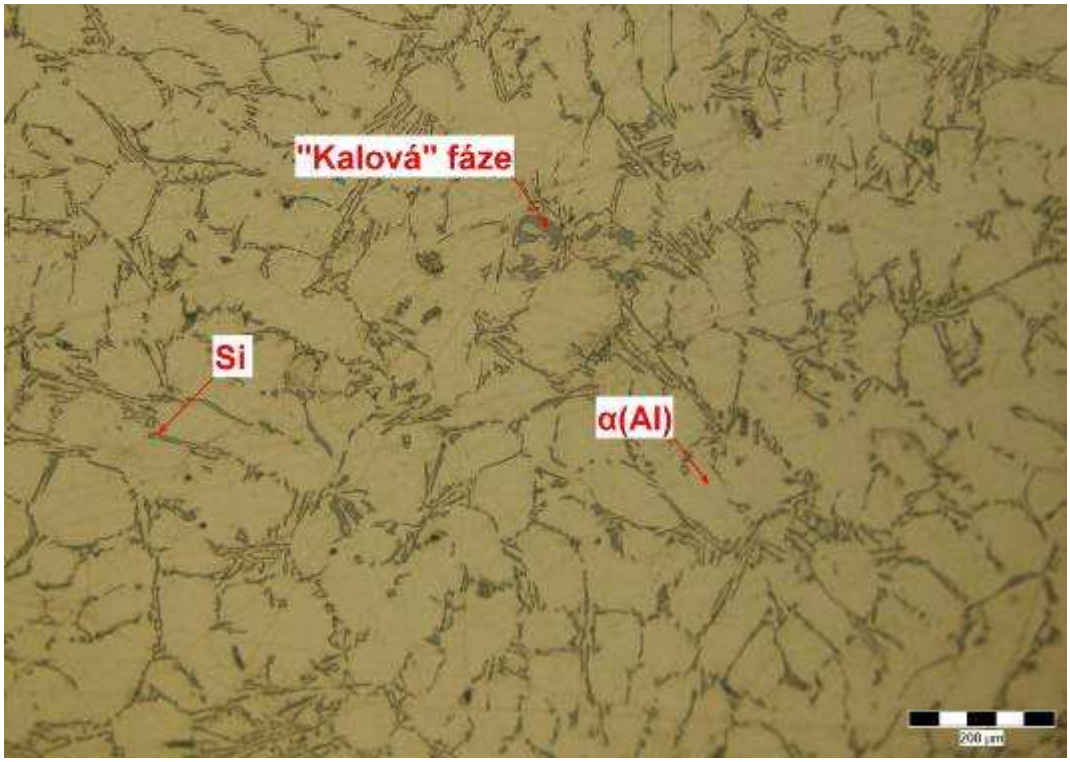
U vzorku č.2 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.2.2, č.2.4 a č.2.6.



Obr. 7.19 Struktura vzorku č.2.2, zvětšení 100x



Obr. 7.20 Struktura vzorku č.2.4, zvětšení 100x



Obr. 7.21 Struktura vzorku č.2.6, zvětšení 100x

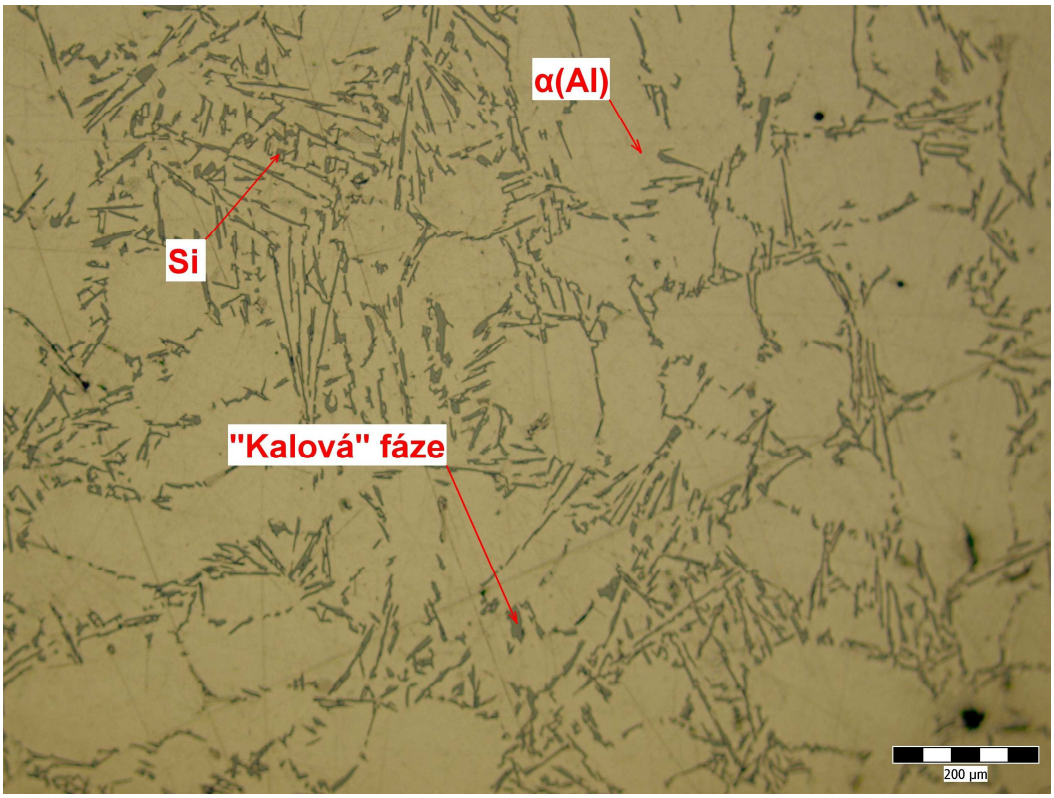
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.2.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.2.4 v jeho středu a vzorek č.2.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do teplé skořepiny cca 430 °C a byl chlazen proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 1 min 25 s).

U vzorku č.2 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

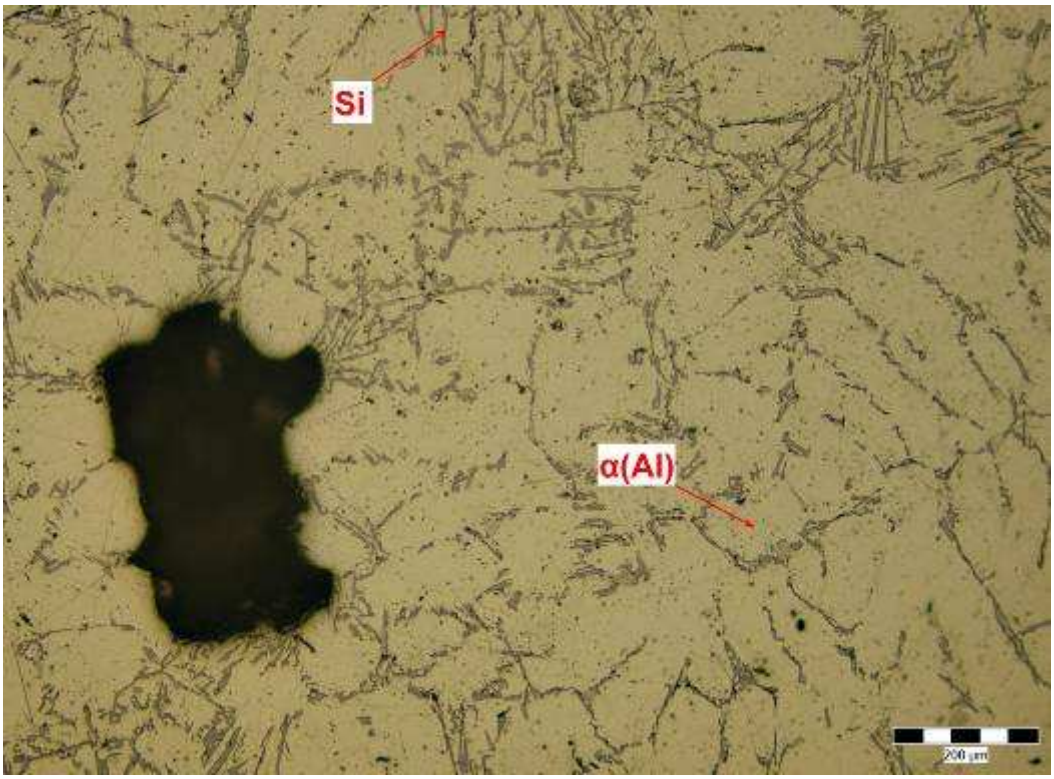
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je lamelární, tzn. že křemík tvoří jemné lamely
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.3 Struktura vzorku č.3

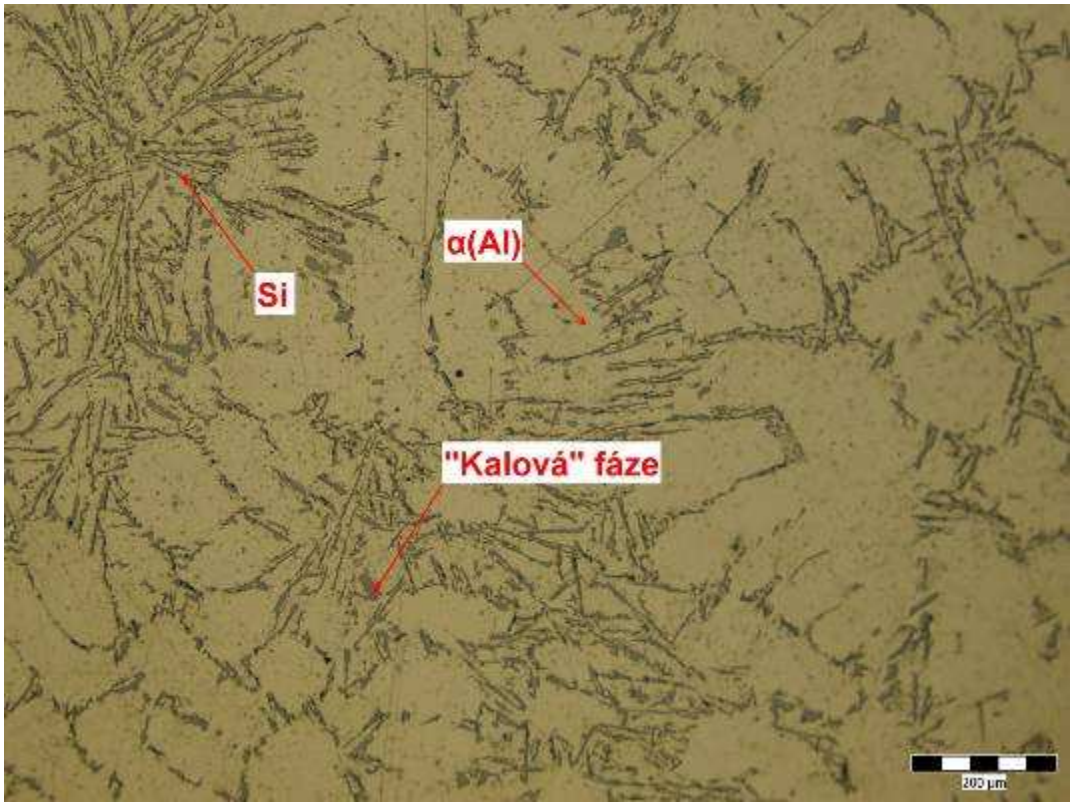
U vzorku č.3 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.3.2, č.3.4 a č.3.6.



Obr. 7.22 Struktura vzorku č.3.2, zvětšení 100x



Obr. 7.23 Struktura vzorku č.3.4, zvětšení 100x



Obr. 7.24 Struktura vzorku č.3.6, zvětšení 100x

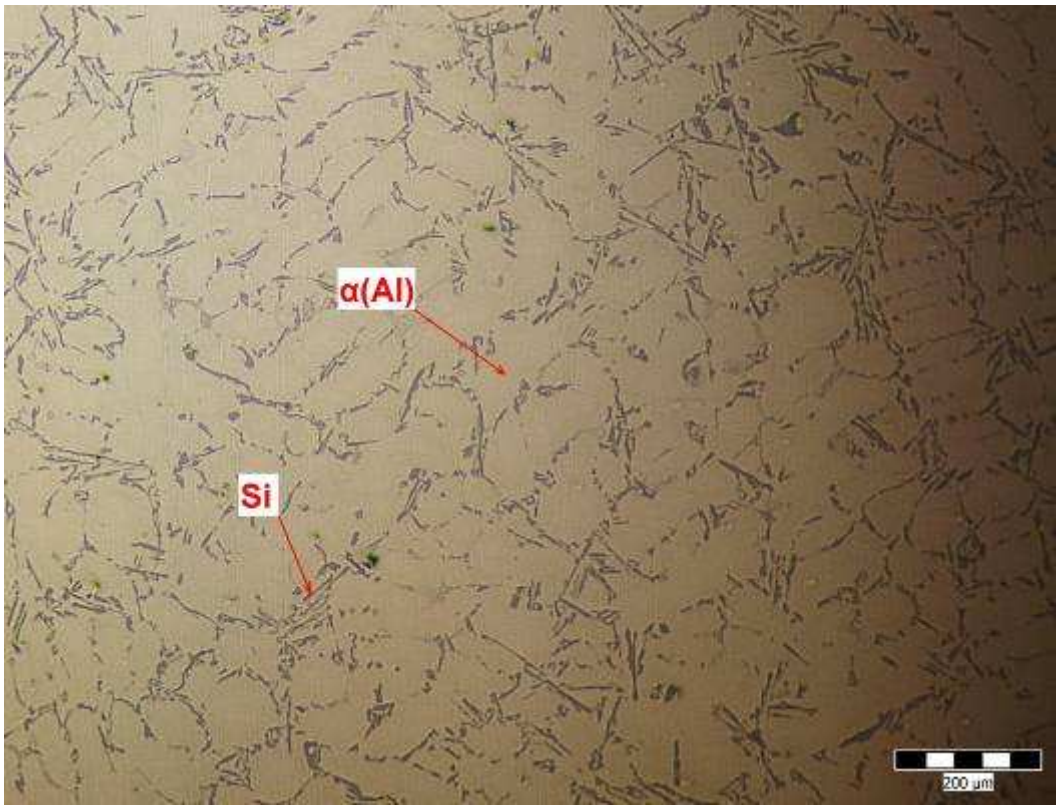
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.3.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.3.4 v jeho středu a vzorek č.3.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do studené skořepiny a chladl samovolně na vzduchu.

U vzorku č.3 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

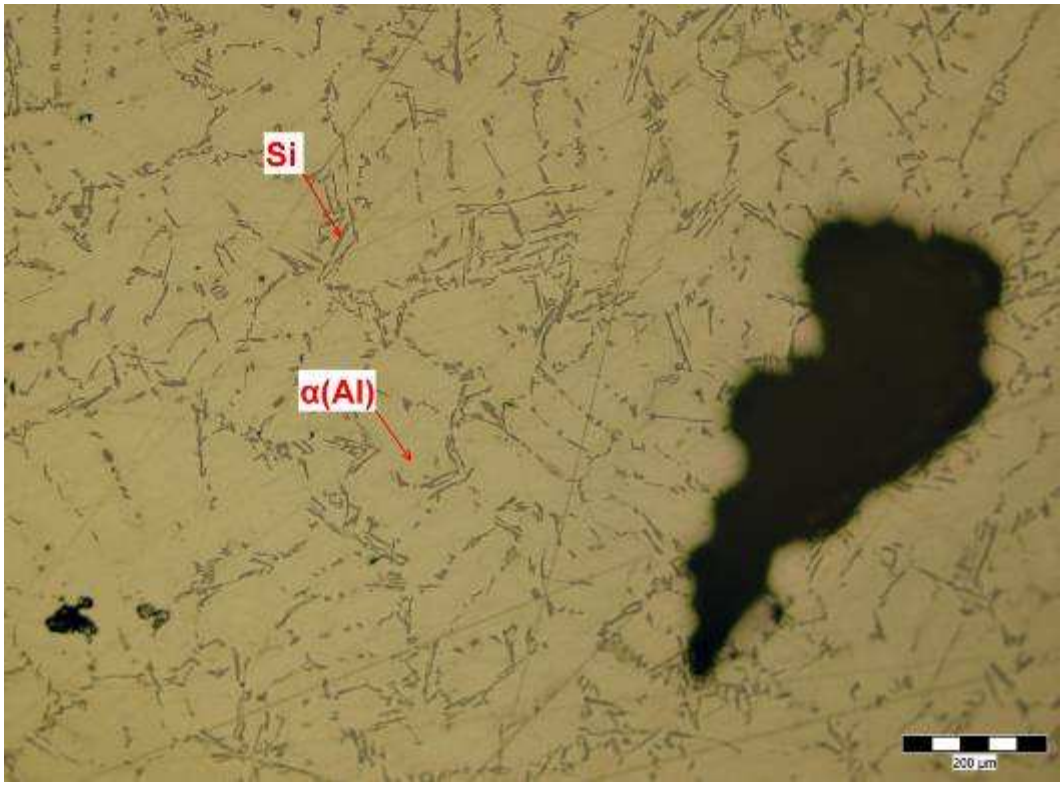
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je lamelární, tzn. že křemík tvoří jemné lamely
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.4 Struktura vzorku č.4

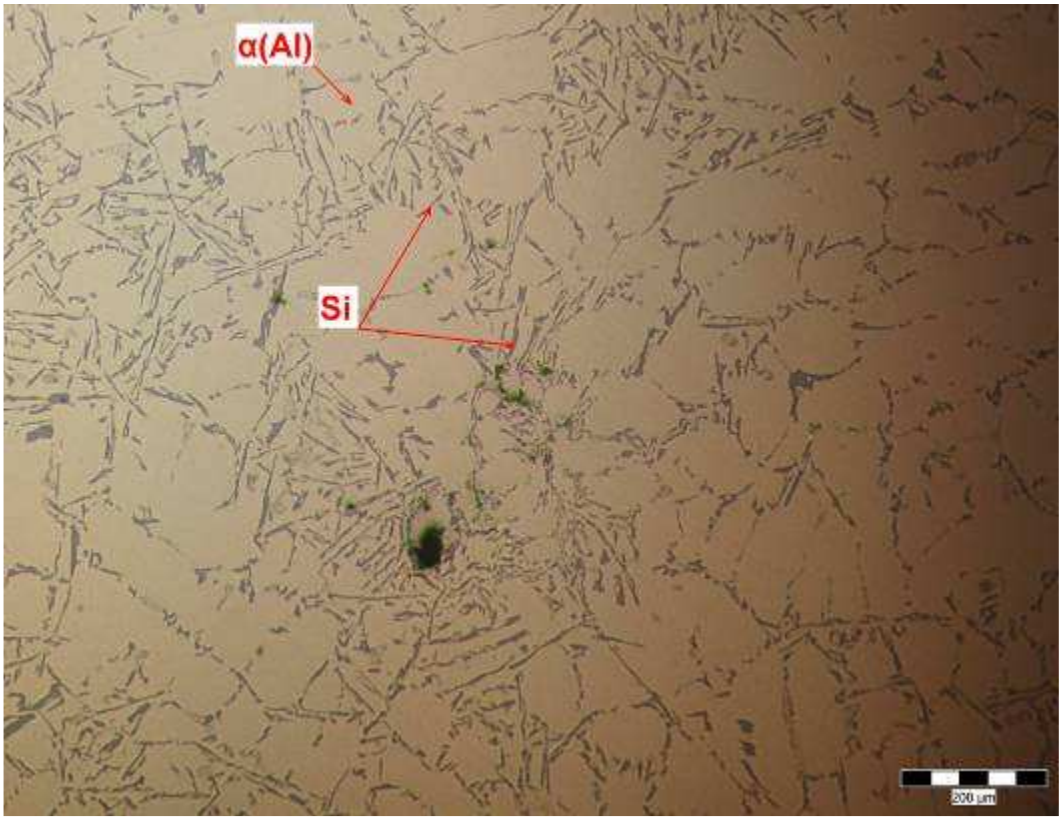
U vzorku č.4 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.4.2, č.4.4 a č.4.6.



Obr. 7.25 Struktura vzorku č.4.2, zvětšení 100x



Obr. 7.26 Struktura vzorku č.4.4, zvětšení 100x



Obr. 7.27 Struktura vzorku č.4.6, zvětšení 100x

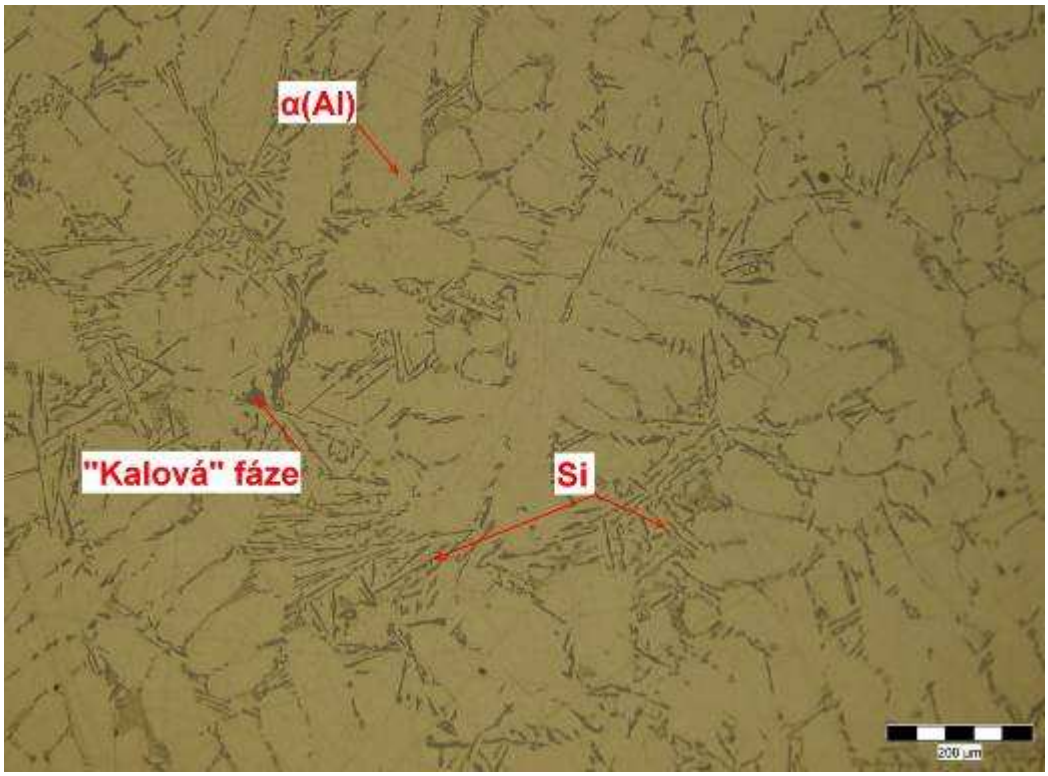
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.4.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.4.4 v jeho středu a vzorek č.4.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do teplé skořepiny cca 230 °C a byl chlazen proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 1 min).

U vzorku č.4 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

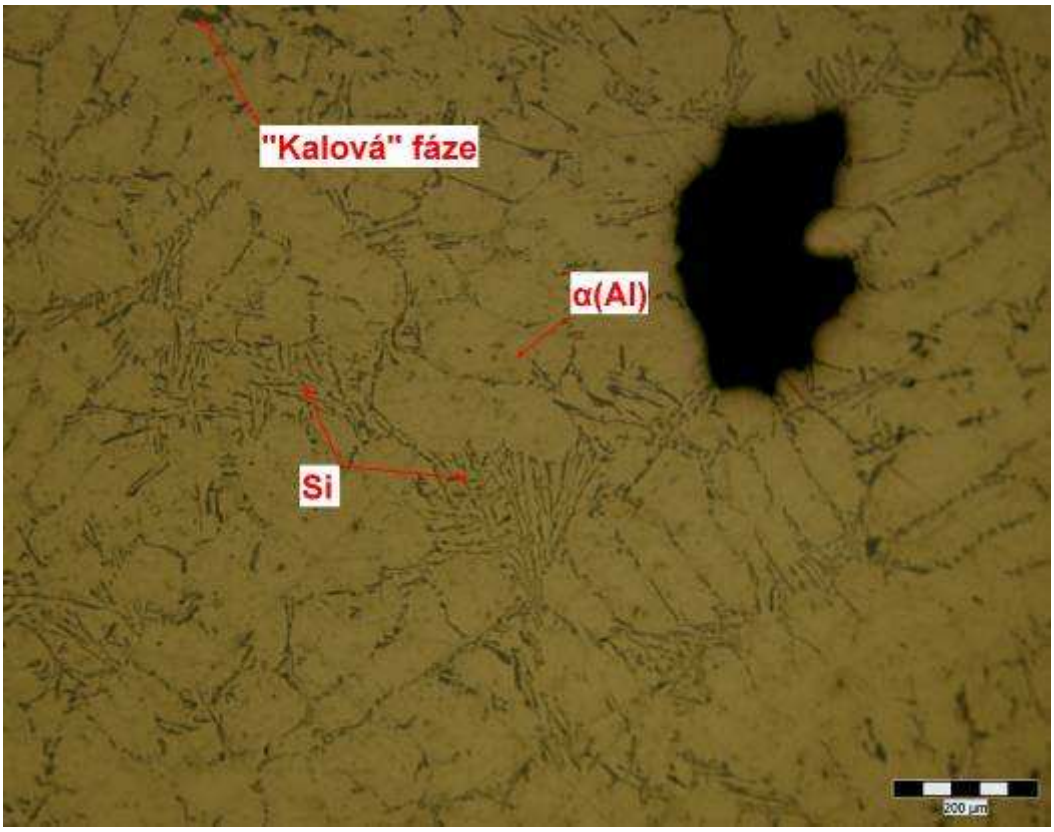
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je zrnité, tzn. že křemík tvoří hrubé lamely nebo polyedrická zrna
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.5 Struktura vzorku č.5

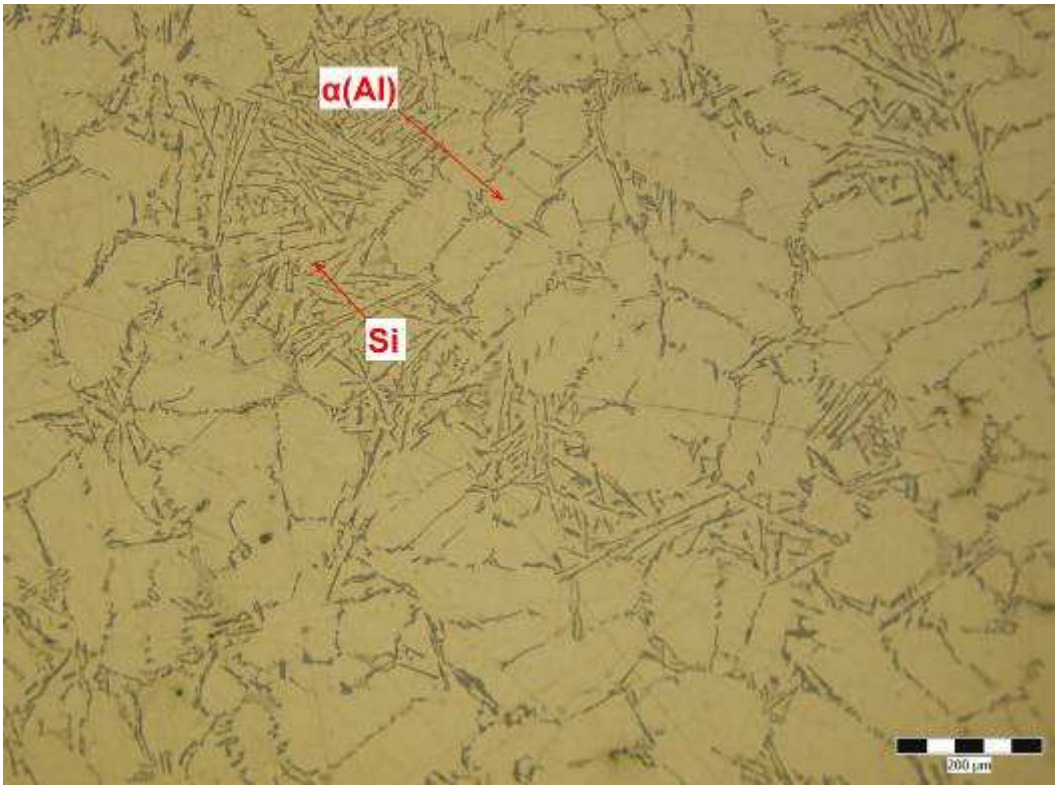
U vzorku č.5 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.5.2, č.5.4 a č.5.6.



Obr. 7.28 Struktura vzorku č.5.2, zvětšení 100x



Obr. 7.29 Struktura vzorku č.5.4, zvětšení 100x



Obr. 7.30 Struktura vzorku č.5.6, zvětšení 100x

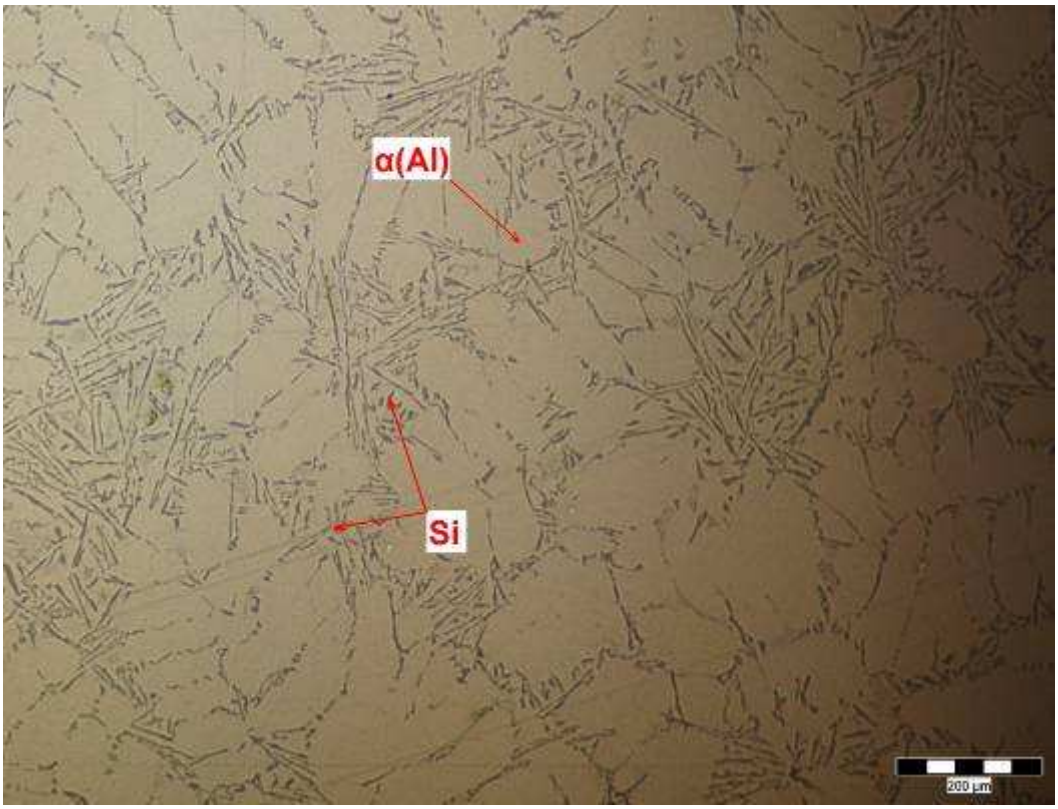
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.5.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.5.4 v jeho středu a vzorek č.5.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do studené skořepiny a byl chlazen proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 2 min 55 s).

U vzorku č.2 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

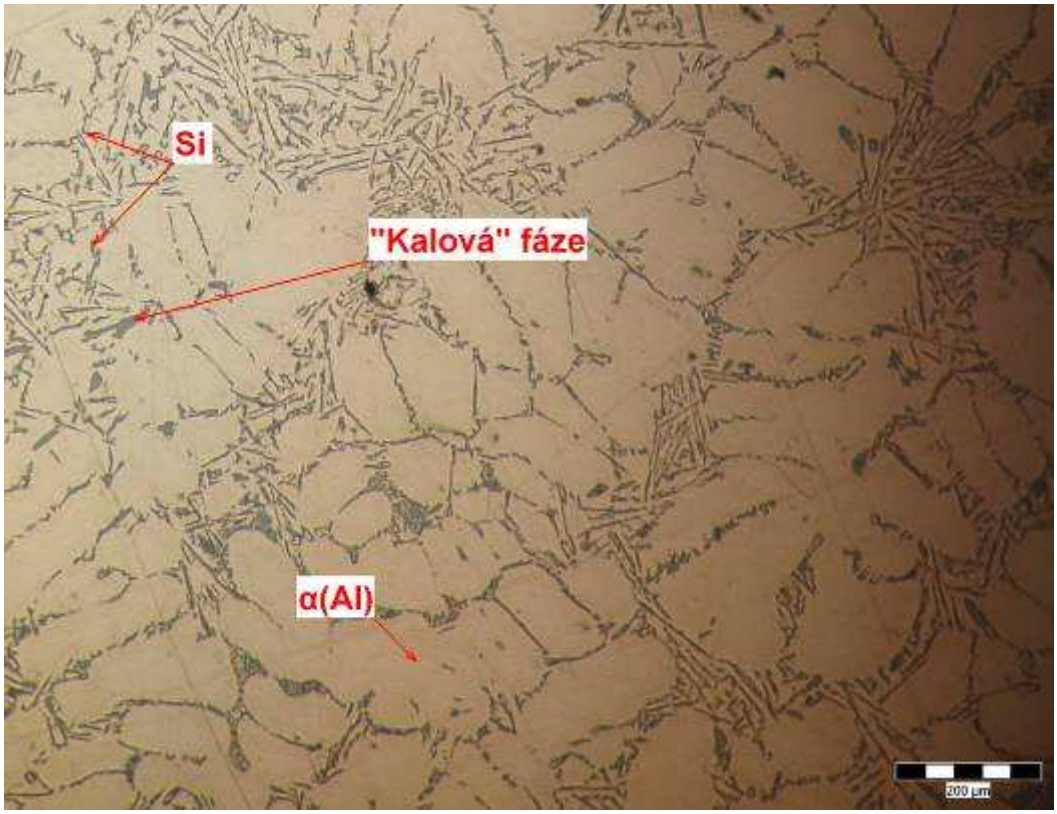
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je lemelární, tzn. že křemík tvoří jemné lamely
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.6 Struktura vzorku č.6

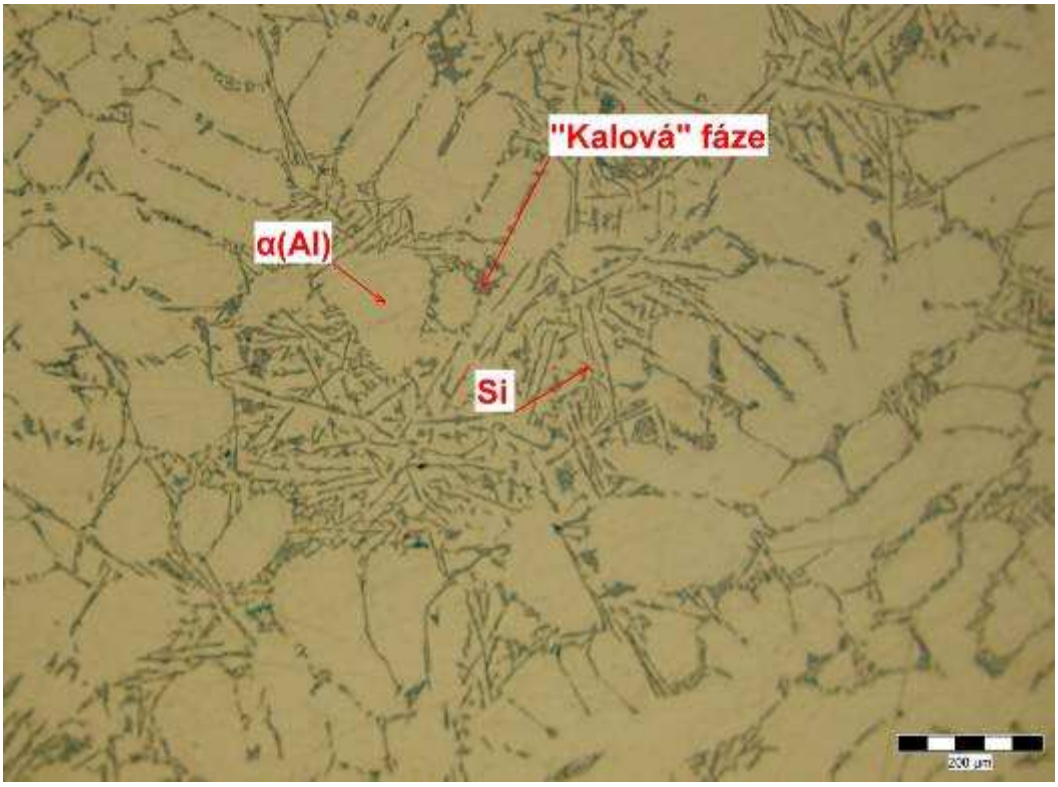
U vzorku č.6 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.6.2, č.6.4 a č.6.6.



Obr. 7.31 Struktura vzorku č.6.2, zvětšení 100x



Obr. 7.32 Struktura vzorku č.6.4, zvětšení 100x



Obr. 7.33 Struktura vzorku č.6.6, zvětšení 100x

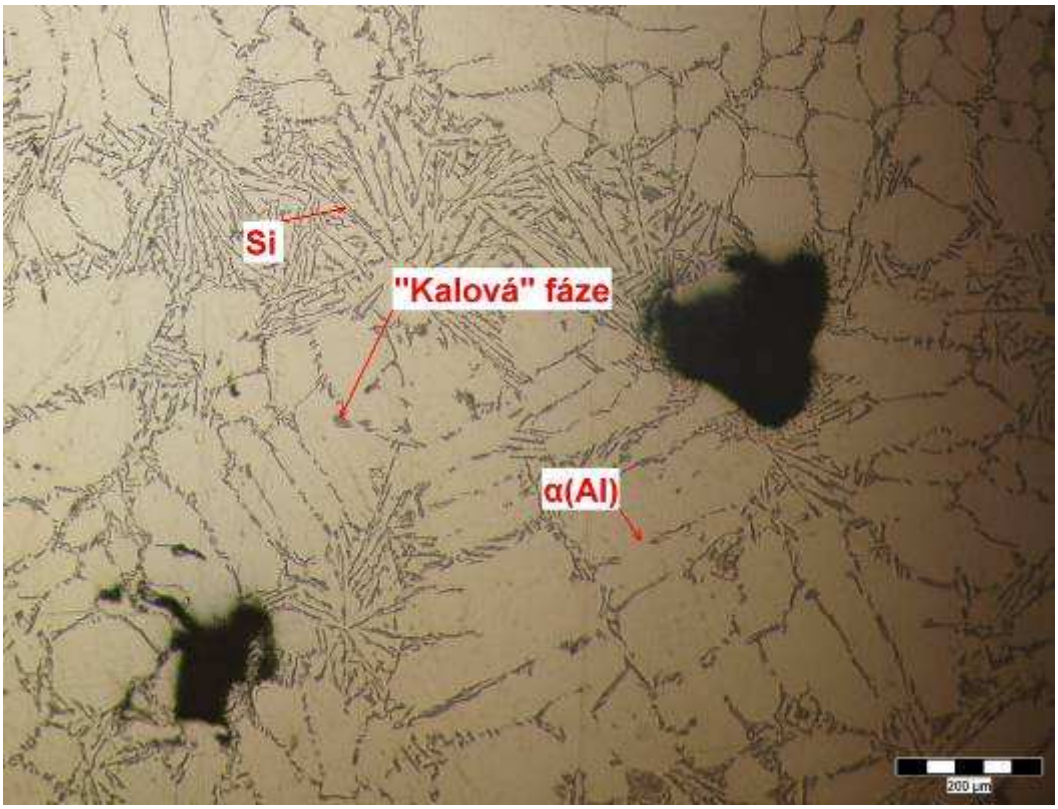
U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.6.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.6.4 v jeho středu a vzorek č.6.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do studené skořepiny a byl chlazen proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 4 min 25 s).

U vzorku č.6 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

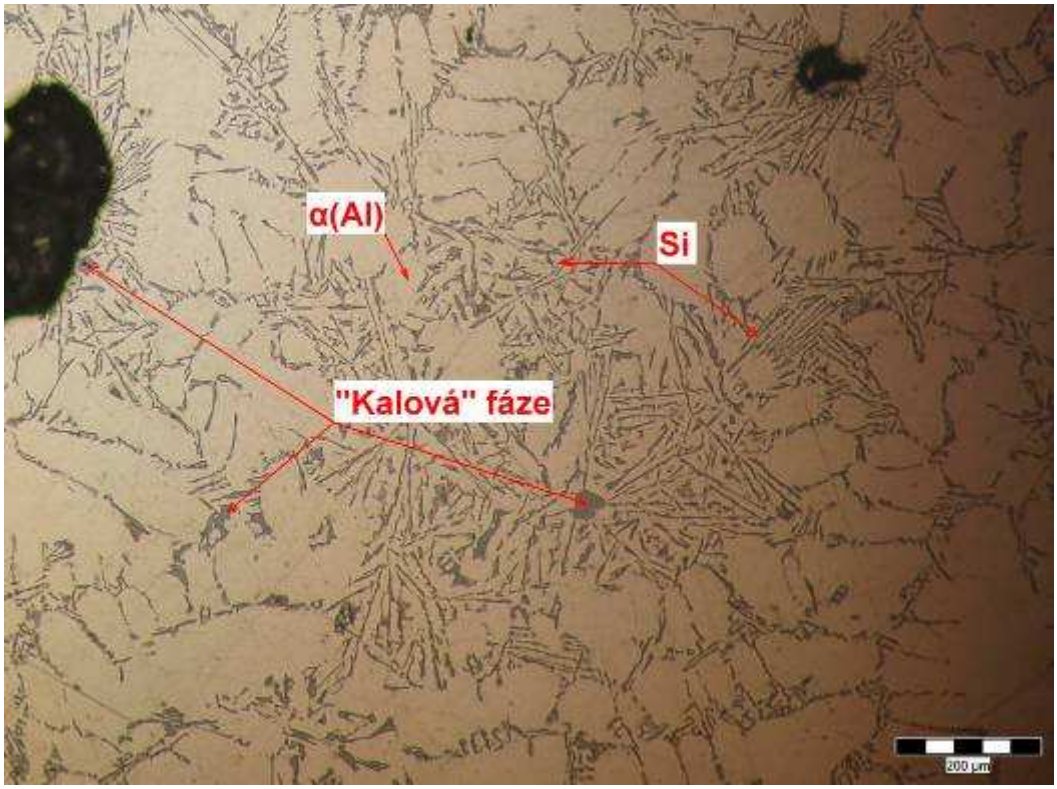
- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je lamelární, tzn. že křemík tvoří jemné lamely
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

7.3.7 Struktura vzorku č.7

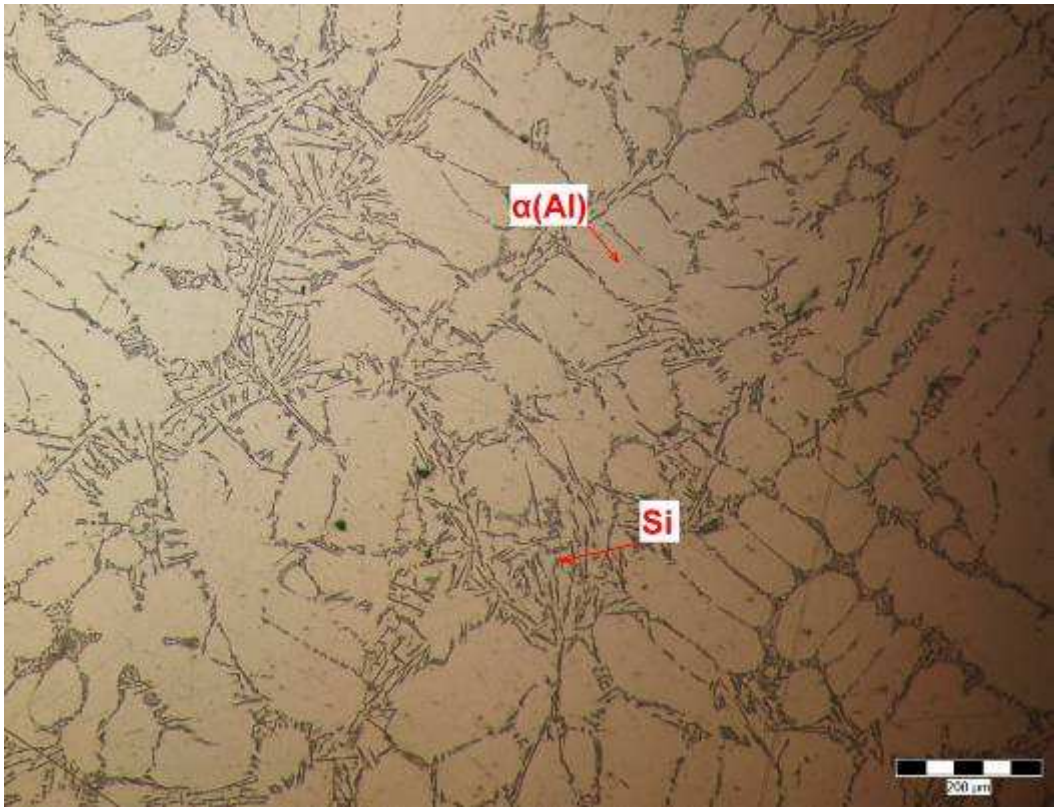
U vzorku č.7 byly zkoumány struktury na vzorcích ve tvaru tablety č.7.2, č.7.4 a č.7.6.



Obr. 7.34 Struktura vzorku č.7.2, zvětšení 100x



Obr. 7.35 Struktura vzorku č.7.4, zvětšení 100x



Obr. 7.36 Struktura vzorku č.7.6, zvětšení 100x

U všech vzorků bylo nastaveno na mikroskopu zvětšení 100x. Vzorek č.7.2 se nacházel ve spodní části experimentálního odlitku, vzorek č.7.4 v jeho středu a vzorek č.7.6 v horní části. Tento experimentální odlitek byl odlit do studené skořepiny a byl chlazen proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok nebyl změřen kvůli nedostatečné kapacitě průtokoměru, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 3 min 15 s).

U vzorku č.7 je z obrázků struktury v jednotlivých částech patrné, že struktura vzorku obsahuje:

- síť primárních dendritů fáze α(Al), která vzniká právě u podeutektických slitin
- eutektikum je tvořeno křemíkem (Si), který je vyloučený v mezidendritických prostorech
- eutektikum je lamelární, tzn. že křemík tvoří jemné lamely
- „kalová“ fáze – intermetalická fáze, která vzniká u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě

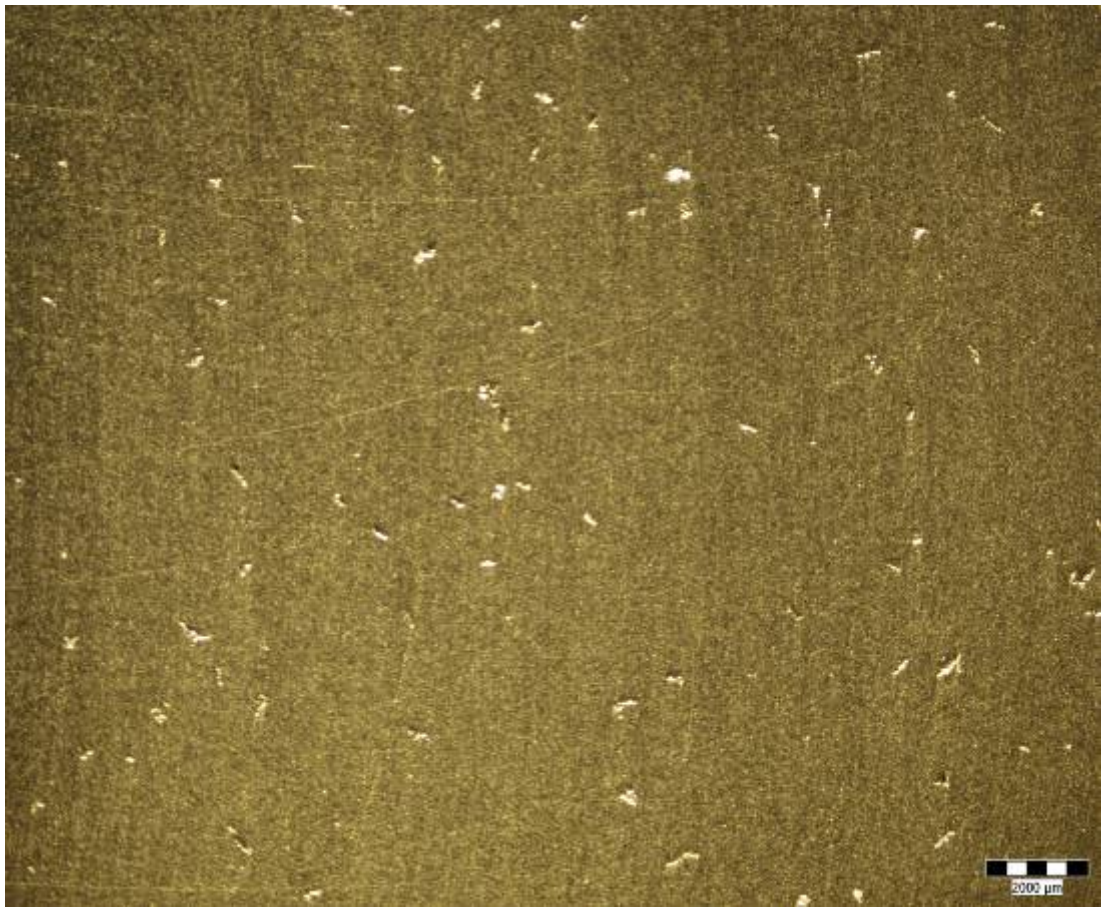
8 HODNOCENÍ VAD U EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ

Vady se hodnotily u vzorků označených jako x.1. Tyto vzorky se nachází ve spodní části experimentálního odlitku.

K získání obrázků se využil 3D mikroskop, na kterém se nastavilo zvětšení 7x. Vzorky byly zkoumány ve svém středu (v tepelné ose). V programu Quick Photo Industrial 2.2 byly určeny podíly fází.

8.1 Vady ve vzorku č.1.1

Vzorek č.1.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.1. Tento vzorek byl odléván do studené skořepiny cca 20 °C, která samovolně chladla na vzduchu.

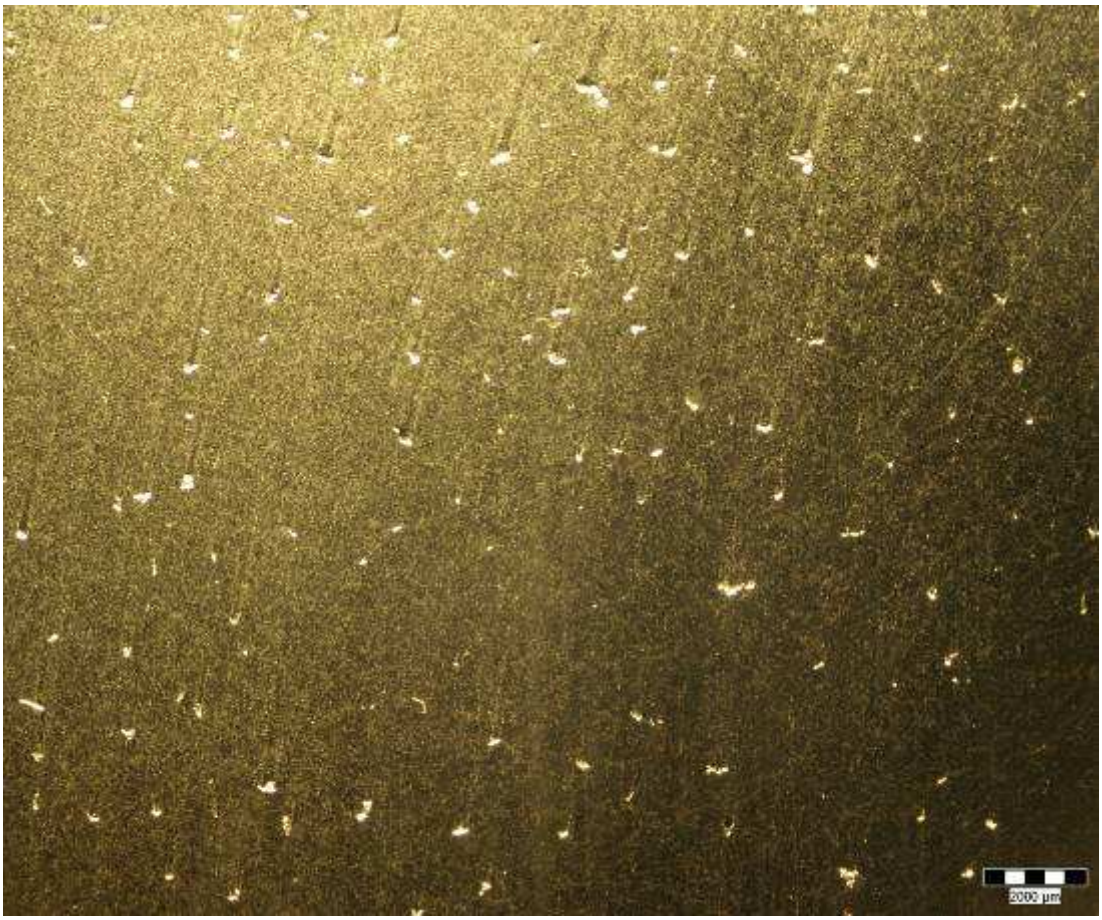


Obr. 8.1 Vady vzorku č.1.1, zvětšení 7x

U vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,65%.

8.2 Vady ve vzorku č.2.1

Vzorek č.2.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.2. Tento vzorek byl odléván do studené skořepiny cca 20 °C, která byla chlazena proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 1 min 25 s, rychlost spouštění 0,003 m/s).



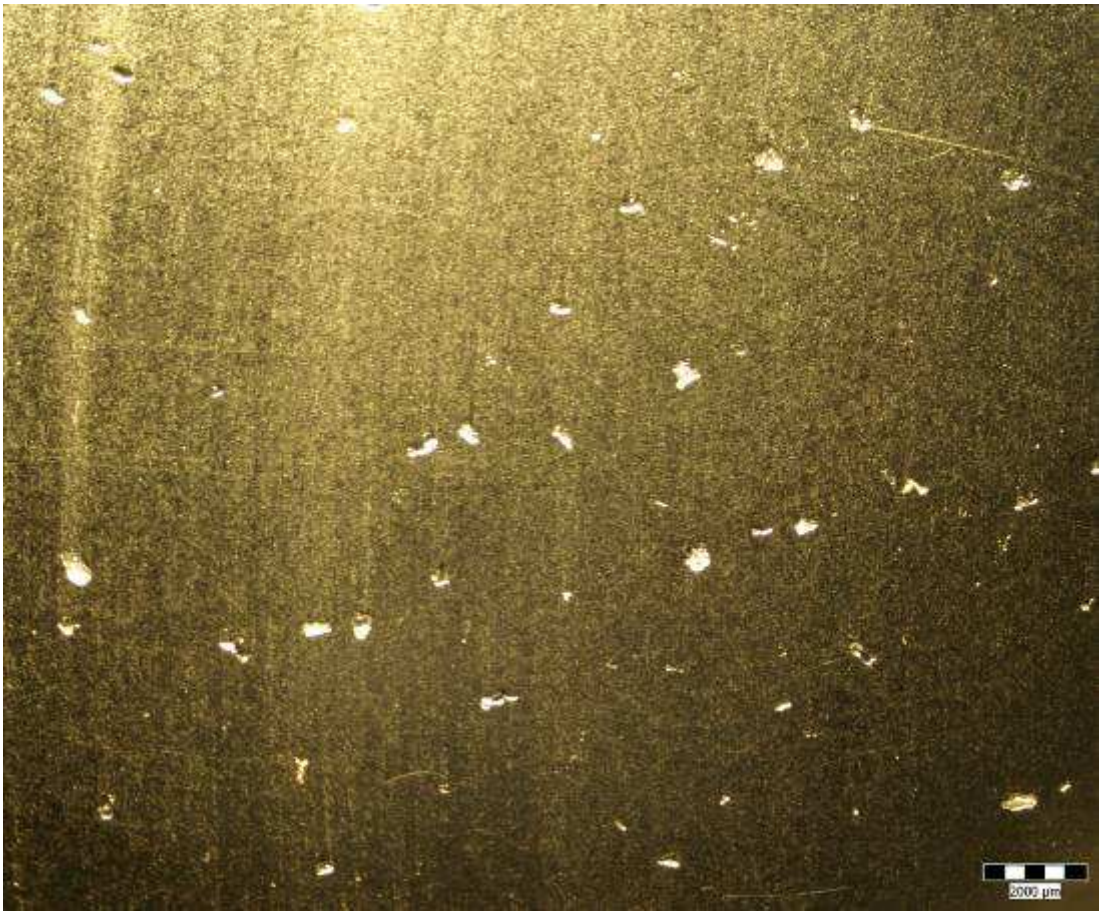
Obr. 8.2 Vady vzorku č.2.1, zvětšení 7x

Pozn. : Během odlévání praskla skořepina a vytekla část kovu.

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,84%. Tento výsledek byl ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání, které ovlivnilo větší procento vad kvůli naplynění taveniny.

8.3 Vady ve vzorku č.3.1

Vzorek č.3.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.3. Tento vzorek byl odléván do teplé skořepiny cca 430 °C, která samovolně chladla na vzduchu.

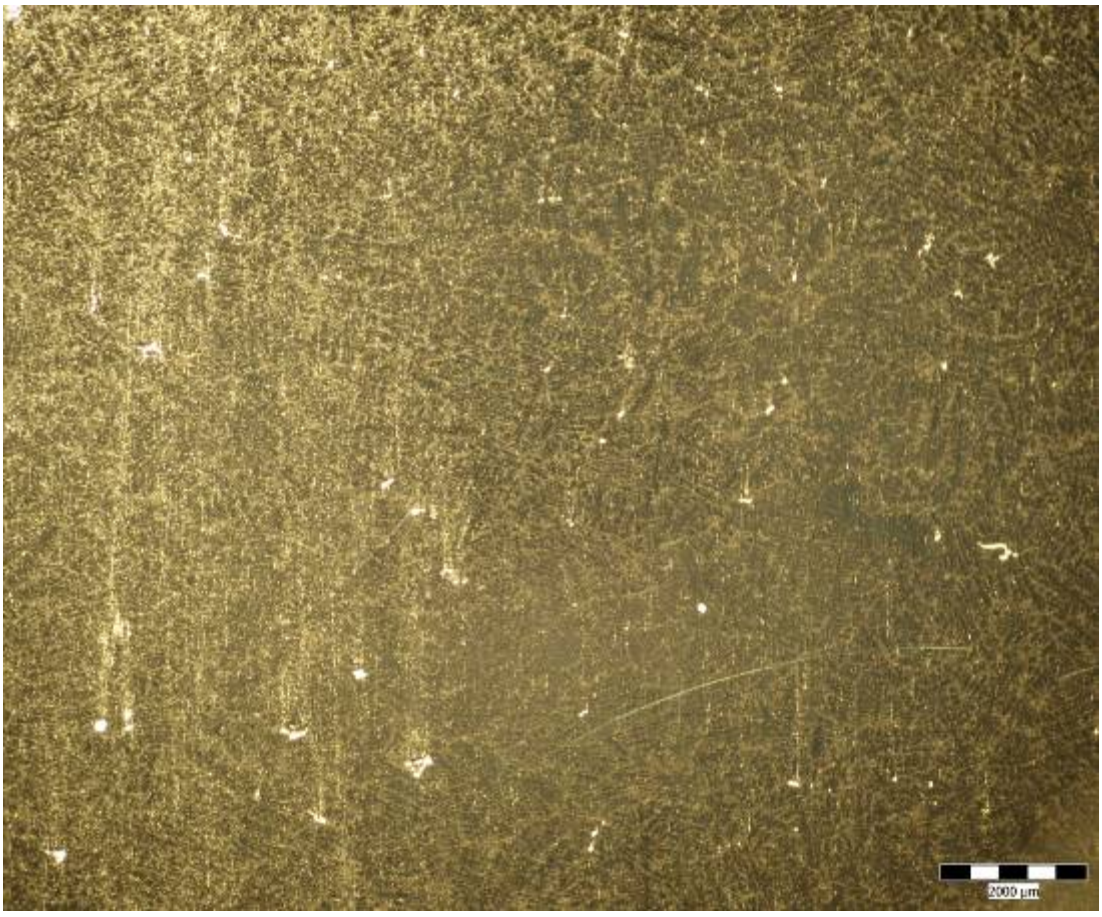


Obr. 8.3 Vady vzorku č.3.1, zvětšení 7x

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,75%.

8.4 Vady ve vzorku č.4.1

Vzorek 4.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.4. Tento vzorek byl odléván do teplé skořepiny cca 230 °C, která byla chlazena proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 1 min, rychlost spouštění 0,005 m/s).



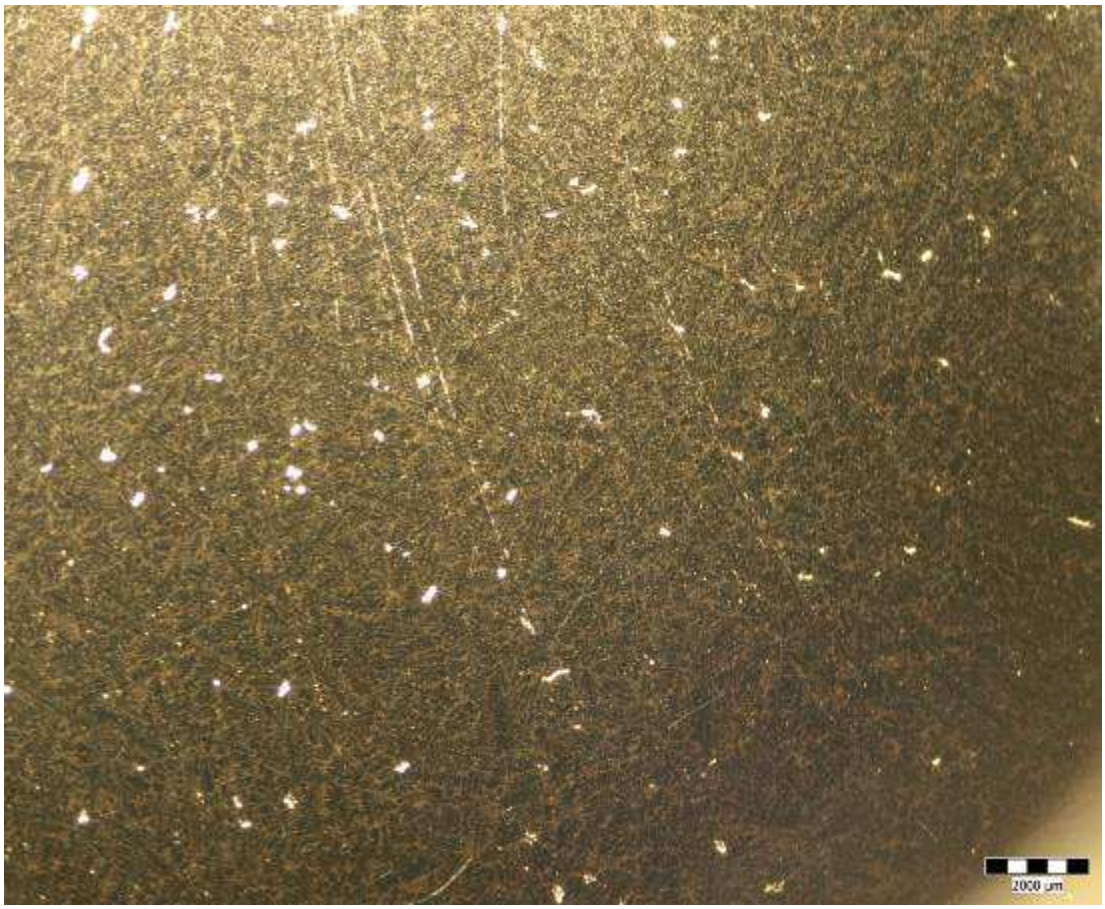
Obr. 8.4 Vady vzorku č.4.1, zvětšení 7x

Pozn. : Během odlévání praskla skořepina a vytekla část kovu

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,44%. Tento výsledek mohl být ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání, které by způsobilo větší procento vad kvůli naplynění taveniny.

8.5 Vady ve vzorku č.5.1

Vzorek 5.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.5. Tento vzorek byl odléván do teplé skořepiny cca 290 °C, která byla chlazena proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 2 min 55 s, rychlost spouštění 0,002 m/s).

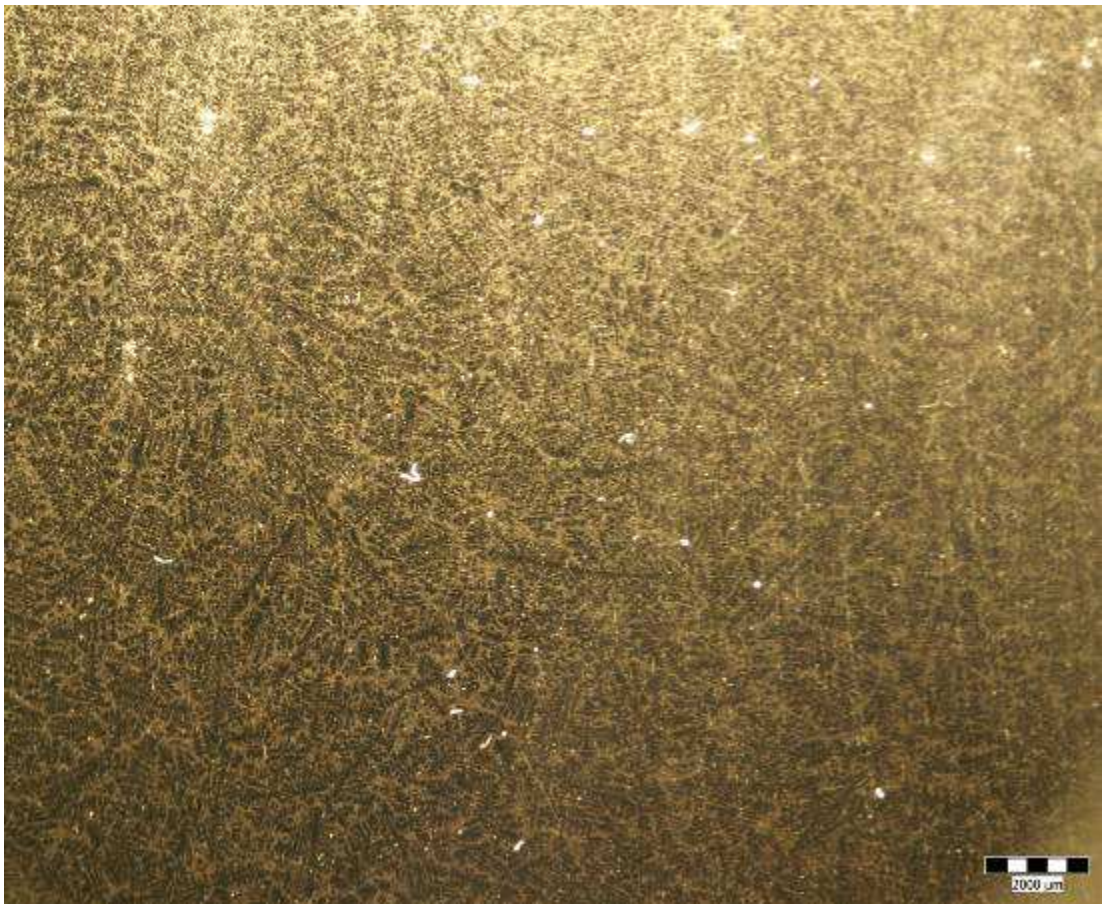


Obr. 8.5 Vady vzorku č.5.1, zvětšení 7x

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,77%.

8.6 Vady ve vzorku č.6.1

Vzorek 6.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.6. Tento vzorek byl odléván do teplé skořepiny cca 430 °C, která byla chlazena proudem vzduchu (tlak $1{,}3.10^5$ Pa, průtok 22 psi, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 4 min 25 s, rychlost spouštění 0,001 m/s).



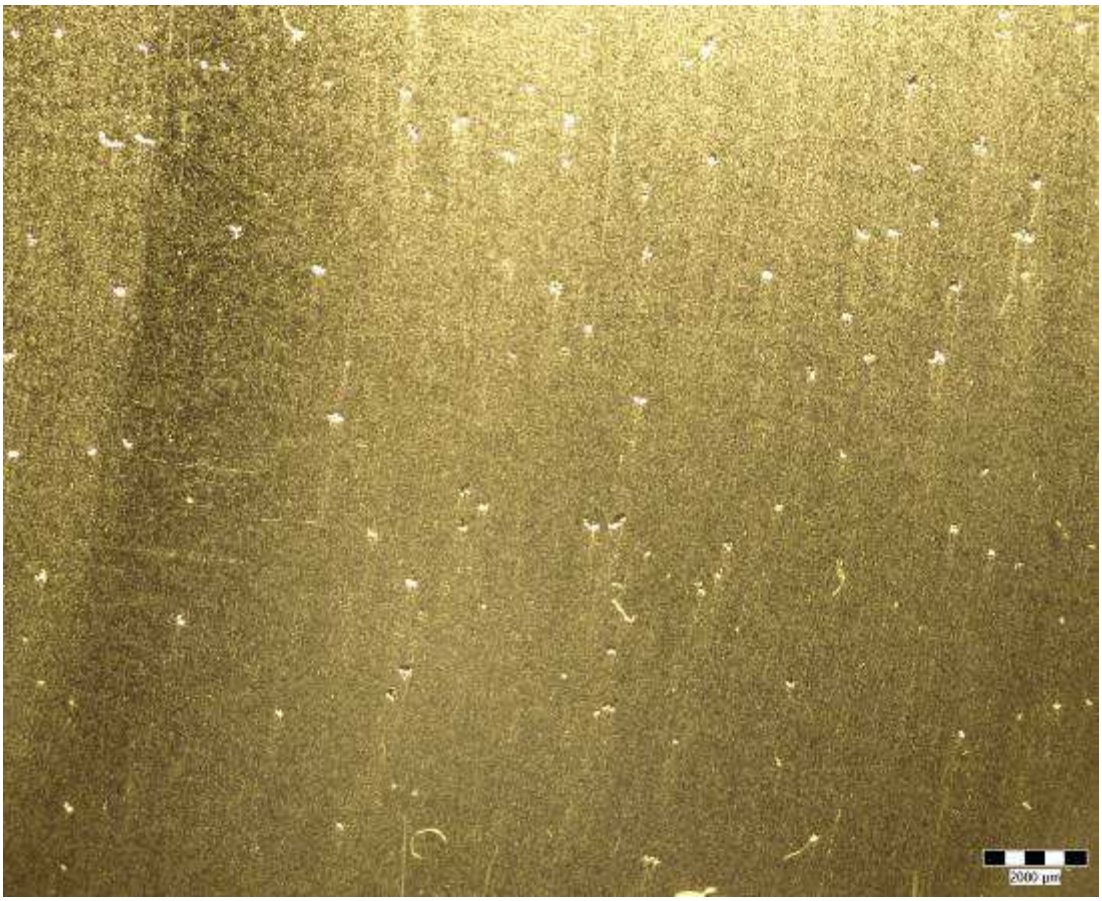
Obr. 8.6 Vady vzorku č.6.1, zvětšení 7x

Pozn. : Během odlévání praskla skořepina a vytekla část kovu

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,32%. Tento výsledek mohl být ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání, které by způsobilo větší procento vad kvůli naplynění taveniny.

8.7 Vady ve vzorku č.7.1

Vzorek 7.1 pochází z experimentálního odlitku označeného jako č.7. Tento vzorek byl odléván do teplé skořepiny cca 430 °C, která byla chlazena proudem vzduchu (tlak 3.10^5 Pa, průtok nemohl být změřen kvůli nedostatečné kapacitě průtokoměru, doba spouštění skořepiny do proudu vzduchu 3 min 15 s, rychlost spouštění 0,0015 m/s).



Obr. 8.7 Vady vzorku č.7.1, zvětšení 7x

Pozn. : Během odlévání praskla skořepina a vytekla část kovu

U tohoto vzorku byl naměřen podíl fáze vad oproti celkovému objemu vzorku cca 0,67%. Tento výsledek mohl být ovlivněn prasknutím skořepiny při odlévání, které by způsobilo větší procento vad kvůli naplynění taveniny.

8.8 Porovnání vad jednotlivých vzorků

Porovnání vad jednotlivých vzorků označených jako x.1 se provedlo na základě počátečních podmínek (studená nebo teplá skořepina).

Tab.8.1 Podíl fází vad vzorků litých do studené skořepiny cca 20 °C

Vzorek č.1.1	Samovolné chlazení	0,65 % vad
Vzorek č.2.1	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,003 m/s	0,84 % vad

Z tab. 8.1 vyplývá, že při samovolném tuhnutí je podíl fází oproti celkovému objemu odlitku menší než při chlazení proudem vzduchu. Tento výsledek, ale nemůže být brán až tak vážně z důvodu prasknutí skořepiny při odlévání experimentálního vzorku, které způsobilo naplynění taveniny. Díky tomu je tedy v experimentálním vzorku označeném jako 2.1 větší procento podílu fáze vad.

Tab.8.2 Podíl fází vad vzorků litých do teplé skořepiny cca 230–290 °C

Vzorek č.4.1	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,005 m/s	0,44 % vad
Vzorek č.5.1	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,002 m/s	0,77 % vad

Z tab. 8.2 vyplývá, že při rychlejším spouštění skořepiny do proudu vzduchu, které má za následek ochlazování větší plochy skořepiny proudem vzduchu než při pomalejším spouštění skořepiny, se dosáhne lepšího tuhnutí taveniny a tím menšího podílu fáze vad oproti celkovému objemu odlitku. Tento výsledek, ale může být ovlivněn z důvodu prasknutí skořepiny při odlévání vzorku označeného jako č.4 , kdy mohlo dojít k naplynění taveniny.

Tab.8.3 Podíl fází vad vzorků litých do teplé skořepiny cca 430 °C

Vzorek č.3.1	Samovolné chlazení	0,75 % vad
Vzorek č.6.1	Chlazení proudem vzduchu Tlak $1{,}3.10^5$ Pa Průtok 22 psi Rychlost spouštění 0,001 m/s	0,32 % vad
Vzorek č.7.1	Chlazení proudem vzduchu Tlak 3.10^5 Pa Malá kapacita průtokoměru Rychlost spouštění 0,0015 m/s	0,67 % vad

Z tab. 8.3 vyplývá, že při chlazení skořepiny proudem vzduchu se dosáhne menšího podílu fáze vad v experimentálním odlitku než u experimentálního odlitku chladnoucího samovolně na vzduchu. Dále vyplývá, že při zvýšení tlaku vzduchu se zvýší podíl fáze vad v experimentálním odlitku, tento výsledek ovšem nemůže být brán vážně z důvodu prasknutí skořepiny označené jako č.6 a č.7. Pravděpodobně došlo k většímu naplynění vzorku č.7 právě díky prasklině ve skořepině.

9 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést ověření možnosti řízení krystalizace hliníkových slitin odlévaných do skořepinových forem. Muselo se navrhnout a sestavit chladící zařízení, kterým bylo možné řídit chlazení slitiny po odlití do skořepinové formy. Pomocí termočlánků se měřily teploty během tuhnutí slitiny a vytvořily se z těchto hodnot křivky chladnutí. Podle naměřených křivek chladnutí se vytvořila numerická simulace v programu ProCAST a tyto simulace se mezi sebou porovnaly. Rozřezáním experimentálních vzorků vznikly vzorky pro metalografický výbrus a vyhodnotila se struktura z hlediska vzdálenosti sekundárních os dendritů, typů struktury a množství vad.

Bylo odlito několik experimentálních vzorků, u kterých byly navoleny různé počáteční podmínky tak, aby bylo možné jejich následné porovnání.

Vyhodnocením hodnot křivek chladnutí jednotlivých vzorků, naměřených při samovolném chladnutí na vzduchu a při chlazení proudem vzduchu z navrženého chladícího zařízení bylo zjištěno, že při chlazení skořepiny proudem vzduchu dochází k rychlejšímu tuhnutí slitiny, ať se již jedná o studenou skořepinu (teplota okolí) či teplou skořepinu (ohřátou v žíhací peci), než u samovolného chladnutí na vzduchu. Rychlejšího tuhnutí slitiny lze také dosáhnout změnou tlaku proudu vzduchu, protože při vyšší hodnotě tlaku vzduchu se snižuje doba tuhnutí slitiny.

Při numerické simulaci vytvořené podle naměřených křivek chladnutí, se porovnávaly jednotlivé přestupy tepla při počátku tuhnutí slitiny a těsně před koncem tuhnutí slitiny (tuhnutí eutektika). Z výsledků bylo zjištěno, že díky řízenému ochlazování proudem vzduchu se docílí ve spodní oblasti experimentálního vzorku strmých teplotních gradientů, tedy je zde menší pravděpodobnost vzniku vad typu ředin. Ovšem ve střední oblasti experimentálního vzorku při chladnutí eutektika vzniká málo strmý teplotní gradient a tato oblast je velice náchylná na vznik vad typu ředin.

Zkoumáním struktury vzorků nařezaných z experimentálních odlitků, se prokázal vliv řízeného chlazení na vzdálenosti sekundárních os dendritů. Na vzorcích ze spodní části experimentálního vzorku byly patrné menší vzdálenosti sekundárních os dendritů než u vzorků nacházejících se v horní části. Což bylo způsobeno právě proudem vzduchu z chladícího zařízení, který foukal po obvodu a od spodu skořepiny směrem nahoru. Při rychlejších chlazení se totiž vzdálenost sekundárních os zmenšuje.

Na metalografickém výbruse byl porovnatelný rozdíl mezi ochlazovanou skořepinou proudem vzduchu a samovolně chladnoucí na vzduchu. Projevil se změnou typu eklektika. U vzorků samovolně chladnoucích na vzduchu bylo eutektikum tvořeno hrubými lamelami křemíku (zrnité eutektikum), zatím co u vzorků chlazených proudem vzduchu bylo eutektikum tvořeno jemnými lamelami křemíku (lamelární eutektikum).

Při vyhodnocení vad nebylo možné prokázat, zda má řízená krystalizace vliv na jejich výskyt. Důvodem bylo popraskání některých skořepinových forem při lití. Jednak těmito prasklinami vytekla část kovu, ale také se tavenina naplynila. Což ovlivnilo výsledky naměřených podílů fází vad oproti celkovému objemu experimentálního vzorku.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. ZEMČÍK, L. *Fyzikální modely používané při popisu krystalizace kovů a jejich slitiny : aplikace mikroelektroniky ve slévárenství*. Brno, 1990. 49 s. Postgraduální. VUT v Brně, Fakulta strojní, Katedra slévárenství.

2. Spisy patentů: Patentní spis č.90948. Praha, 1959, 3 s. Dostupné z WWW: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/90/90948.pdf>. Čerpáno 22. 5. 2010

3. HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model* [online]. ČVUT Praha, 2007. 30 s. Studijní opory pro předmět Metody přesného lití II.. ČVUT v Praze. Dostupné z WWW: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>. Čerpáno 10. 1. 2010.

4. ODLOŽIL, J. *Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách při odlévání ve vakuu* [online]. Brno, 2009. 101 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19142□=0>. Čerpáno 12.1. 2010.

5. ROUČKA, J., a kol. *Teplotní procesy při odlévání do samonosných skořepinových forem a jejich numerická simulace*. Slévárenství. 2008, LVI, 9-10, s. 405-411. ISSN 0037-6825.

6. Vedení tepla. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2003, last modified on 2010 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_tepla>. Čerpáno 10. 5. 2010.

7. INCROPERA, FP. And DEWITT, DP. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York: J. Wiley&Sons, 1996, 886 s, ISBN 0-471-30460-3

8. Proudění tepla. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2003, last modified on 2010 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C3%AD%C5%99en%C3%AD_tepla>. Čerpáno 10. 5.2010

9. Sálání tepla. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2003, last modified on 2010 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%A1l%C3%A1n%C3%AD_tepla>. Čerpáno 10. 5. 2010

10. Psi (jednotka). In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2003, last modified on 2010 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Psi_(jednotka)>. Čerpáno 4. 5. 2010

11. KUBÍČEK, L. *Krystalizace kovů a slitin*. Praha : [s.n.], 1991. 85 s. ISBN 80-7080-130-1.

12. ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-275.