



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ V PRŮBĚHU TUHNUTÍ NA KONEČNOU STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI AL ODLITKŮ ZHOTOVENÝCH TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU

"INFLUENCE OF SPEED OF COOLING DURING THE CASTING SOLIDIFICATION TO THE FINAL CASTING
STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES AL CASTINGS MADE BY LOST-WAX TECHNOLOGY"

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Žák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Štěpán Žák
Studijní program:	Slévárenská technologie
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
Akademický rok:	2021/22

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

Vliv rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí na konečnou strukturu a mechanické vlastnosti Al odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro konečné vlastnosti odlitků ze slitin Al zhotovených technologií vytavitelného modelu je rozhodující průběh tuhnutí odlitku po odlití skořepinové formy. Existuje více možností jak urychlit tento průběh a tím docílit jemnozrnější struktury a i lepších mechanických vlastností. Vyhodnocení těchto různých způsobů ochlazování tuhoucích odlitků z hlediska dosažení jejich optimální struktury a tedy i konečných mechanických vlastností odlitků je hlavním posláním této diplomové práce.

Cíle diplomové práce:

Zjištění a experimentální ověření optimálního systému ochlazování odlité keramické skořepinové formy k dosažení nejlepší struktury z hlediska konečných mechanických hodnot finálního odlitku ze slitin Al.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství, 2001, č. 10, s. 570 – 580. ISSN 0037-6825.

HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings of the World Technical Forum, Brno 1st – 3rd June, 2009.

HORÁČEK, M., J. CILEČEK. Capabilities of Investment Casting Technology, Livarski Vestnik, Vol.54, 4/2006, pp. 175 - 186. ISSN 0024-5135.

HORÁČEK, M., J. CILEČEK. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets, Foundry Trade Journal, U.K., Volume 180, Nr. 3641, 2007, pp. 32 - 35.

HORÁČEK, M. Accuracy of castings manufactured by the lost wax process, Foundry Trade Journal 3535, October, 1997, p. 424 - 429.

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

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem rychlosti ochlazování během tuhnutí Al odlitku na jeho výsledné mechanické vlastnosti a strukturu. Byl zkoumán vliv tloušťky stěny odlitku a metody ochlazování pomocí kapaliny a tlakového vzduchu. Mechanické vlastnosti byly hodnoceny pomocí tahové zkoušky, struktura byla hodnocena pomocí parametru DAS. Bylo potvrzeno zlepšení vlastností materiálu při použití obou metod. Při využití ochlazování pomocí kapaliny bylo dosaženo vynikajících výsledných hodnot mechanických vlastností i jemnosti struktury.

Klíčová slova

Technologie vytavitelného modelu, tuhnutí slitin Al, struktura odlitku

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of the cooling speed during the solidification of the Al casting on its mechanical properties and structure. The influence of the wall thickness of the casting and the method of cooling by means of liquid and compressed air were investigated. Mechanical properties were evaluated using a tensile test, the structure was evaluated by means of the DAS parameter. The improvement of the material properties using both methods was confirmed. When using the method of cooling by means of liquid, excellent final values of mechanical properties and fineness of structure were achieved.

Key words

investment casting technology, solidification of Al alloys, casting structure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÁK, Štěpán. *Vliv rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí na konečnou strukturu a mechanické vlastnosti Al odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140671>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Horáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí na konečnou strukturu a mechanické vlastnosti Al odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Štěpán Žák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, Ph.D., Ing. Františku Šmatelkovi a zaměstnancům firmy Alucast s.r.o. za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Technologie přesného lití na vytavitelný model	10
1.1 Výroba matečné formy	10
1.2 Výroba voskového modelu	11
1.3 Obalování keramikou	12
1.4 Vytavení vosku a žihání keramické skořepiny	12
1.5 Odlévání	12
2 Hliník a jeho slitiny	13
2.1 Hliník	13
2.2 Al – Si	13
2.2.1 Nukleace a růst zrn	14
2.2.2 Příměsi/legury	18
2.2.3 Možnosti ovlivnění průběhu tuhnutí	19
2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku	22
2.4 Další slitiny hliníku	22
2.4.1 Al-Cu	22
2.4.2 Al-Mg	23
2.4.3 Al-Zn	24
3 Experimentální část	25
3.1 Podmínky experimentu	25
3.2 Výsledky experimentu	33
3.2.1 Mechanické vlastnosti	33
3.2.2 Mikrostruktura	46
3.3 Shrnutí experimentu	59
ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	67

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá možností ovlivnění struktury a mechanických vlastností odlitků ze slitin hliníku zhotovených metodou vytavitelného voskového modelu. Tato technologie, označovaná jako přesné lití, je jednou z nejstarších technologií používaných k výrobě odlitků. Původně byla využívána především k výrobě uměleckých předmětů. Zhruba od poloviny minulého století však dochází k jejímu masivnímu rozšíření i na produkci strojních součástí. S tím souvisí i vyšší nároky na výsledné mechanické vlastnosti odlitků vyráběných touto metodou.

Mechanické vlastnosti odlitku úzce souvisí s jeho strukturou. Jednoduše řečeno čím jemnější struktura, tím lepší mechanické vlastnosti. Jednou z metod, jak zjemnit strukturu odlitku je zvýšení jeho rychlosti ochlazování během tuhnutí. Právě vliv rychlosti ochlazování je hodnocen v rámci experimentální části této práce.

Rychlost ochlazování může být ovlivněna jednak okolním prostředím odlitku a jeho schopností odvádět teplo, vliv má ale i samotná tloušťka stěny odlitku. Kombinace obou těchto proměnných je předmětem experimentu provedeného v rámci této diplomové práce. Praktická část práce je řešena ve spolupráci s firmou Alucast s.r.o.

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

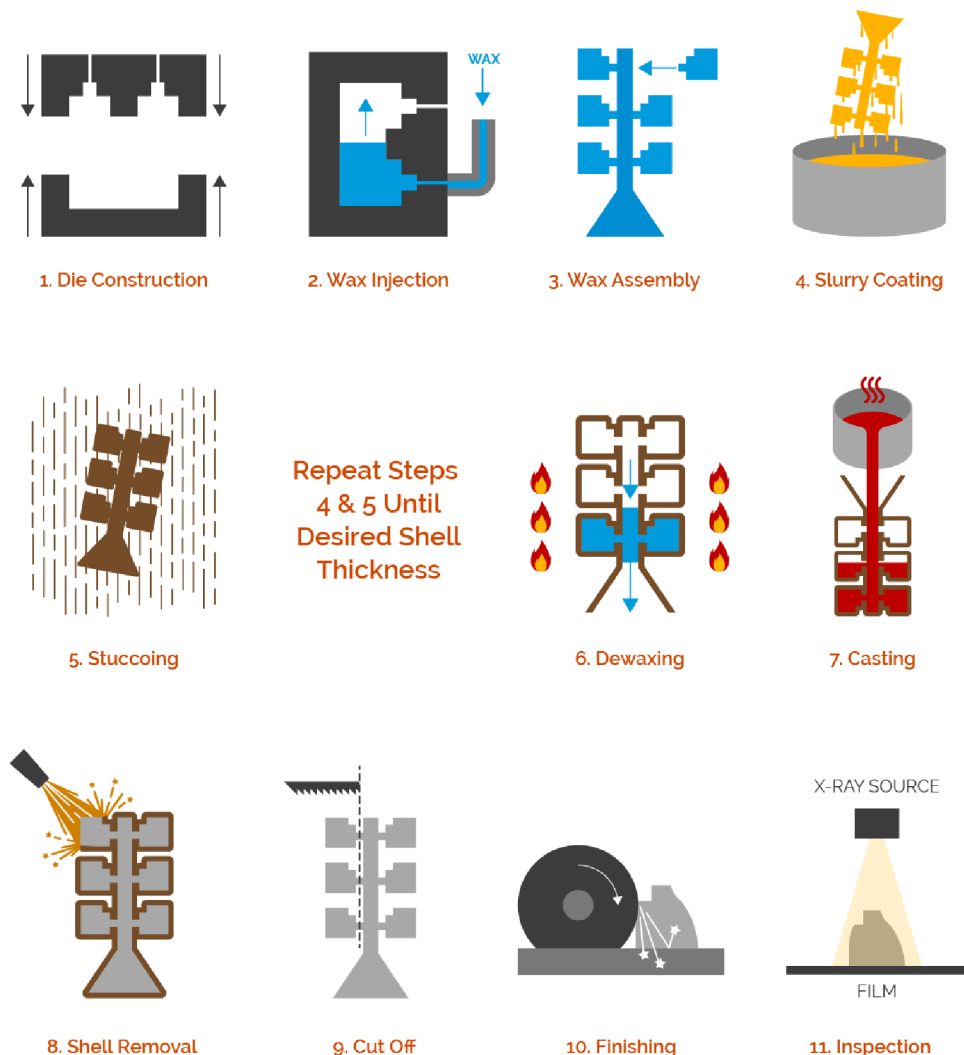
Technologie lití na vytavitelný voskový model představuje jednu z historicky nejstarších metod odlévání. Původně byla metoda využívána především ke zhotovování uměleckých předmětů. Zhruba od poloviny 20. století dochází k rozšíření této technologie i na výrobu průmyslových součástí. [1]

Princip metody (viz **obr. 1**) spočívá ve výrobě netrvalého voskového modelu, který je následně obalen keramickou hmotou a vytaven. Poté je keramická skořepina vyžhána, což představuje zároveň i její přehřev. Do takto zhotovené přehřáté skořepiny je nakonec odlit roztavený kov. Po ztuhnutí je potřeba skořepinu rozbít a odlitek očistit (otryskat). Následuje oddělení vtokové soustavy, zabroušení vtoků a další dokončovací operace, na jejichž konci je již finální odlitek. [2]

Z toho plyne hlavní přednost této technologie, tedy možnost výroby tvarově velmi složitých odlitků, které splňují vysoké nároky na rozměrovou přesnost a jakost povrchu. Lze tak zhotovit součásti takových tvarů, jejichž výroba tradičními technologiemi využívající dělené pískové formy a trvalého modelu by byla velice obtížná, či v některých případech dokonce nemožná. [2]

1.1 Výroba matečné formy

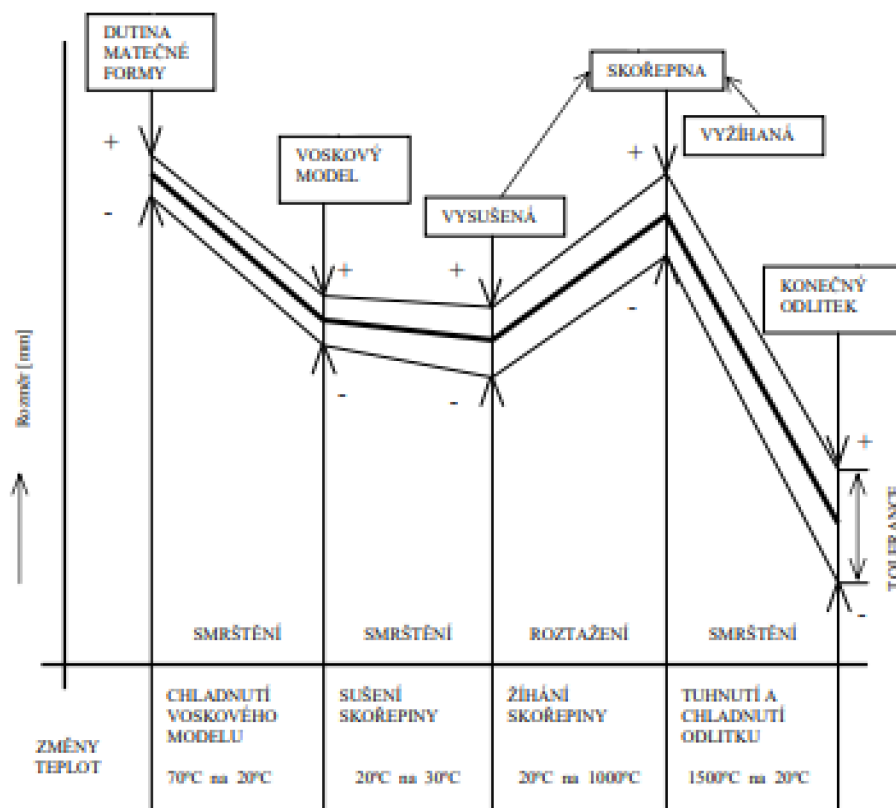
Na následujícím obrázku (**obr. 1**) je znázorněn celý proces zhotovení odlitku technologií přesného lití po jednotlivých krocích.



Obr. 1 – schéma procesu přesného lití [3].

Prvním krokem při zhotovování jakéhokoliv odlitku je výroba modelu. V případě technologie vytavitelného vosku je model, stejně jako vtoková soustava a případné nálitky, zhotoven z vosku. K tomu je využívána tzv. matečná forma. Ta bývá nejčastěji obráběná z kovu. [1,2]

Matečné formy musí splňovat vysoké požadavky na rozměrovou přesnost. Jedná se o první, ale naprosto zásadní krok při výrobě odlitků, protože právě zde je určena výsledná rozměrová přesnost součásti. Navržení přesné matečné formy není snadnou záležitostí, jelikož zde hrají významnou roli změny rozměrů během následného procesu výroby odlitku. Nutná je tak znalost rozměrových změn voskového modelu, keramické skořepiny i samotného odlévaného kovu. Průběh rozměrových změn a tolerancí během procesu výroby odlitku znázorňuje následující obrázek (obr. 2). [2]



Obr. 2 – tepelné dilatace v průběhu procesu [2].

1.2 Výroba voskového modelu

Voskové modely jsou nejčastěji vyráběné pomocí vstřikolisů, kdy je vosk za zvýšené teploty (pod teplotou likvidu) vtlačěn do dutiny matečné formy. Mohou však být též zhotoveny pomocí gravitačního lití. Modely bývají zhotovovány z nového, tzv. panenského vosku. Vtokové soustavy pak často bývají zhotovovány z vosku regenerovaného. [2]

Hotové voskové modely nejsou většinou obalovány jednotlivě, ale dochází k jejich spojování s vtokovou soustavou do tzv. stromečků. Cílem je umístit, pokud možno, co nejvíce modelů na jednu vtokovou soustavu, a tím zajistit co nejvyšší využití kovu, tj. co nejlepší poměr mezi celkovou hmotností odlitého kovu a hmotností finálních očištěných odlitků. Modely jsou na stromeček připevňovány nejčastěji pájením, nebo lepením. Při pájení jsou styčné plochy modelu a vtoku nataveny pomocí nahřátého nástroje a následně spojeny. K lepení se využívá speciálních lepících vosků. [2]

1.3 Obalování keramikou

Principem obalování je opakované ponořování do keramické suspenze („břečky“) a následný posyp práškovou keramikou. Obalování probíhá několikrát, jednotlivé vrstvy se od sebe odlišují zrnitostí použitého ostříva. První vrstva obalu bývá nejjemnější, aby bylo dosaženo požadované jakosti povrchu odlitku. Další vrstvy pak bývají postupně z materiálu s vyšší zrnitostí, čímž je naopak dosaženo co nejvyšší prodyšnosti skořepiny se snahou eliminovat případné plynové vady. [1,2]

Keramická suspenze je tvořena plnivem a pojivem. Jako plnivo slouží žáruvzdorné silikáty (SiO_2), aluminosilikáty (např. molochit), či např. zirkon. Pojivo pak představuje kapalný roztok na bázi vody nebo alkoholu. [1,2]

Po obalení stromečku vrstvou keramické suspenze následuje okapání přebytečné břečky a následný posyp žáruvzdorným keramickým materiálem. Ten lze provést dvěma metodami. Sprchový posyp představuje variantu, kdy keramika na stromeček padá shora vlivem gravitace. Druhou možností je posyp pomocí fluidního lože, při kterém je posypový materiál s využitím stlačeného vzduchu jakožto nosiče rozptylován směrem vzhůru. [2]

Každá vrstva nanesené keramiky musí být před opakováním procesu dostatečně vysušena. To se provádí v klimatizovaných prostorách. Zde jsou hlídány tři parametry. Konkrétně teplota, relativní vlhkost vzduchu a proudění vzduchu. Proces probíhá při pokojové teplotě, relativní vlhkost vzduchu se pohybuje okolo 60 %. Potřebné proudění vzduchu je pak zajištěno pomocí ventilátorů. [1,2]

1.4 Vytavení vosku a žíhání keramické skořepiny

Poté, co je na stromeček nanesen dostatečný počet vrstev keramiky a poslední vrstva je řádně vysušena, následuje vytavení vosku. Problém představuje vyšší tepelná roztažnost vosku v porovnání s keramikou. To může způsobovat praskání skořepiny. Je tedy zapotřebí vytvořit v první fázi vytavování dilatační spáru mezi povrchem ještě neroztaveného vosku a keramickou skořepinou. Toho se dosahuje pomocí teplotního šoku, kdy povrchová vrstva je velice rychle roztavena, aniž by došlo k natavení či přílišnému roztažení podpovrchových vrstev vosku. Nejčastěji se k tomuto účelu využívá působení přehřáté páry v bojlerklávu nebo autoklávu. [1,2]

Po vytavení vosku je skořepina dále žíhána k dosažení jejího vytvrzení. Žíhací teploty pro SiO_2 se pohybují v rozmezí 900 – 1000 °C. Pro jiná ostříva (např. molochit, korund apod.) mohou dosahovat i vyšších hodnot zhruba 1200 – 1400 °C. Žíhání skořepin současně slouží i jako jejich předehřev před litím. [2]

1.5 Odlévání

Odlévání do keramických skořepin lze rozdělit na dva základní způsoby. Jedním z nich je odlévání pod vakuem. Toho se využívá především u vysoce reaktivních slitin, které by na běžné atmosféře okamžitě reagovali s okolním vzduchem (především kyslíkem). Typicky se jedná o slitiny na bázi niklu. Druhou možností je běžné odlévání na volné atmosféře. To je typické např. pro hliníkové slitiny. [2]

2 HLINÍK A JEHO SLITINY

Následující kapitola se zabývá slitinami hliníku a jejich vlastnostmi.

2.1 Hliník

Hliník patří mezi nejrozšířenější prvky v zemské kůře. Je to nepolymorfní kov s kubickou plošně středěnou krystalickou mřížkou (FCC). Vyznačuje se vysokou afinitou ke kyslíku, díky čemuž se v přírodě prakticky nevyskytuje v čisté formě, ale vždy v podobě sloučenin. S kyslíkem tvoří stabilní oxid Al_2O_3 (korund). Hlavní surovinou pro výrobu čistého hliníku je minerál bauxit. Jedná se o dihydrát oxidu hlinitého ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) s příměsí oxidů dalších prvků jako je železo, titan či křemík, přičemž obsah samotného Al_2O_3 se pohybuje okolo 50 %. Hliník se pak z bauxitu vyrábí pomocí elektrolýzy za použití roztaveného minerálu kryolitu Na_3AlF_6 jako elektrolytu. Samotná výroba hliníku z rudy je však velice energeticky náročná, navíc k výrobě 1 tuny hliníku je potřeba zpracovat cca 4 tuny bauxitu. [4,5]

Hliník ve formě čistého kovu se vyznačuje dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, díky tomu našel využití v elektrotechnice, především jako vodič. Zde však došlo k jeho náhradě mědí, která dosahuje daleko lepších parametrů. [4]

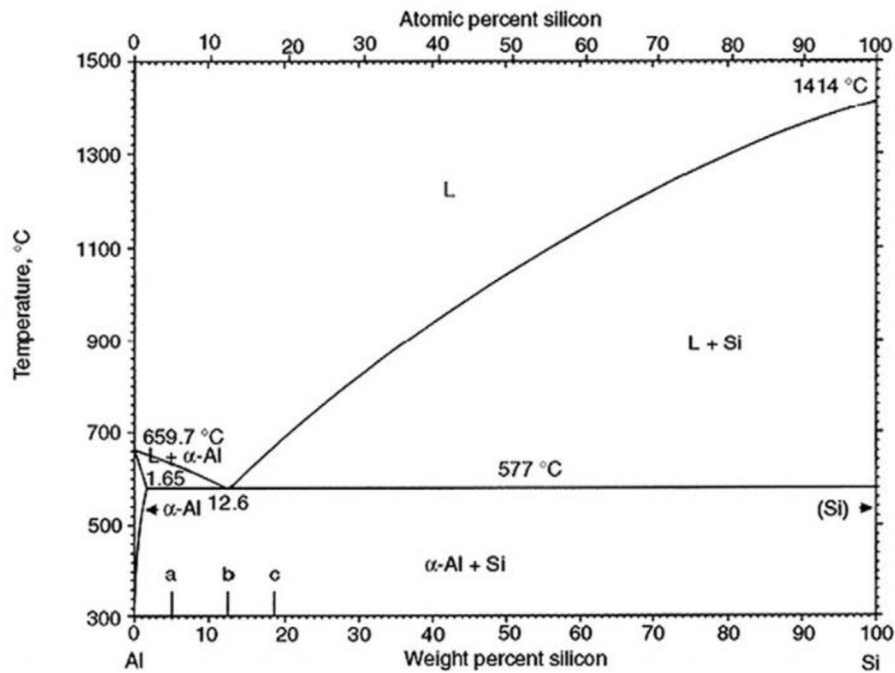
Zásadními vlastnostmi, díky kterým je hliník v technické praxi natolik využíván jsou jeho nízká hustota 2700 kg/m^3 , nízká teplota tání $660 \text{ }^\circ\text{C}$ umožňující využití trvalých ocelových forem a odolnost proti korozi způsobená pasivací povrchu velice tenkou vrstvou stabilního oxidu Al_2O_3 . [4]

Ovšem zásadním nedostatkem čistého hliníku jsou jeho špatné mechanické vlastnosti. Čistý hliník dosahuje nízkých pevností pohybujících se pod 100 MPa stejně jako nízkou tvrdostí okolo 20–30 HB. Naopak díky kubické plošně středěné (FCC) krystalické mřížce dosahuje hliník ve formě čistého kovu vysokých hodnot tažnosti i nad 20 %. [4]

2.2 Al – Si

Jak již bylo zmíněno výše, technické využití čistého hliníku je značně limitováno jeho špatnými mechanickými vlastnostmi. Jejich zvýšení je možné dosáhnout legováním vhodnými prvky. Přísadové prvky ve slitinách hliníku navíc zlepšují i technologické vlastnosti. Pro výrobu konstrukčních součástí jsou proto používány výhradně slitiny. [4]

Nejvýznamnější slévárenskou slitinou hliníku jsou tzv. siluminy. Jedná se o slitinu hliníku a křemíku. Křemík s hliníkem tvoří eutektikum, které má eutektickou koncentraci 12,6 % Si a eutektickou teplotou $577 \text{ }^\circ\text{C}$. Jak lze pozorovat na fázovém diagramu Al-Si (**obr. 3**), rozpustnost křemíku v hliníku je velice omezená. Maximální rozpustnost při eutektické teplotě je pouhých 1,65 % a klesá spolu s teplotou. [4,5]



Obr. 3 – binární fázový diagram Al-Si [6].

Dle složení (koncentrace Si) rozlišujeme slitiny podeutektické (cca 5-11 % Si), eutektické (cca 11-13 % Si) a nadeutektické (cca 14-17 % Si, výjimečně mohou obsahovat i více křemíku). Eutektické slitiny se díky úzkému dvoufázovému pásmu vyznačují nejlepšími slévarenskými vlastnostmi, především vynikající zabíhavostí. Jejich struktura je tvořena téměř výhradně eutektikem $\alpha(\text{Al})\text{-Si}$, případně zde může vznikat malé množství tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. V případě podeutektických slitin dochází nejprve ke krystalizaci fáze $\alpha(\text{Al})$, eutektikum pak následně tuhne v mezidendritických prostorách. Spolu se snižujícím se obsahem křemíku pak dochází k rozšiřování dvoufázového pásma, proto mají podeutektické siluminy ve srovnání s těmi eutektickými horší slévarenské vlastnosti. V porovnání s jinými typy slitin jsou však tyto vlastnosti stále velmi dobré. Nadeutektické siluminy pak jako primární fázi obsahují krystaly křemíku, kolem nichž následně tuhne eutektikum. Díky těmto krystalům primárního křemíku se tyto slitiny vyznačují vyšší otěruvzdorností a menší tepelnou roztažností, čehož se využívá např. při výrobě pístů spalovacích motorů. [4,7]

2.2.1 Nukleace a růst zrn

Samotná krystalizace kovu je termodynamickým dějem řízeným intenzitou odvodu tepla z materiálu. Jedná se o fázovou přeměnu mezi kapalnou fází (taveninou) a pevnou fází, v případě slitin hliníku tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$ respektive eutektikem. [4]

Fázová přeměna může být popsána změnou energie termodynamické soustavy, ta v případě krystalizace představuje danou slitinu. Celková energie soustavy je reprezentována tzv. entalpií. Ta představuje celkovou sumu energie, kterou soustava disponuje. Tuto energii lze dále rozdělit na tzv. entropii a volnou entalpii. [8]

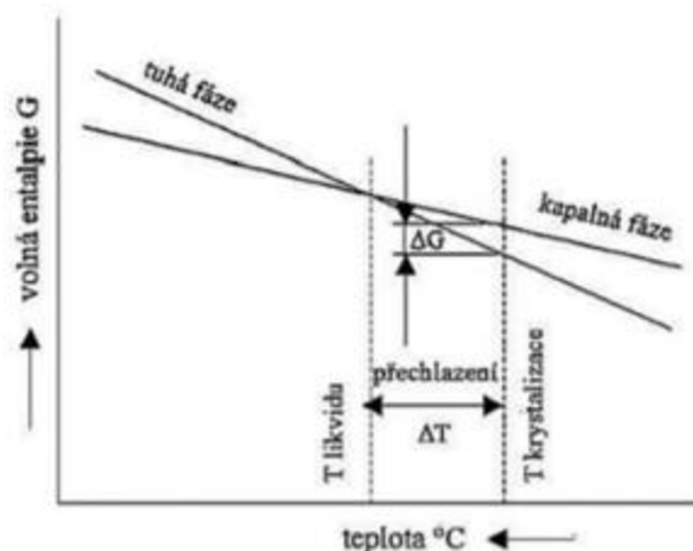
Entropie představuje energii v soustavě vázanou, která nemůže být uvolněna. Je pevně svázána s termodynamickou teplotou soustavy, spolu se kterou tvoří tzv. entropický člen. Ten popisuje míru uspořádanosti soustavy, např. energii s jakou oscilují atomy látky kolem svých uzlových bodů. Při dosažení absolutní nuly, tedy teploty $T = 0 \text{ K}$, nabývá entropický člen nulové hodnoty a atomy dané látky se přestávají pohybovat (energie pro pohyb nabývá nulové hodnoty). [8]

Naopak volná entalpie (též označovaná jako Gibbsova energie) představuje, jak již název napovídá, energii, kterou je možno uvolnit při uskutečnění změny stavu termodynamické soustavy. V případě krystalizace se tedy právě část volné entalpie uvolňuje v podobě tepla, které je nutné ze soustavy odvést, aby tavenina úspěšně ztuhla. Vztah mezi jednotlivými druhy energie soustavy uvádí rovnice (2.1). [8]

$$G = H - TS \quad (2.1)$$

kde: G - Volná entalpie [J],
 H - Entalpie [J],
 T - Termodynamická teplota [K],
 S - Entropie [JK^{-1}],

Volná entalpie soustavy je obecně závislá na teplotě a tlaku okolí. Ve slévárenské praxi však proces tuhnutí probíhá za konstantního tlaku, jedná se tedy o izobarický děj. V takovém případě je volná entalpie závislá pouze na teplotě. Tuto závislost znázorňuje následující graf (obr. 4). [8]



Obr. 4 – Graf závislosti volné entalpie na teplotě [9].

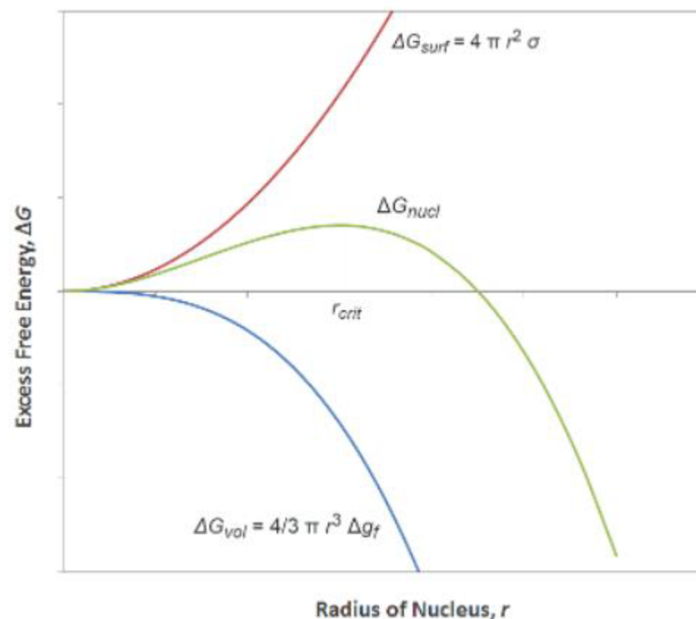
Zda bude daná reakce probíhat, či nikoli lze posuzovat podle hodnoty změny volné entalpie, tedy rozdílu volných entalpií (a tím i energií) ve výchozím a výsledném stavu soustavy. Jak lze vidět v grafu (obr. 4), křivka závislosti volné entalpie na teplotě má pro každou fázi (v našem případě kapalnou a tuhou) jiný sklon. V určitém bodě se tedy obě křivky musí zákonitě protnout. Tento bod pak představuje rovnováhu mezi oběma konkrétními fázemi, kdy rozdíl volných entalpií je nulový. V případě krystalizace jde o rovnováhu mezi taveninou a pevnou látkou (tuhým kovem). Tento rovnovážný bod nastává při teplotě likvidu, tj. teoretické teplotě, při které začínají v tavenině vznikat první zárodky pevné fáze. Ve skutečnosti však krystalizace nastává až po určitém podchlazení pod teplotu likvidu, kdy vznikne určitá hnací energie krystalizace. Platí tedy podmínka $\Delta G = G_{\text{PEVNĚ FÁZE}} - G_{\text{KAPALNĚ FÁZE}} < 0$. Tato hnací energie představuje impuls, který je nutné dodat soustavě, aby překonala energetickou bariéru bránící vzniku a růstu krystalizačního zárodku (např. povrchové napětí). [8,10]

Krystalizace kovu vždy probíhá ve dvou etapách, nukleaci zárodků a růstu nové fáze. Prvním dějem je nukleace krystalizačních zárodků. Ta může být podle podmínek jejího průběhu rozdělena na homogenní a heterogenní.

Homogenní nukleace představuje energeticky náročnější, a z toho důvodu pouze teoretický model. Krystalizační zárodky v tomto případě vznikají uvnitř objemu taveniny, bez přítomnosti jakýchkoliv cizorodých částic. Rovnice (2.2) vyjadřuje změnu volné entalpie pro homogenní nukleaci zárodků kulového tvaru. První člen vyjadřuje vliv rostoucího objemu zárodka, druhý člen pak vliv odporu povrchového napětí na mezifázovém rozhraní zárodek-tavenina. S rostoucím poloměrem zárodka roste významněji vliv objemového členu (roste se třetí mocninou), který tak postupně převáží vliv povrchového odporu. O poloměru zárodka, při kterém vliv objemového členu překoná vliv povrchového napětí, hovoříme jako o kritickém poloměru. Potom, co daný zárodek svou velikostí překoná tento kritický rozměr, stává se již stabilním. Takový zárodek se již nerozpouští zpět do taveniny, ale pokračuje dále v růstu. Průběh hodnot jednotlivých členů v závislosti na rostoucím poloměru je znázorněn v grafu (obr. 5). [8,4]

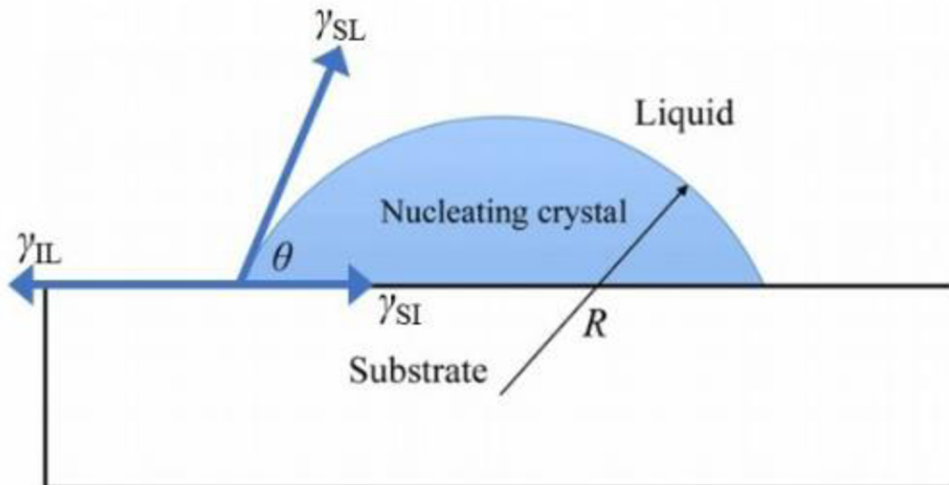
$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.2)$$

- kde: ΔG_V - Změna volné entalpie [J],
 r - Poloměr zárodka [m],
 ΔG - Změna volné entalpie pro vznik zárodka [J],
 γ - Energie fázového rozhraní [J].



Obr. 5 – Homogenní nukleace, velikost změny volné entalpie v závislosti na poloměru zárodka [11].

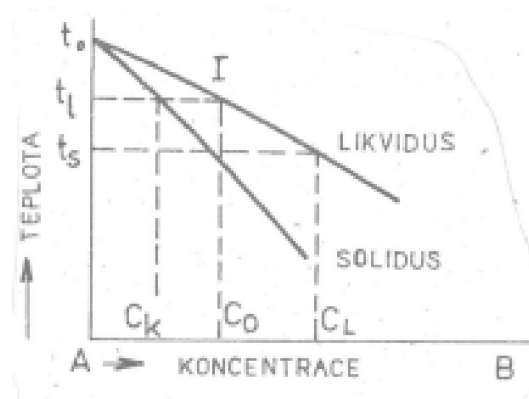
Jak již bylo zmíněno výše, homogenní nukleace představuje energeticky náročnou variantu vzniku zárodků pevné fáze. Z toho důvodu za běžných podmínek prakticky neprobíhá. Zárodky tak běžně vznikají pomocí heterogenní nukleace. Ta se od homogenní nukleace liší přítomností cizorodých částic, na jejichž povrchu vznikají výhodnější energetické podmínky pro vyloučení tuhé fáze. Může jít například o vměstky nebo povrch formy. Takovýto povrch je pak smáčen taveninou, což vede ke snížení hodnoty členu vyjadřujícího v rovnici (2.2) vliv povrchového napětí na mezifázovém rozhraní kov-tavenina. Z toho důvodu pak dochází k poklesu celkové velikosti změny volné entalpie potřebné ke vzniku zárodka kritické velikosti. Heterogenní nukleace je tak méně energeticky náročná než nukleace homogenní. Pro vznik tuhé fáze je tedy třeba menšího přechlazení pod teplotu likvidu. Na obrázku (obr. 6) je znázorněn úhel smáčení θ při heterogenní nukleaci. Jeho hodnoty se pohybují v intervalu $\langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$. Čím je tento úhel menší (povrch je lépe smáčen), tím menší energie (a tedy podchlazení) je třeba k nukleaci. [8]



Obr. 6 – Rovnováha měrných energií rozhraní [12].

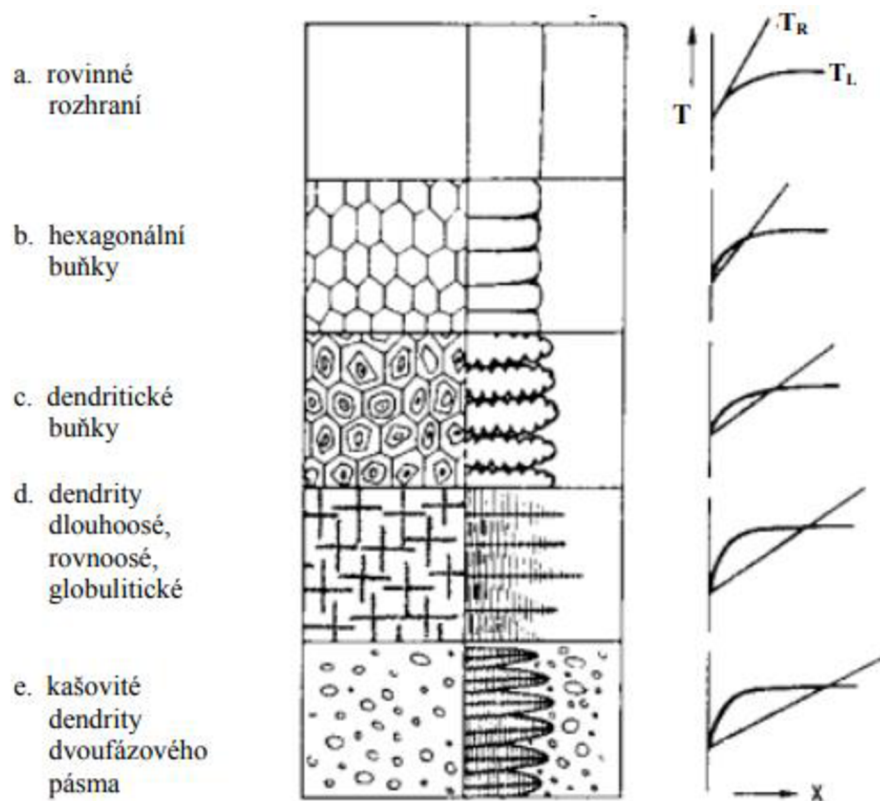
Druhým stádiem krystalizace, následujícím po nukleaci zárodků je růst zrn. Tento děj je silně závislý na velikosti přechlazení, schopnosti difuze, povrchovém napětí na rozhraní tavenina-kov apod. [8]

Během tuhnutí probíhají na fázovém rozhraní tavenina-kov dva transportní děje. Dochází k transportu tepla z taveniny do formy a následně ven do okolí. Druhým dějem je pak transport hmoty z fázového rozhraní. Ten je způsoben výraznou změnou rozpustnosti příměsi v tuhé fázi oproti roztavenému kovu (v našem případě Si v $\alpha(Al)$ a v tavenině). Tento rozdíl je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 7). [13,4]



Obr. 7 – Změna koncentrace příměsi vlivem segregace [13].

Vlivem změny rozpustnosti příměsi (křemíku) v tuhé fázi dochází k jeho vyloučení ze vznikajícího zrna. Tím vzniká v okolí krystalu vrstva taveniny obohacená o tento vyloučený křemík. To má pak za následek lokální změnu teploty likvidu a vznik tzv. konstitučního přechlazení, které pak představuje rozdíl mezi reálnou teplotou v tavenině a teplotou likvidu v dané vzdálenosti od fázového rozhraní. Na jeho základě můžeme rozlišit jednotlivé typy fázových rozhraní. Od nejstrmějšího teplotního gradientu k nejploššímu je možné rozlišit rozhraní rovinné (planární), buněčné (celulární), dendritické a rovnoosé (ekviaxiální). Na následujícím obrázku (obr. 8) je tento vliv graficky znázorněn. [13,14]



Obr. 8 – Vliv konstitučního přechlazení na morfologii fázového rozhraní kov-tavenina [14].

Vzhledem k obvyklým tloušťkám stěn a rychlostem ochlazování hliníkových odlitků je typická dendritická morfologie. Rovinné ani buněčné rozhraní se u odlitků běžně nevyskytuje, teplotní gradienty nebývají za běžných podmínek dostatečně strmé. [14]

2.2.2 Příměsi/legury

Nejvýznamnějším legujícím prvkem je v siluminech křemík (Si). Jeho koncentrace má zásadní vliv na šířku dvoufázového pásma, a tím i na slévárenské vlastnosti slitiny. Čím více se jeho obsah blíží eutektické koncentraci, tím užší dvoufázové pásmo a lepší slévárenské vlastnosti slitina získá. Navíc se se zvyšujícím se obsahem Si zlepšuje i otěruvzdornost a snižuje se tepelná roztažnost. Slitiny s velkým obsahem eutektika je vhodné modifikovat k zaručení dobrých mechanických vlastností. [4,5]

Kromě křemíku, představujícího v siluminech hlavní legující prvek zlepšující jak mechanické, tak především slévárenské vlastnosti hliníku, jsou ve slitinách přítomny i další doprovodné prvky. Jejich vliv na vlastnosti slitiny může být pozitivní, ale některé mohou mít nežádoucí efekt. [4]

Velký význam má legování siluminu mědí a hořčíkem. Vznikají tak ternární slitiny Al-Si-Cu, respektive Al-Si-Mg. Měď (Cu) ve slitinách tvoří již při nízkých obsazích intermetalickou fázi Al_2Cu . Díky tomu dochází ke zvýšení tvrdosti a pevnosti materiálu a zlepšení jeho obrobitelnosti. Naopak způsobuje zhoršení odolnosti proti korozi a snižuje tažnost. Obvykle se obsah mědi pohybuje v hodnotách do 5 %. [4]

Hořčík (Mg) představuje pro siluminy zásadní legující prvek, jelikož umožňuje slitiny precipitačně vytvrzovat. Jeho obsah se pohybuje v rozmezí cca 0,3-0,7 %. Při takto nízkých koncentracích je jeho vliv na technologické vlastnosti zanedbatelný, do slitiny se tedy přidává pouze z důvodu možnosti tepelného zpracování. [4]

Zajímavých vlastností lze dosáhnout legováním Niklem (Ni). Ten tvoří v siluminech intermetalickou fázi Al_3Ni . Při současném obsahu mědi a železa pak vznikají komplexní sloučeniny. Obě tyto fáze se vyznačují dobrou odolností proti zvýšeným teplotám, proto se siluminy legované 1-2 % Ni využívají pro součásti pracující za vyšších teplot. [4]

Hlavním nežádoucím prvkem ve slitinách Al-Si je železo (Fe). To vytváří ostrohranné jehlicovité intermetalické fáze $\beta-AlFeSi$, které výrazně snižují hodnoty mechanických vlastností odlitků. Do taveniny se železo dostává nejčastěji ze vsázky při tavně. Jeho maximální povolené obsahy jsou do 0,15 % pro vysokopevné odlitky, pro běžné odlitky je pak tolerován obsah do 0,6 %. Výjimku představují odlitky lité technologií tlakového lití, kde se obsahy železa pohybují okolo 1 %. Důvodem je snížení lepení kovu ke stěnám forem, a tak i zvýšení jejich životnosti. [4]

Nežádoucí účinky železa ve struktuře siluminů lze do jisté míry snížit přísadou vhodného množství manganu (Mn). Uvádí se, že obsah Mn by měl být asi poloviční oproti obsahu železa. Mangan ve slitině způsobuje změnu morfologie intermetalické fáze $\beta-AlFeSi$ na kompaktnější útvary dle tvaru označované jako čínské písmo (anglicky chinese script). Tyto útvary jsou tvořeny fází $\alpha-AlFeMnSi$ o složení $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$. [4]

2.2.3 Možnosti ovlivnění průběhu tuhnutí

Zásadní vliv na mechanické vlastnosti má struktura materiálu. Jednoduše řečeno, čím jemnější je struktura slitiny, tím lepší mechanické vlastnosti u ní lze předpokládat. Zjemnění struktury lze dosáhnout několika způsoby. Pokud je zajištěn dostatečný odvod tepla z odlitku, a tím i rychlost ochlazování, je vlivem většího přechlazení taveniny umožněn vznik zárodků s nižším kritickým poloměrem. Díky tomu se stanou stabilními i zárodky, které by jinak v tavenině opět zanikly. Větší množství zárodků pak nutně znamená zjemnění struktury. Vlivem rychlosti ochlazování na vlastnosti materiálu se v literatuře věnuje např. [15]. [4,16,17]

Jinou možnost zjemnění struktury odlitku představuje očkování. To přichází na řadu především tehdy, když není možno zaručit dostatečně rychlé ochlazování, tj. především u silnostěnných odlitků. Princip očkování spočívá ve zvyšování počtu zárodků pro heterogenní nukleaci primární fáze (v případě podeutektických siluminů fáze $\alpha(Al)$). Toho je dosaženo vnášením vhodných prvků, které takovéto zárodky vytvářejí. Pro siluminy je to především titan (Ti), ten někdy bývá používán v kombinaci s bórem (B). Očkování se provádí očkovacími předslitinami, případně očkovacími solemi. [4]

Titan v tavenině reaguje s hliníkem za vzniku sloučeniny $TiAl_3$. Kolem těchto částic následně vzniká obálka tuhého roztoku $\alpha(Al)$, ze které následně rostou dendrity hliníku. Reakci popisuje rovnice (2.3). [4]



Očkovací účinek však v tavenině není trvalý, dochází k tzv. odeznívání, kdy se vzniklé zárodky $TiAl_3$ v tavenině opět rozpouštějí. Očkovací účinek obvykle trvá asi 30-45 minut. Zlepšení vlastností očkovadla lze dosáhnout přidáním bóru, ten prodlužuje dobu odeznívání. Očkovací účinek tak dokonce může trvat i po přetavení slitiny. Bór tvoří s hliníkem a titanem intermetalické fáze TiB_2 , AlB_2 či $(Al,Ti)B_2$, které jsou mnohem menší než $TiAl_3$. Navíc mají očkovací účinek již při nízkých hodnotách přechlazení. To je výhodné zejména u silnostěnných odlitků. Očkovací předslitiny obvykle obsahují do 5 % Ti a do 1 % B. [4]

Kromě jemnosti zrn primární fáze má na výsledné vlastnosti siluminu vliv také morfologie eutektika. U podeutektických slitin je řídicí fází krystalizace fáze $\alpha(Al)$, eutektikum se pak následně ukládá v mezidendritických prostorech. Zde při nevhodné morfologii může působit

vrubovým účinkem. Eutektiku slouží jako krystalizační zárodky částice *AlP*, jejich obsah (respektive obsah fosforu) tak má zásadní vliv na morfologii eutektika. [4]

Dle morfologie lze křemičité eutektikum rozdělit na zrnité, lamelární a modifikované. Zrnité eutektikum vzniká při relativně vysokých obsazích fosforu 5-10 ppm. Struktura je tvořena shluky polyedrických zrn případně hrubými lamelami křemíku. Lamelární eutektikum se tvoří při nízkých obsazích fosforu (asi 1-2 ppm). Vzniká za většího přechlazení než zrnité eutektikum. Struktura je tvořena jemnými lamelami křemíku uloženými v mezidendritických prostorech. [4,16]

Posledním typem eutektika je eutektikum modifikované. To vzniká díky modifikaci taveniny nejčastěji sodíkem (*Na*) nebo stronciem (*Sr*). Silnějšího efektu je dosaženo při použití sodíku. Na druhou stranu je ale modifikační účinek *Na* poměrně krátký, obvykle 15-20 minut. Stroncium sice není při modifikaci tak účinné jako sodík, jeho rychlost odeznívání je ale mnohem menší, modifikační účinek *Sr* trvá i několik hodin. [4]

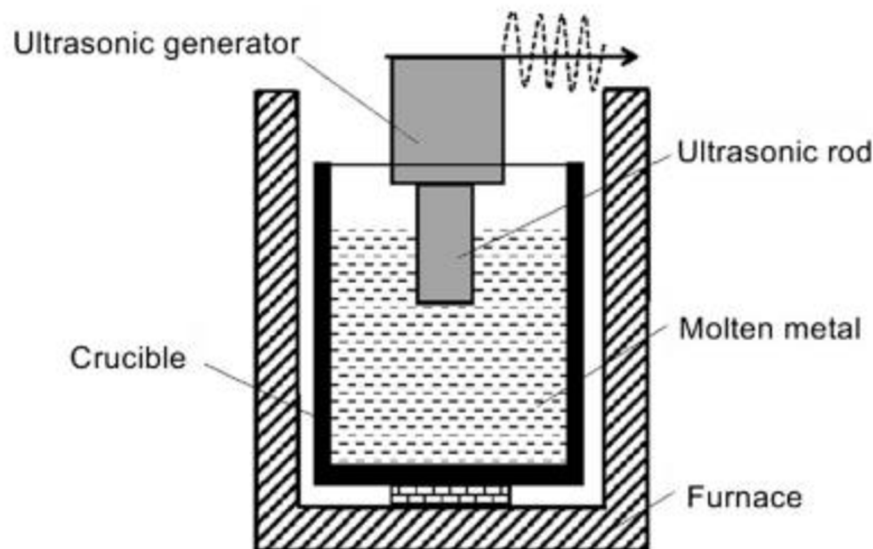
Princip modifikace spočívá v reakci krystalizačních zárodků dle rovnice (2.4). Fosfor je vázán na sodík, tím je neutralizován. Krystalizace křemíku pak probíhá dvojčatěním. *Si* je postupně vytlačován z postupujícího fázového rozhraní hliník-tavenina, modifikační prvky mu zároveň brání v růstu, nezbyvá tedy jiná možnost než právě dvojčatění. Vzniká tak jemná globulární struktura. [4]



Obsahy prvků nutných k modifikaci se liší podle jejich modifikačního účinku. Pro sodík platí, že k úspěšné modifikaci třeba zhruba 50-100 ppm. U stroncia toto množství stoupá až na hodnoty 150-200 ppm, u eutektických slitin se může obsah pohybovat dokonce až do 400 ppm. [4]

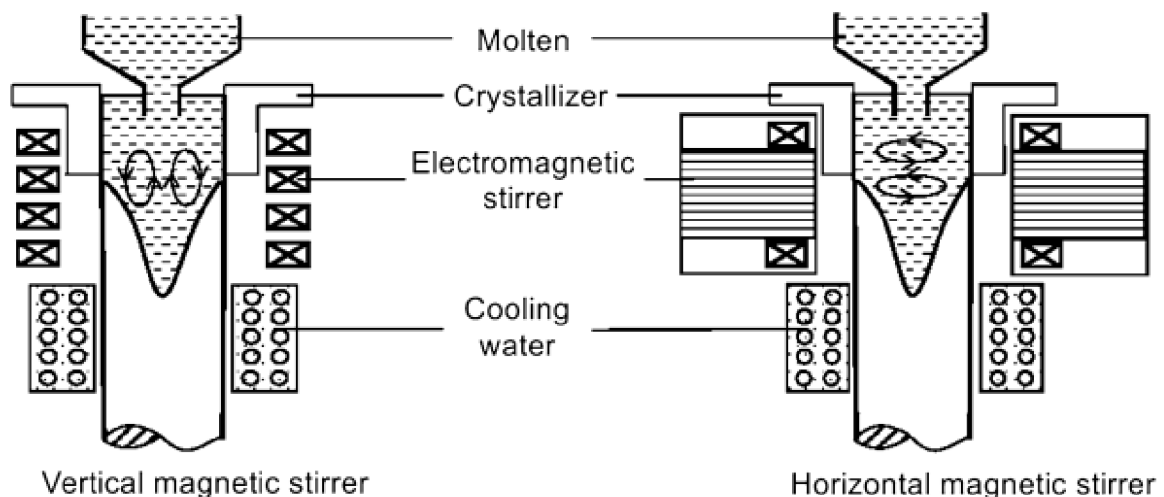
Další významnou možností je zjemnění struktury metodou tzv. multiplikace dendritů. Podstatou této metody je lámání jednotlivých větví již ztuhlých dendritů vlivem pohybu (míchání) taveniny. Tyto ulomené části dendritů pak představují nové zárodky pro růst tuhé fáze. Dochází tak k navýšení počtu zárodků a tím i ke zjemnění struktury materiálu. [18;19;17]

Pohyb taveniny je zajišťován zásahem zvenčí, kterým je umožněna vibrace, či míchání taveniny. Toho je možno docílit mechanickým působením, tedy pohybem formy. Může se jednat např. o rotaci formy se střídáním směru otáčení vždy po určitém počtu otáček tak, aby nemohlo dojít k ustálení proudění taveniny, ale bylo vynuceno její promíchávání. Další možností vyvolání vibrací taveniny je použití ultrazvuku. Principem technologie míchání taveniny pomocí ultrazvuku je vznik kavitace, drobných dutin či „bublin“, v okolí ultrazvukové trubice. Tyto kavitace pak mohou sloužit také jako nukleační zárodky pro vodík rozpuštěný v tavenině. Metoda má tedy také pozitivní vliv na odplynění taveniny. Po překročení určité hranice počtu kavitací, dochází ke zborcení těchto dutin za vzniku tlakového pulzu, který má za následek ulamování větví dendritů. Schéma zařízení pro ultrazvukové míchání taveniny je uvedeno na obrázku (**obr. 9**). [18;19;20;17]



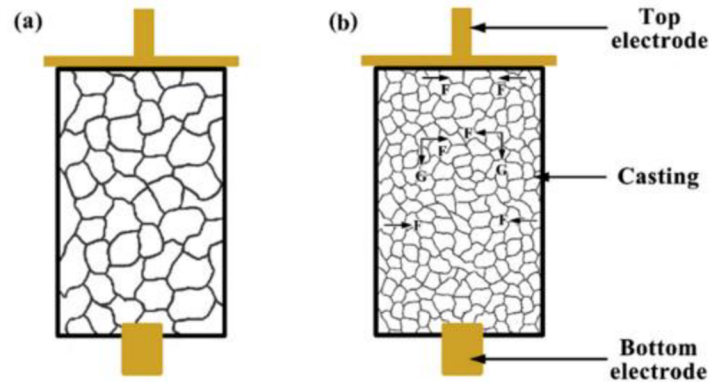
Obr. 9 – zařízení pro míchání taveniny pomocí ultrazvuku [17].

Kromě mechanicky vyvolaného promíchávání taveniny existují také metody elektromagnetického míchání a metoda elektrického proudového pulzu. Schéma zařízení pro elektromagnetické míchání taveniny je uvedeno na obrázku (**obr. 10**). Zařízení je tvořeno cívkou umístěnou okolo krystalizátoru či kelímku (pánve). Magnetické pole vzniklé v tavenině indukuje Lorenzovu sílu, která způsobuje rozdíly v tlaku a tím i intenzivní proudění roztaveného kovu. Vlivem tohoto proudění pak dochází k ulamování větví dendritů, či k odtržení nukleačních zárodků od stěny kelímku a jejich rozptýlení do taveniny, což zvyšuje celkový počet nukleačních zárodků v tavenině. Větší počet nukleačních zárodků pak znamená jemnější strukturu. [17]



Obr. 10 – schéma zařízení pro elektromagnetické míchání taveniny [17].

Metoda elektrického proudového pulzu spočívá k připojení taveniny ke dvěma elektrodám (viz **obr. 11**). Proudový pulz vyvolá proudění taveniny, které zvýší během tuhnutí kovu teplotní a koncentrační fluktuaci ve dvoufázovém pásmu. Toto nucené proudění taveniny pak podporuje oddělení nukleačních zárodků od stěn formy. Dochází tak opět k navýšení počtu nukleačních zárodků a tím i ke zjemnění struktury. [21]



Obr. 11 – vliv metody elektrického proudového pulzu na strukturu materiálu [21].

2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku

Tepelné zpracování představuje další ze způsobů, jak zvýšit mechanické vlastnosti slitin hliníku. Dále se pomocí něj dosahuje snížení vnitřních pnutí, případně homogenizace struktury. Nejvýznamnějším druhem tepelného zpracování je vytvrzování. To lze provádět u slitin s výraznou změnou rozpustnosti v tuhém stavu. Tuto podmínku splňují např. slitiny na bázi Al-Cu, či ternární slitiny Al-Si-Cu a Al-Si-Mg. [4,16]

Princip vytvrzování spočívá v rozpuštění intermetalických fází (typicky Mg_2Si) a jejich následné vyloučení ve formě koherentních (či semi-koherentních) útvarů. Proces se skládá ze tří dílčích operací. [4]

Nejprve je provedeno rozpouštěcí žíhání, kdy dojde k rozpuštění intermetalické fáze do tuhého roztoku $\alpha(Al)$. To probíhá při teplotách těsně pod eutektickou teplotou, protože je třeba překročit křivku změny rozpustnosti pro dané složení. [4]

Následuje rychlé ochlazení odlitku, tak aby byla co nejvíce omezena difuze a rozpuštěný prvek nemohl vytvořit původní sloučeninu. Vzniká tak přesycený tuhý roztok. [16]

Poslední fází je samotné precipitační vytvrzování. Při něm dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku, kdy přísadový prvek difunduje do mikroskopických oblastí na tento prvek bohatých, kde tvoří nukleační zárodky např. v podobě Mg_2Si . Na těchto zárodcích pak roste z počátku koherentní precipitát. Tento proces je spojen s nárůstem pevnosti a tvrdosti materiálu. [4]

Vytvrzování lze provádět za tepla, nebo za studena. Za tepla se vytvrzování provádí u slitin typu Al-Si-Mg. Obvyklá teplota se pohybuje v rozmezí asi 140-180 °C při výdrži 3-8 hodin. Za studena se vytvrzují slitiny obsahující měď, např. AlCu4, či slitiny typu Al-Si-Cu. Tento proces je ovšem daleko pomalejší než vytvrzování za tepla, běžně odlitek dosahuje konečných pevností až po uplynutí 100-150 hodin. [4]

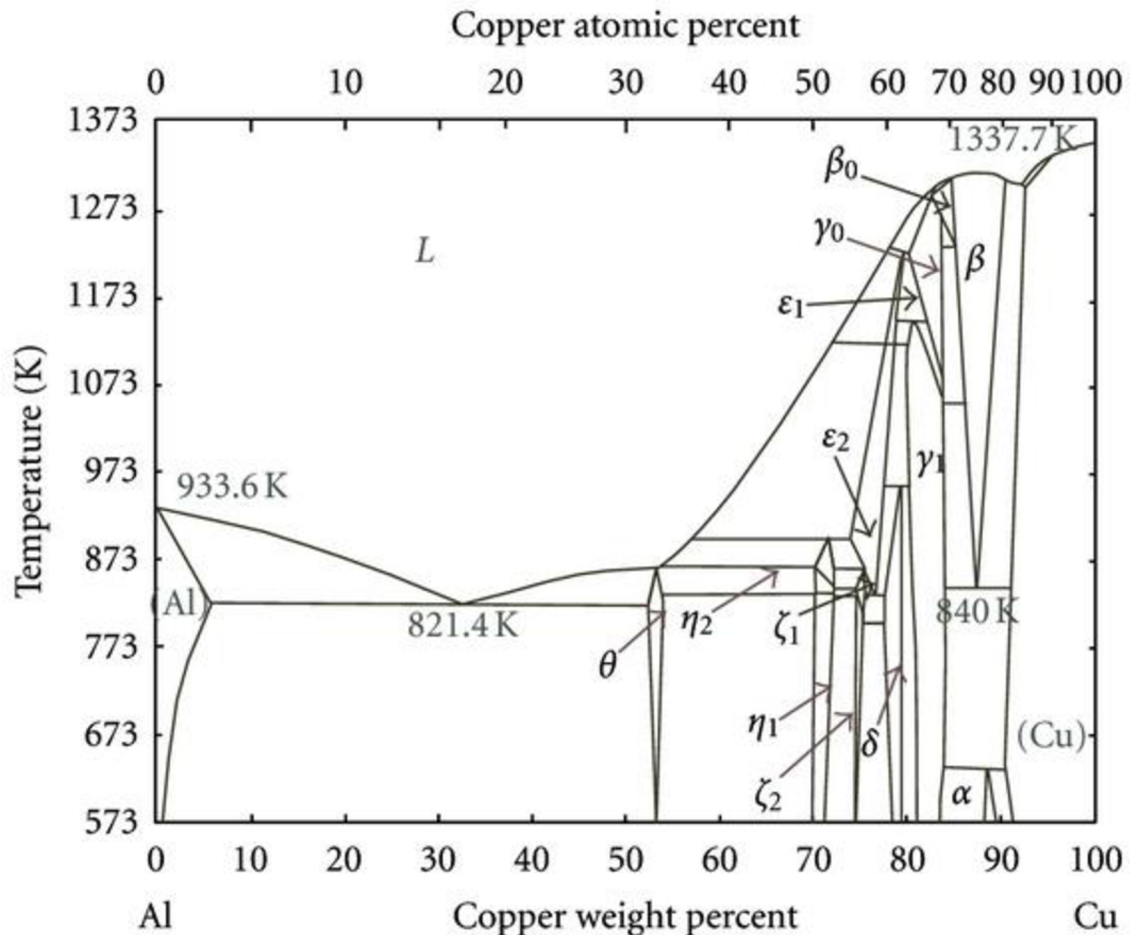
2.4 Další slitiny hliníku

Kromě siluminů existují i další slévárenské slitiny hliníku, jejichž hlavním legujícím prvkem není křemík. Jsou to především slitiny na bázi mědi, hořčíku a zinku.

2.4.1 Al-Cu

Slitiny tohoto typu se vyznačují výraznou změnou rozpustnosti v tuhém stavu, díky čemuž jsou vytvrzitelné a mohou dosahovat vysokých pevností až nad 400 MPa. Pro potřeby vytvrzení však nemohou slitiny přesáhnout maximální rozpustnost mědi v hliníku, která je při eutektické

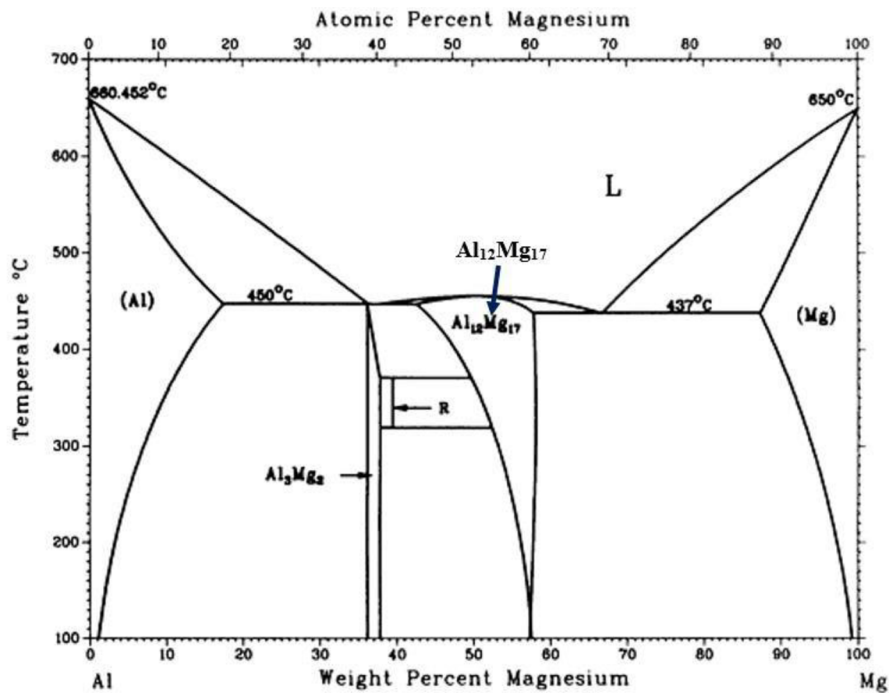
teplotě (548 °C) 5,65 % Cu. Z tohoto důvodu jsou využívány slitiny o obsahu mědi 4-5 %. To je také příčinou špatných slévarenských vlastností způsobených příliš širokým dvoufázovým pásmem při tomto složení. Binární fázový diagram slitiny je na následujícím obrázku (**obr. 12**). [4]



Obr. 12 – binární fázový diagram Al-Cu [22].

2.4.2 Al-Mg

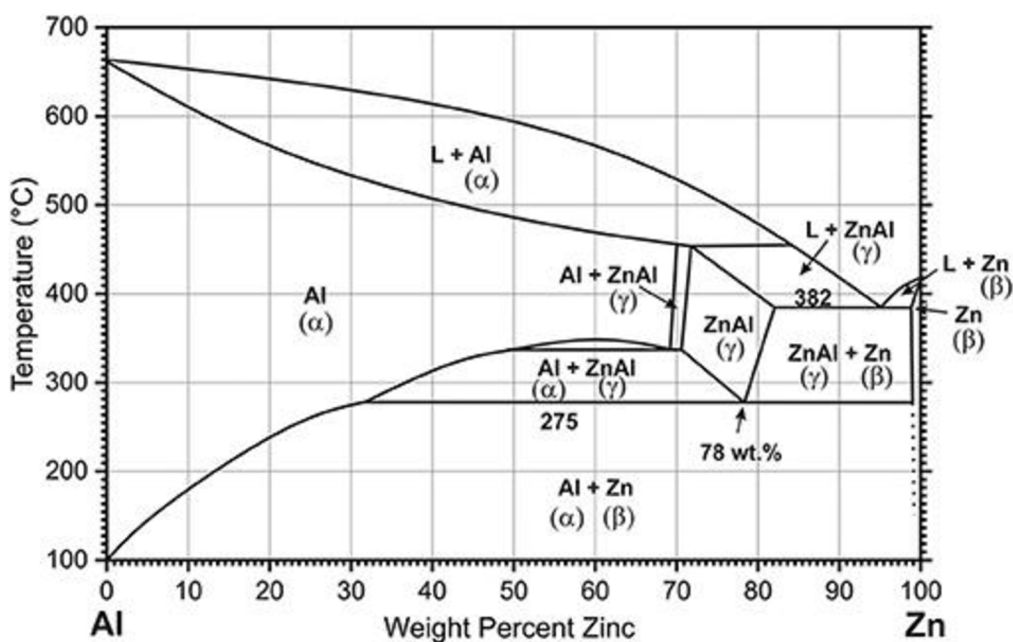
Slitiny Al-Mg se vyznačují velkou změnou rozpustnosti v tuhém stavu. Eutektická teplota je poměrně nízká, dosahuje pouze 450 °C, a eutektická koncentrace Mg je 34,5 %. Vzniká tak široké dvoufázové pásmo a slévarenské vlastnosti jsou tedy špatné. Jistého zlepšení je možno dosáhnout legováním křemíkem, ale tím dochází zároveň ke snížení tažnosti, proto je lépe se tomu vyvarovat. Slitina se dále vyznačuje výbornou obrobiteľností a ležitelností, je také vhodná pro povrchové úpravy (např. eloxování). Binární fázový diagram slitiny Al-Mg je na následujícím obrázku (**obr. 13**). V praxi se používají slitiny o obsahu Mg 3, 5 a 9 %. [4,5]



Obr. 13 – binární fázový diagram Al-Mg [23].

2.4.3 Al-Zn

Za vysokých teplot vykazuje zinek vysokou rozpustnost v hliníku (až 70 %). Se snižující se teplotou pak dochází k výraznému snížení rozpustnosti, kdy při pokojové teplotě je rozpustnost zinku pouze cca 2 %. V technických aplikacích se používají slitiny s poměrně nízkým obsahem zinku, pouze 5-7 %, které se zároveň legují hořčíkem do obsahu 1 % Mg. Hořčík umožňuje ve slitině vznik intermetalické fáze ($MgZn_2 + Al_2Zn_3Mg_3$), díky které je možné provádět samovolné vytvrzování za studena. Dosahuje se tak pevností až 250 MPa. Slévárenské vlastnosti slitin však nejsou dobré, hlavním problémem je silný sklon k tvorbě staženin. Binární fázový diagram slitiny Al-Zn je uveden na obrázku (obr. 14). [4]



Obr.14 – binární fázový diagram Al-Zn [24].

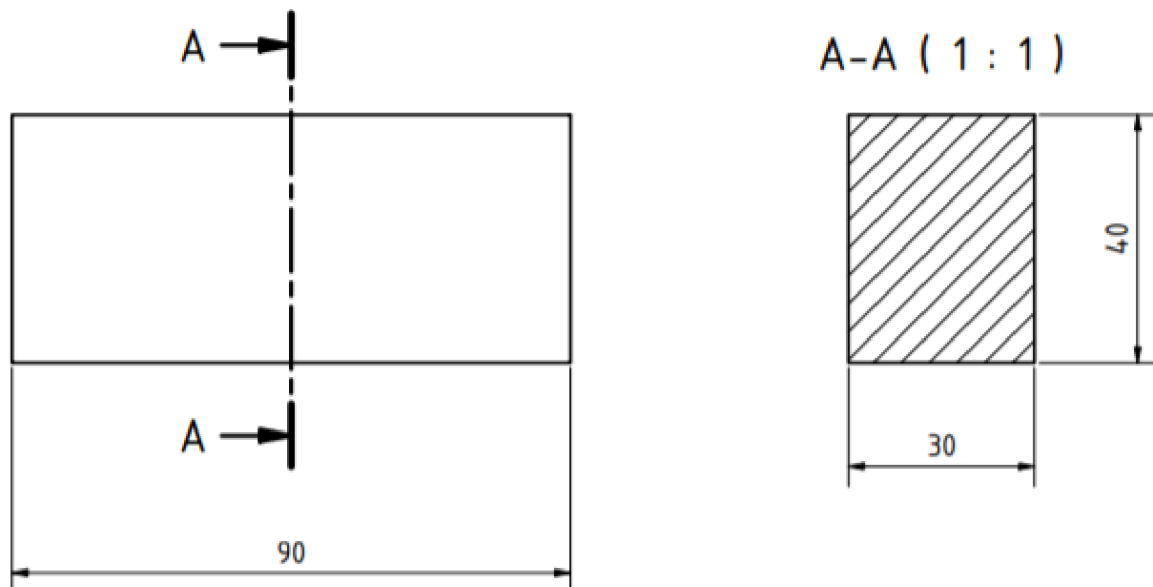
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentu je ověřit vliv rychlosti ochlazování během tuhnutí na výslednou mikrostrukturu, a především výsledné mechanické vlastnosti odlitků ze slitin hliníku odlévaných technologií přesného lití na vytavitelný voskový model. Práce byla provedena ve spolupráci s firmou Alucast, s.r.o. Jako zkoumaná slitina byl vybrán silumin AlSi7Mg0,3. Zkoumán byl konkrétně vliv tloušťky stěny a vliv režimu ochlazování v průběhu tuhnutí odlitku v keramické skořepině.

3.1 Podmínky experimentu

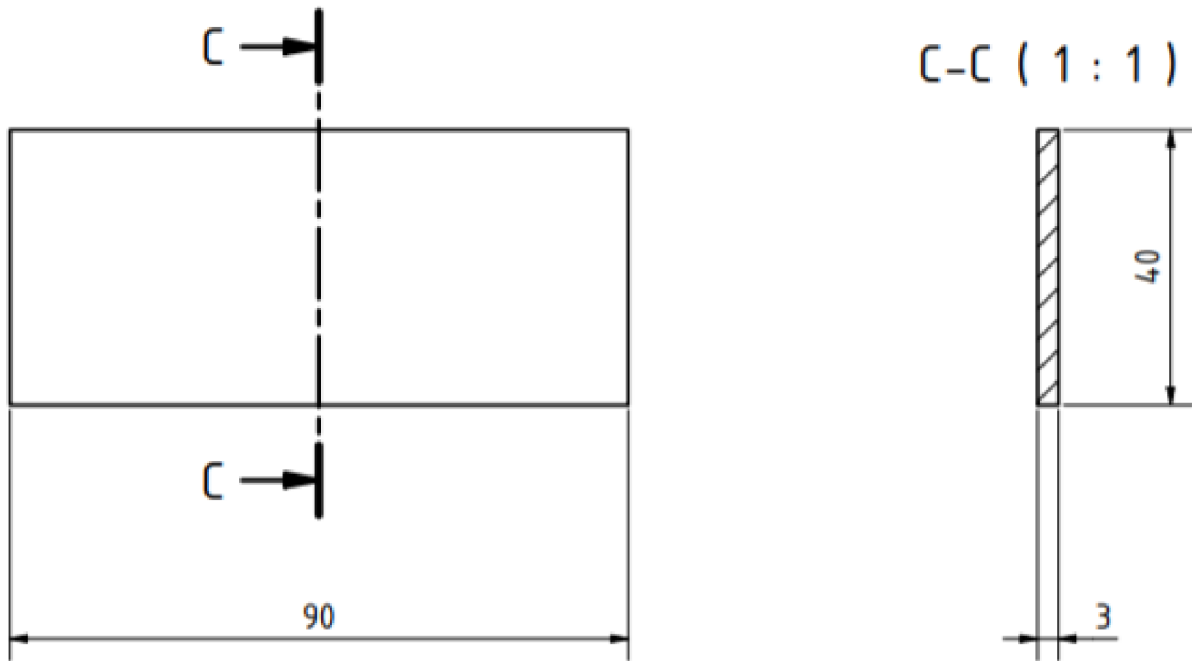
První vliv, tedy vliv tloušťky stěny, byl simulován pomocí konstrukce samotných vzorků. Byly zhotoveny vzorky tří různých průřezů (3×40, 20×20 a 30×40 mm). Vliv režimu ochlazování pak byl sledován pro tři metody chlazení, a to ochlazování do kapaliny, ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem a chladnutí za běžných atmosférických podmínek.

Na obrázku (**obr. 15**) je zachycen vzorek reprezentující silnostěnné části odlitku. Z tohoto vzorku byla zhotovena dvě zkušební tělesa, jedno v ose vzorku a druhé v povrchové části. U tělesa nacházejícího se v oblasti osy vzorku jsou vlivem nejpomalejšího tuhnutí a ochlazování předpokládány nejhorší výsledky jak mikrostruktury, tak konečných mechanických vlastností. Vzhledem k rozměrům vzorku bylo možno dále zhotovit i druhé zkušební těleso reprezentující povrchovou část tohoto vzorku. Toto zkušební těleso pak nabízí zajímavé srovnání (jak mikrostruktury, tak mechanických vlastností) vůči ose vzorku, ale i vůči vzorkům reprezentujícím tenkostěnné části odlitku.



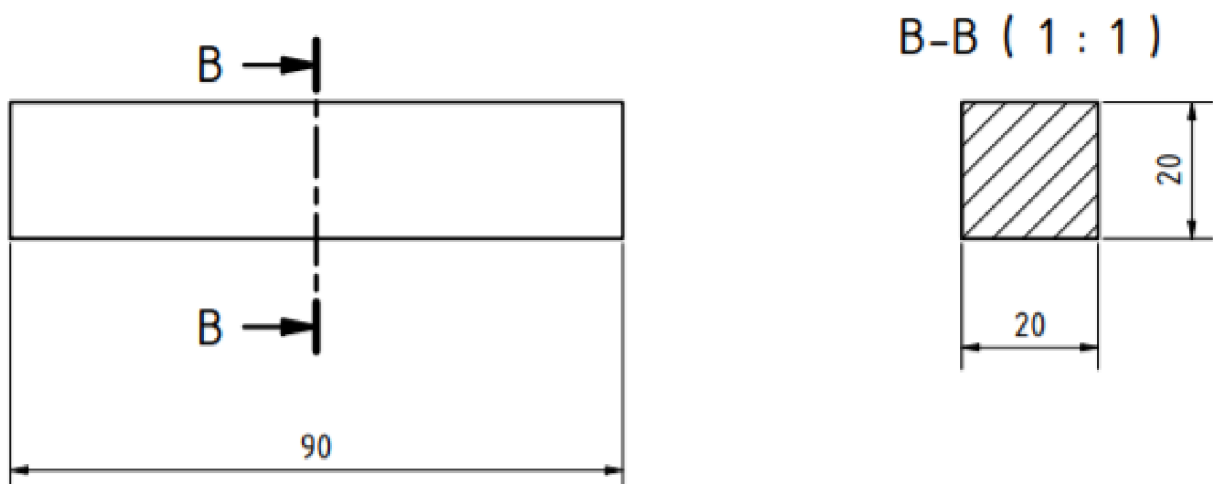
Obr. 15 – vzorek modelující chování silnostěnné části odlitku.

Jako druhý byl volen vzorek reprezentující tenkostěnné části odlitku. Pro tyto potřeby byl zhotoven model o průřezu 3×40 mm, který je schematicky znázorněn na následující obrázku (**obr. 16**). V případě tohoto vzorku jsou vzhledem k rychlejšímu ochlazování předpokládány nejvyšší mechanické vlastnosti a nejjemnější struktura.



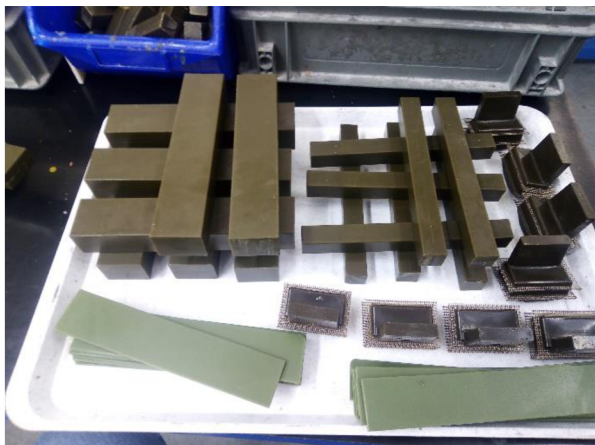
Obr. 16 – vzorek modelující tenkostěnné části odlitku.

Posledním typem vzorku, zhotoveným v rámci experimentu, bylo těleso o průřezu 20×20 mm, které představuje určitý střed mezi oběma extrémními rozměry. Ochlazování by v tomto případě mělo být rychlejší než u silnostěnného tělesa a pomalejší než u tělesa tenkostěnného, podobně hodnoty mechanických vlastností by dle předpokladu měly ležet v intervalu mezi hodnotami naměřenými pro ostatní vzorky. Na následujícím obrázku (**obr. 17**) jsou opět schematicky zachyceny tvar a rozměry tohoto vzorku.

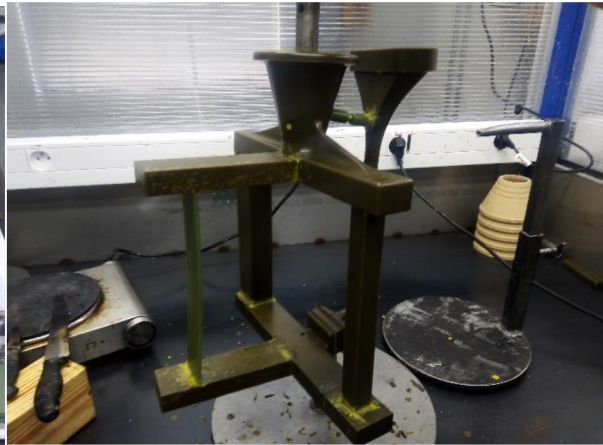


Obr. 17 – vzorek modelující střední stěnu odlitku.

Všechny jednotlivé modely vzorků jsou zachyceny na následující fotografii (**obr. 18**). Tyto modely byly následně sestaveny do stromečku (**obr. 19**).



Obr. 18 - Voskové modely vzorků.



Obr. 19 - Sestavený stromeček.

Stromečky byly následně ručně obaleny keramikou, standardním postupem, který firma Alucast, s.r.o. používá pro své odlitky. Keramické skořepiny jsou znázorněny na následujících fotografiích (**obr. 20** a **obr. 21**).



Obr. 20 - Hotová skořepina 1.



Obr. 21 - Hotová skořepina 2.

Následně byly odlity zkušební odlitky, pro každou z metod byly zhotoveny vždy tři odlitky, celkem tedy bylo odlito 9 kusů. Všechny byly provedeny z jedné tavby (jak bylo zmíněno výše, zvolenou slitinou byl silumin AlSi7Mg0,3) do vyžháných předežhřátých skořepin. Skořepiny i s roztaveným nalitým kovem byly následně umístěny zpět do žhací pece, kde byly po dobu 30 minut temperovány na teplotu 700 °C (**obr. 22**). Cílem tohoto kroku bylo dosažení konstantní počáteční teploty kovu v celém objemu odlitku, a tedy i eliminace vlivu lící teploty a proudění kovu ve formě na výsledky experimentu. Po uplynutí dané doby pro temperaci roztaveného kovu v žhací peci byly skořepiny současně vytaženy, uloženy na lící pole a podrobeny jednotlivým režimům ochlazování.

Chemické složení tavby je uvedeno v tabulce (**tab. 1**). Naměřená hodnota Dichte indexu byla 0,57.

Tab. 1 Chemické složení tavby.

	Al %	Cu %	Mg %	Si %	Fe %	Mn %	Ni %	Zn %	Pb %
Horní mez	-	0,1	0,45	7,5	0,25	0,1	0,05	0,1	-
Naměřeno	92,46	0,0014	0,359	6,896	0,106	0,0094	<0,002	0,0052	<0,005
Dolní mez	-	-	0,25	6,5	-	-	-	-	-
	Sn %	Ti %	Cr %	Ag ppm	B ppm	Ba ppm	Be %	Bi ppm	Ca ppm
Horní mez	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-
Naměřeno	<0,002	0,119	<0,002	<10,00	<10,00	<10,00	<0,002	<30,00	27,33
Dolní mez	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-
	Cd ppm	Co ppm	Ga ppm	Li ppm	Na ppm	Sr ppm	V ppm	Zr ppm	-
Horní mez	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Naměřeno	<20,00	<20,00	97,05	<10,00	<5,000	<10,00	72,62	<10,00	-
Dolní mez	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Obr. 22 - Odlévání zkušebních odlitků.

Tyto procesy jsou ilustrovány na následujících fotografiích. Dosažení nejlepších výsledků bylo předpokládáno při použití metody ochlazování pomocí ponoření do kapaliny (**obr. 23**), která umožňuje nejrychlejší odvod tepla a tím i nejvyšší rychlost ochlazování.



Obr. 23 - Ochlazování do kapaliny.

Dále byla posuzována metoda ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem (**obr. 24**), která nabízí méně náročnou alternativu ovlivnění rychlosti ochlazování, avšak odvod tepla není tak rychlý jako v případě kapaliny. Výsledné vlastnosti kovu tak v tomto případě byly předpokládány nižší.



Obr. 24 - Ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem.

Nejnižší mechanické vlastnosti byly očekávány u posledního způsobu ochlazování, a to u volného chladnutí za běžných atmosférických podmínek (**obr. 25**).



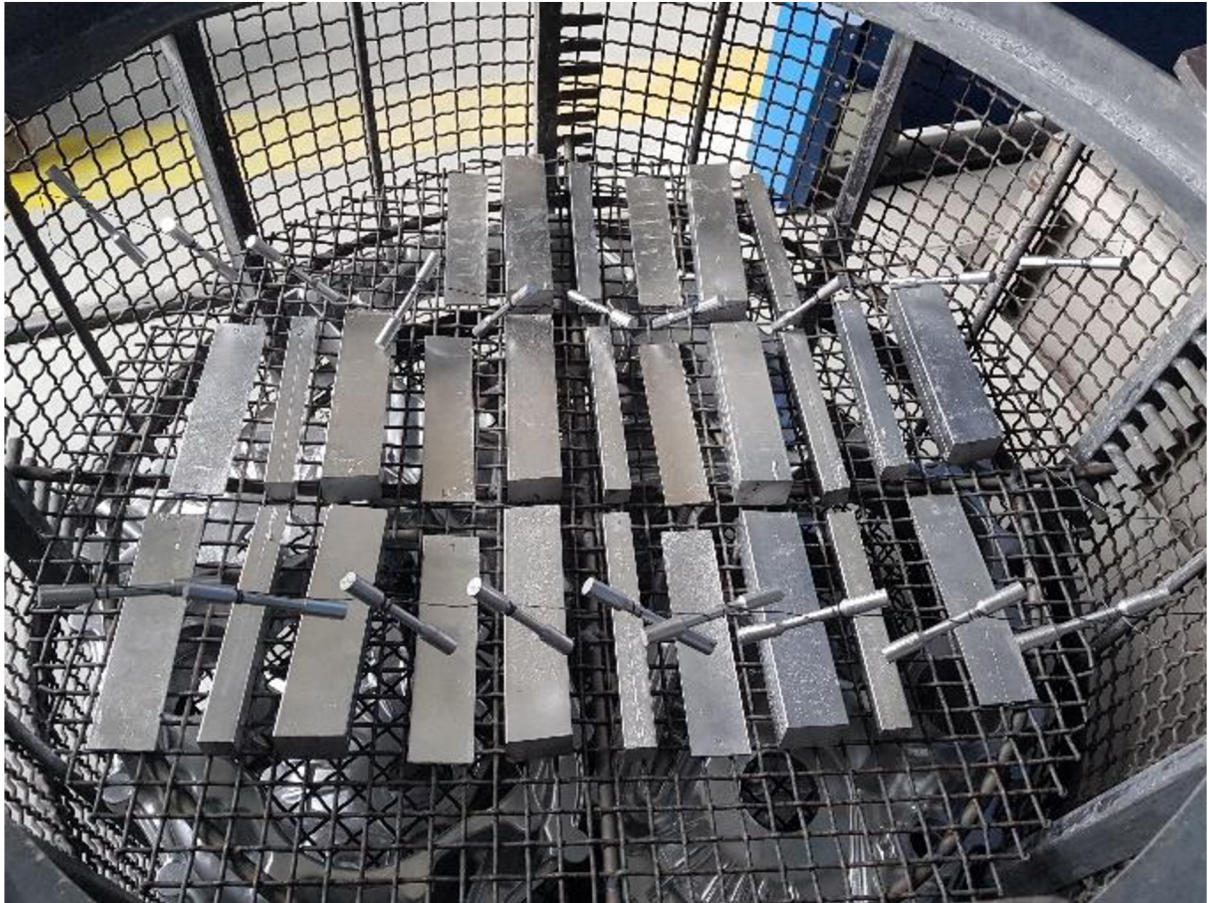
Obr. 25 - Ochlazování na volné atmosféře.

Hotový odlitek po vytlučení z keramické skořepiny je na následující fotografii (**obr. 26**). Zhotoveno bylo celkem devět takovýchto odlitků, vždy tři pro každý ze sledovaných režimů ochlazování.



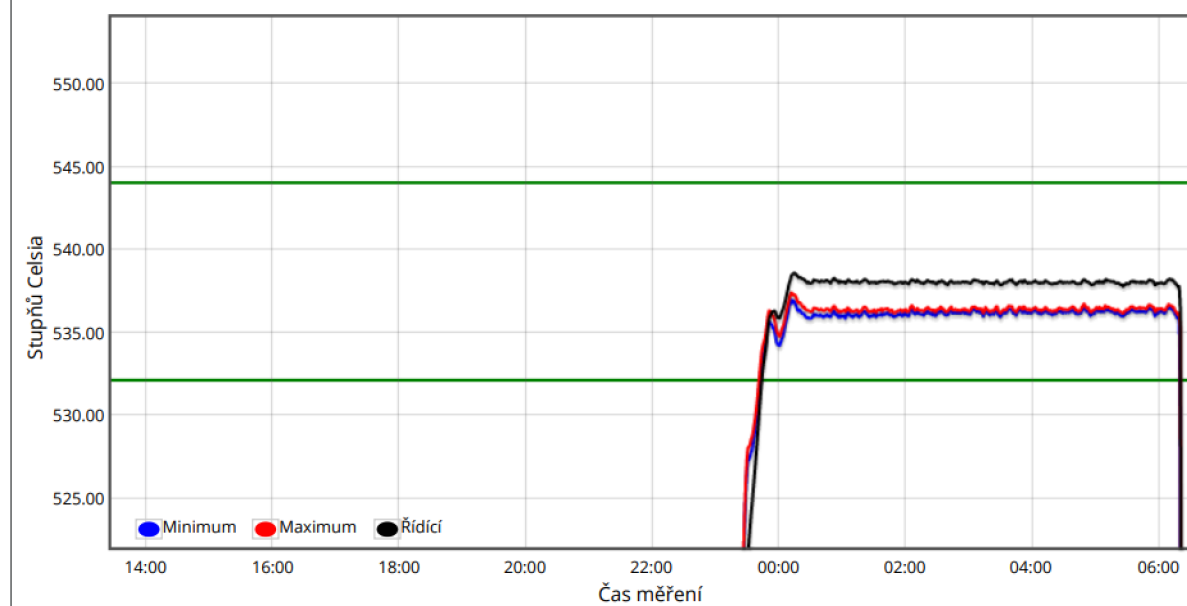
Obr. 26 - Zkušební odlitek

Po otryskání byly odlitky rozřezány na jednotlivé vzorky a bylo provedeno tepelné zpracování T6, tedy rozpouštěcí žihání a následné precipitační vytvrzení za tepla (obr. 27). Průběh tepelného zpracování je zachycen v grafech (obr. 28 a obr. 29).



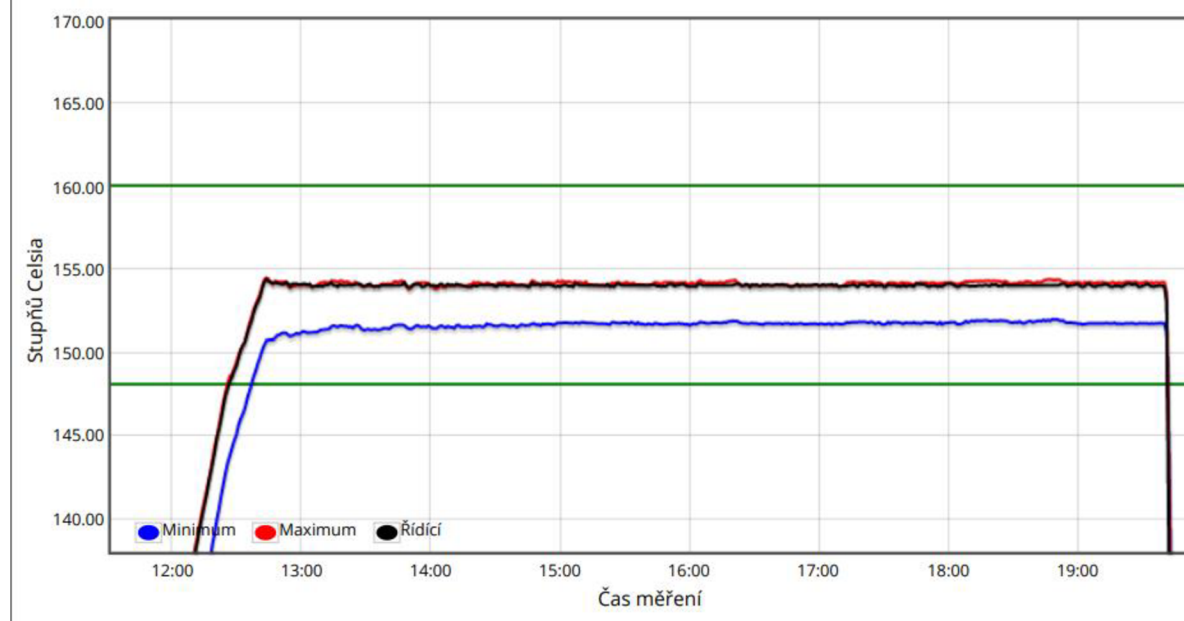
Obr. 27 - Tepelné zpracování vzorků.

Graf teplot pece



Obr. 28 - Graf průběhu tepelného zpracování – žihání.

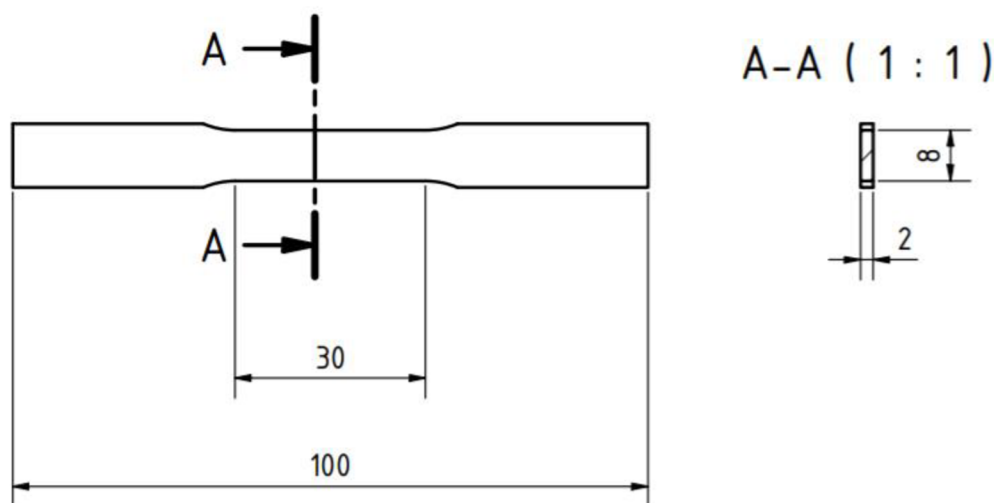
Graf teplot pece



Obr. 29 - Graf průběhu tepelného zpracování – umělé stárnutí.

Z tepelně zpracovaných vzorků byla zhotovena zkušební tělesa pro tahovou zkoušku. Vzhledem k rozměrům vzorků, především pak vzorku modelujícím tenkostěnné odlitky, bylo nutné zhotovit zkušební tělesa (trhací tyčinky) plochá. Aby bylo možno jednotlivé naměřené hodnoty vzájemně porovnávat, byla plochá zkušební tělesa zhotovena i u ostatních vzorků o větším průřezu stěny, které by jinak dovolovaly výrobu standardních zkušebních tyčinek kruhového průřezu o průměru 6 mm, běžně ve firmě používaných k ověřování mechanických vlastností materiálu.

Tvar a rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku (**obr. 30**). Počáteční délka zatížené části L_0 byla 30 mm, průřez zkoušené části byl 8×2 mm, tedy S_0 rovno 16 mm^2 .



Obr. 30 - Zkušební těleso pro tahovou zkoušku.

3.2 Výsledky experimentu

V této kapitole je proveden rozbor měření a porovnání vzorků, respektive mechanických vlastností a struktury materiálu v závislosti na síle stěny a režimu ochlazování odlitku.

3.2.1 Mechanické vlastnosti

V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty pevnosti R_m (**tab. 2**), tažnosti A (**tab. 3**) a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (**tab. 4**).

Tab. 2 Naměřené pevnosti.

Typ vzorku	Režim ochlazování	Pevnost R_m [MPa]		
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Tenká stěna	kapalina	300,3	304,6	296,8
	ofuk	297,6	291,0	293,1
	atmosféra	272,0	258,2	271,2
Střední stěna	kapalina	257,4	277,8	268,7
	ofuk	266,0	250,1	265,3
	atmosféra	235,3	243,0	245,4
Silná stěna osa	kapalina	255,4	251,4	250,7
	ofuk	240,7	239,4	227,6
	atmosféra	230,8	215,7	224,6
Silná stěna povrch	kapalina	247,8	259,7	254,8
	ofuk	224,8	246,1	234,2
	atmosféra	221,4	225,4	225,2

Tab. 3 Naměřené tažnosti.

Typ vzorku	Režim ochlazování	Tažnost A [%]		
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Tenká stěna	kapalina	10,0	16,4	8,6
	ofuk	4,7	4,8	5,8
	atmosféra	1,9	-5,7	1,9
Střední stěna	kapalina	3,9	6,9	4,1
	ofuk	2,8	1,6	2,7
	atmosféra	1,0	1,3	1,3
Silná stěna osa	kapalina	3,1	2,8	3,1
	ofuk	1,0	1,7	1,0
	atmosféra	0,6	0,5	0,8
Silná stěna povrch	kapalina	2,1	3,6	2,9
	ofuk	1,0	1,9	1,2
	atmosféra	0,6	0,9	0,8

Tab. 4 Naměřené meze kluzu.

Typ vzorku	Režim ochlazování	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]		
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Tenká stěna	kapalina	226,2	227,6	222,4
	ofuk	240,6	233,3	229,6
	atmosféra	234,7	12,1	231,6
Střední stěna	kapalina	197,6	204,3	205,9
	ofuk	212,7	207,3	221,4
	atmosféra	207,6	212,0	212,3
Silná stěna osa	kapalina	204,1	204,5	201,7
	ofuk	212,7	202,8	197,7
	atmosféra	213,8	201,6	204,1
Silná stěna povrch	kapalina	200,7	205,1	204,8
	ofuk	195,0	203,3	202,7
	atmosféra	206,0	202,1	200,0

Naměřená data byla ověřena pomocí Grubbsova a Dixonova testu na případný výskyt odlehlých hodnot (hrubých chyb měření). Pro Grubbsův test byly s využitím rovnic (3.1) a (3.2) stanoveny veličiny G_1 pro nejnižší a G_2 pro nejvyšší hodnotu souboru.

$$G_1 = \frac{\bar{x} - x_{(1)}}{s} \sqrt{\frac{n-1}{n}} \quad (3.1)$$

kde: \bar{x} - aritmetický průměr hodnot souboru,
 $x_{(1)}$ - nejmenší hodnota souboru,
 n - počet hodnot souboru,
 s - směrodatná odchylka.

$$G_2 = \frac{x_{(n)} - \bar{x}}{s} \sqrt{\frac{n-1}{n}} \quad (3.2)$$

kde: \bar{x} - aritmetický průměr hodnot souboru,
 $x_{(n)}$ - nejvyšší hodnota souboru,
 n - počet hodnot souboru,
 s - směrodatná odchylka.

Tyto hodnoty byly poté srovnány s kritickou hodnotou, která je pro rozsah statistického souboru $n = 3$ a hladinu významnosti 0,05 rovna 1,412.

Pro Dixonův test byly analogicky pomocí vztahů (3.3) a (3.4) stanoveny veličiny D_1 pro nejnižší a D_2 pro nejvyšší hodnotu souboru.

$$D_1 = \frac{x_{(2)} - x_{(1)}}{x_{(n)} - x_{(1)}} \quad (3.3)$$

- kde: $x_{(n)}$ - nejvyšší hodnota souboru,
 $x_{(1)}$ - nejnižší hodnota souboru,
 $x_{(2)}$ - druhá nejnižší hodnota souboru.

$$D_1 = \frac{x_{(n)} - x_{(n-1)}}{x_{(n)} - x_{(1)}} \quad (3.3)$$

- kde: $x_{(n)}$ - nejvyšší hodnota souboru,
 $x_{(1)}$ - nejnižší hodnota souboru,
 $x_{(n-1)}$ - druhá nejvyšší hodnota souboru.

Kritická hodnota Dixonova testu pro rozsah statistického souboru $n = 3$ a hladinu významnosti 0,05 je rovna 0,941.

Dle definice nulové a alternativní hypotézy obou testů odlehlých hodnot je zkoumaná hodnota ze souboru dat vyloučena jako hrubá chyba měření, pakliže jí příslušící hodnota testovací veličiny (G_1 , G_2 atd.) vyjde větší, než je kritická hodnota této veličiny za daných podmínek (rozsah souboru, hladina významnosti). Testy vyloučily následující vzorky:

- ofuk
 - střední stěna – vzorek č. 2
 - silná stěna (osa) – vzorek č. 2
- atmosféra
 - tenká stěna – vzorek č. 2
 - střední stěna – vzorek č. 1
 - silná stěna (povrch) – vzorek č. 1

Z vyhovujících hodnot byl určen aritmetický průměr vždy pro danou konfiguraci síly stěny a režimu ochlazování (**tab. 5**). Pro tyto teoretické hodnoty byl pomocí Ramberg-Osgoodova vztahu (3.5) sestaven model diagramu tahové zkoušky. Hodnota napětí byla volena v intervalu $\langle 0; R_m \rangle$ s krokem 2,5 MPa, Youngův modul pružnosti pro silumin $E = 70$ GPa.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{R_{p0,2}} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (3.5)$$

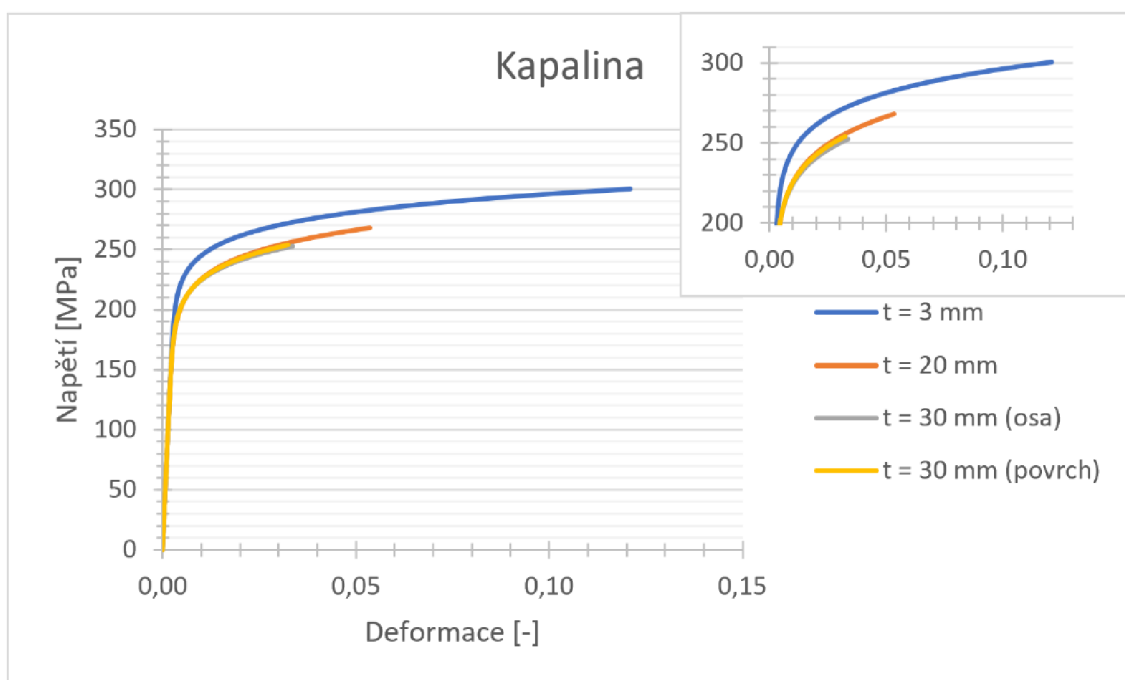
- kde: σ - napětí [MPa],
 ϵ - Deformace [-],
 E - Youngův modul pružnosti v tahu [MPa],
 $R_{p0,2}$ - Smluvní mez kluzu [MPa],
 N - exponent deformačního zpevnění [-].

Tab. 5 – Průměrné hodnoty mechanických vlastností

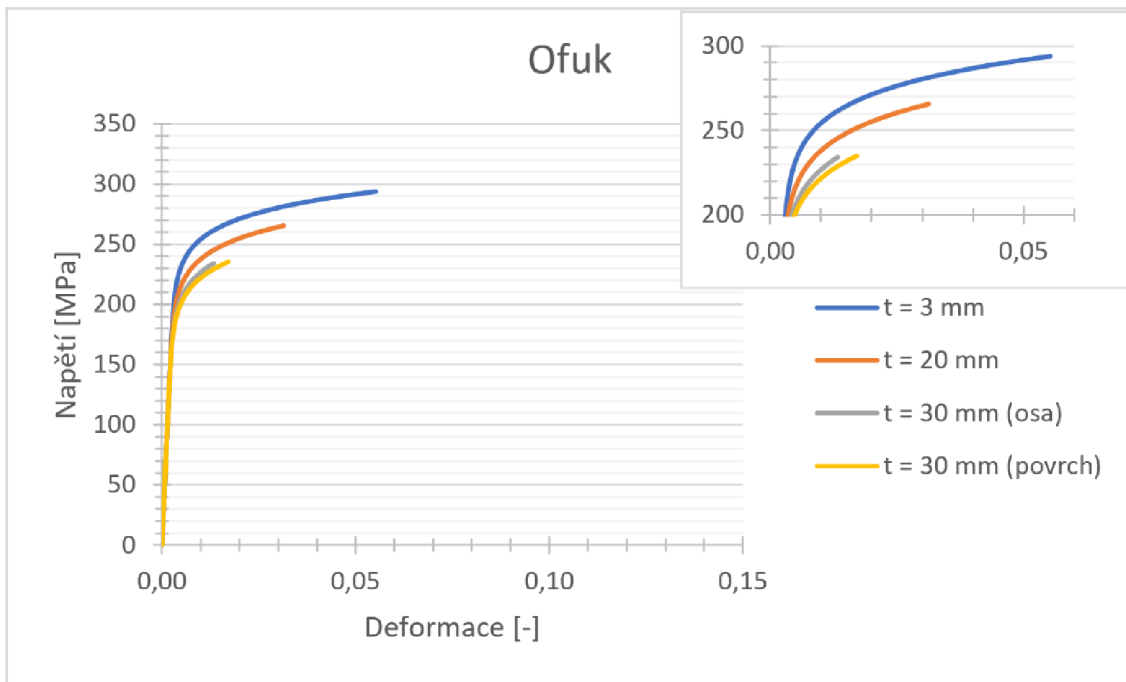
Typ vzorku	Režim ochlazování	A [%]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
Tenká stěna	kapalina	11,67	300,57	225,40
	ofuk	5,10	293,90	234,50
	atmosféra	1,9	271,60	233,15
Střední stěna	kapalina	4,97	267,97	202,60
	ofuk	2,75	265,65	217,05
	atmosféra	1,3	244,20	212,15
Silná stěna osa	kapalina	3,00	252,50	203,43
	ofuk	1,00	234,15	205,20
	atmosféra	0,63	223,70	206,50
Silná stěna povrch	kapalina	2,87	254,1	203,53
	ofuk	1,37	235,03	200,33
	atmosféra	0,85	225,30	201,05

Na následujících grafech, zhotovených výše popsanou metodou, je znázorněn vliv rozdílné tloušťky stěny na mechanické vlastnosti při provedení příslušného režimu ochlazování, tj. ochlazování pomocí ponoření do kapaliny (**obr. 31**), ochlazování pomocí ofuku tlakovým vzduchem (**obr. 32**) a ochlazování na volné atmosféře (**obr. 33**). Z těchto grafů je patrný naprosto zásadní vliv tloušťky stěny odlitku na výsledné mechanické vlastnosti. V případě ochlazování ponořením do kapaliny lze pozorovat velice výrazný nárůst tažnosti provázející snížení tloušťky stěny odlitku. Pro metodu ofukování skořepiny tlakovým vzduchem již tento nárůst není tak výrazný. Vzorky, jejichž ochlazování během tuhnutí nebylo nijak intenzifikováno, pak vykazují celkově nízké hodnoty tažnosti, kdy sice bylo spolu se zmenšující se tloušťkou stěny dosaženo vyšších hodnot tažnosti, avšak ani u tenkostěnných vzorků naměřené hodnoty nepřekročily hranici 2 %.

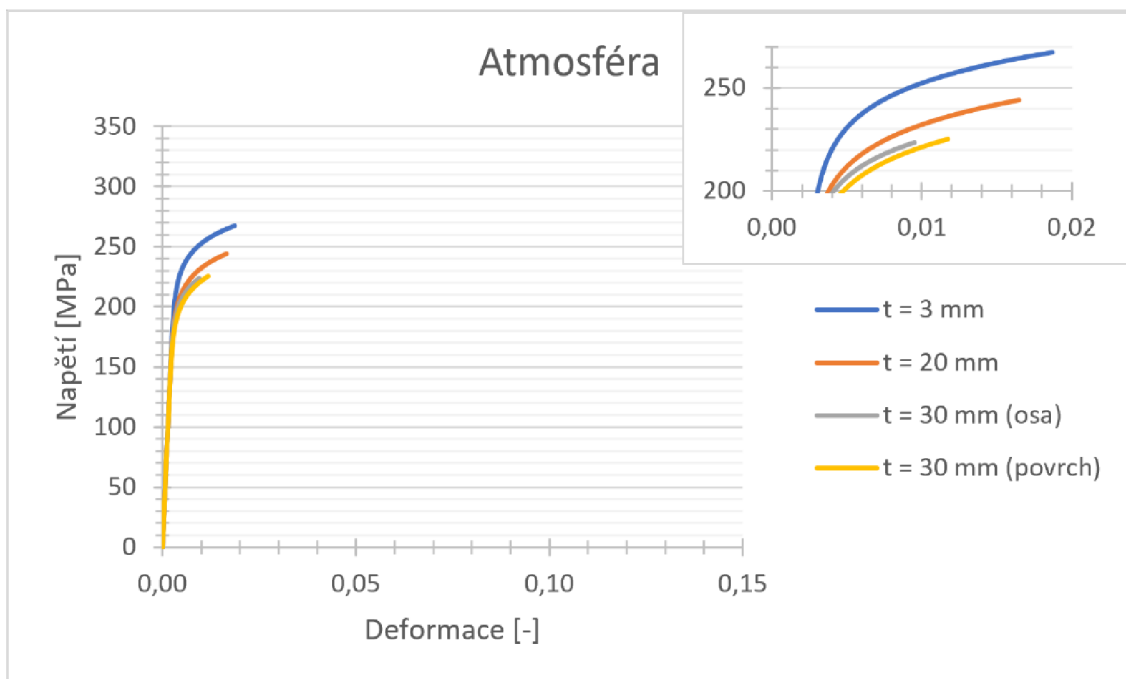
V případě pevností jsou pak rozdíly naměřených hodnot dané rozdílnou silou stěny odlitku srovnatelné u všech tří metod ochlazování. Dochází zde ale k celkovému zvýšení těchto hodnot spolu se zvýšením stupně intenzifikace ochlazování během tuhnutí taveniny.



Obr. 31 - Tahový diagram ochlazování do kapaliny

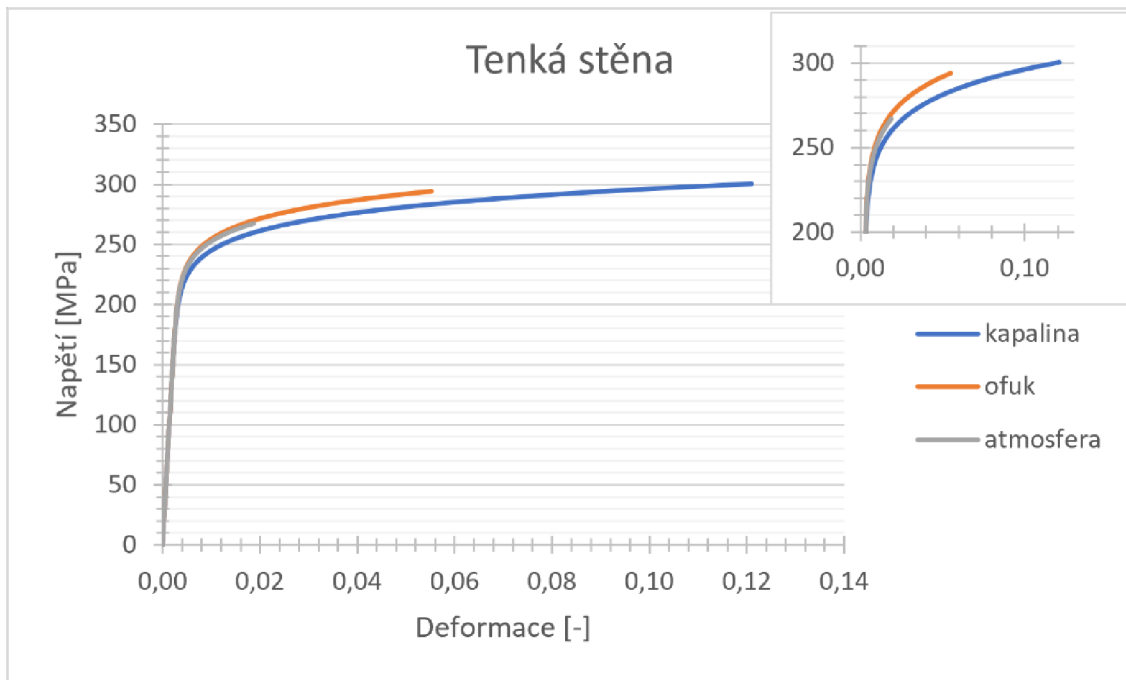


Obr. 32 - Tahový diagram ochlazování ofukem



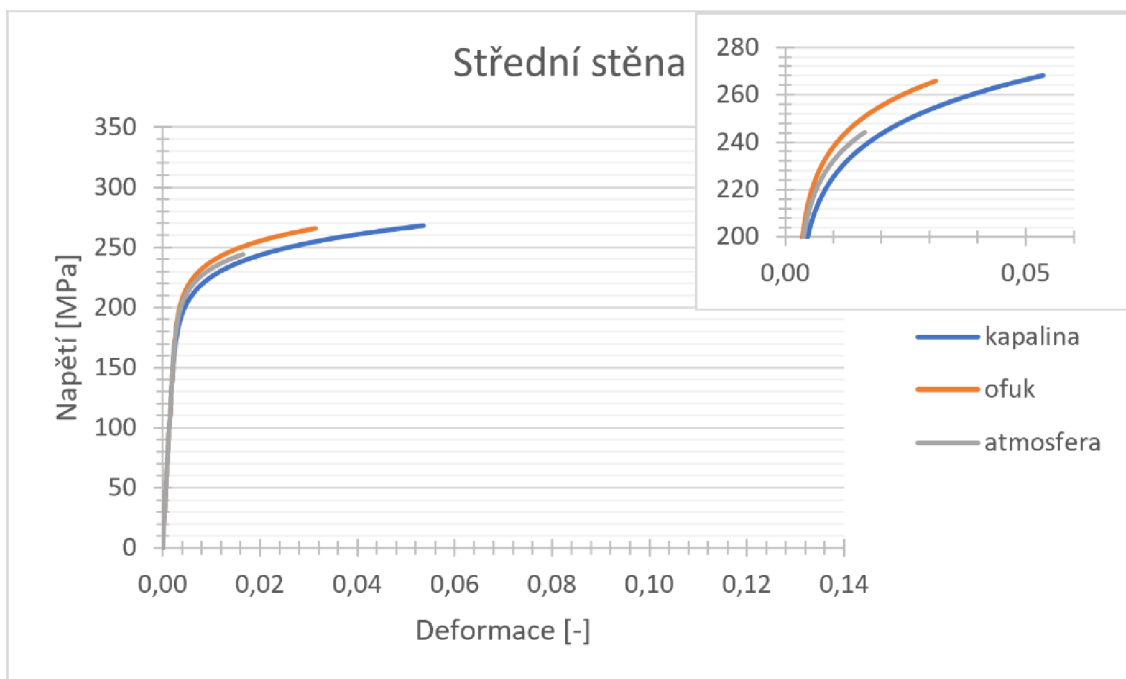
Obr. 33 - Tahový diagram ochlazování na volné atmosféře

Druhá skupina grafů pak představuje vliv jednotlivých režimů ochlazování na mechanické vlastnosti vzorků stejné tloušťky stěny. Tenkostěnné části odlitku (**obr. 34**) vykazují nejvyšší hodnoty mechanických vlastností. Pevnosti v případě použití ochlazování do kapaliny a ofukem se vzájemně velice přibližují, nejvýraznější rozdíl tak může být pozorován na hodnotách tažnosti.



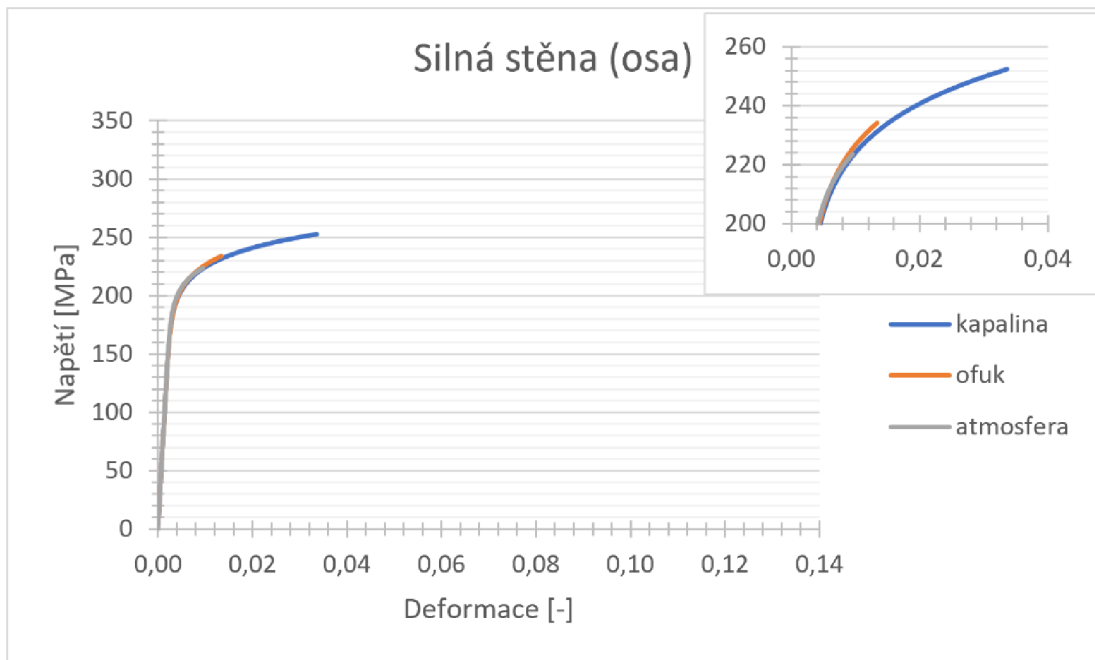
Obr. 34 - Tahový diagram – tenkostěnné vzorky

Podobné chování vykazují také hodnoty mechanických vlastností vzorků o střední tloušťce stěny (**obr. 35**). Rozdíl v hodnotách tažnosti zde však již není výrazný tolik, jako v případě tenkostěnných odlitků.

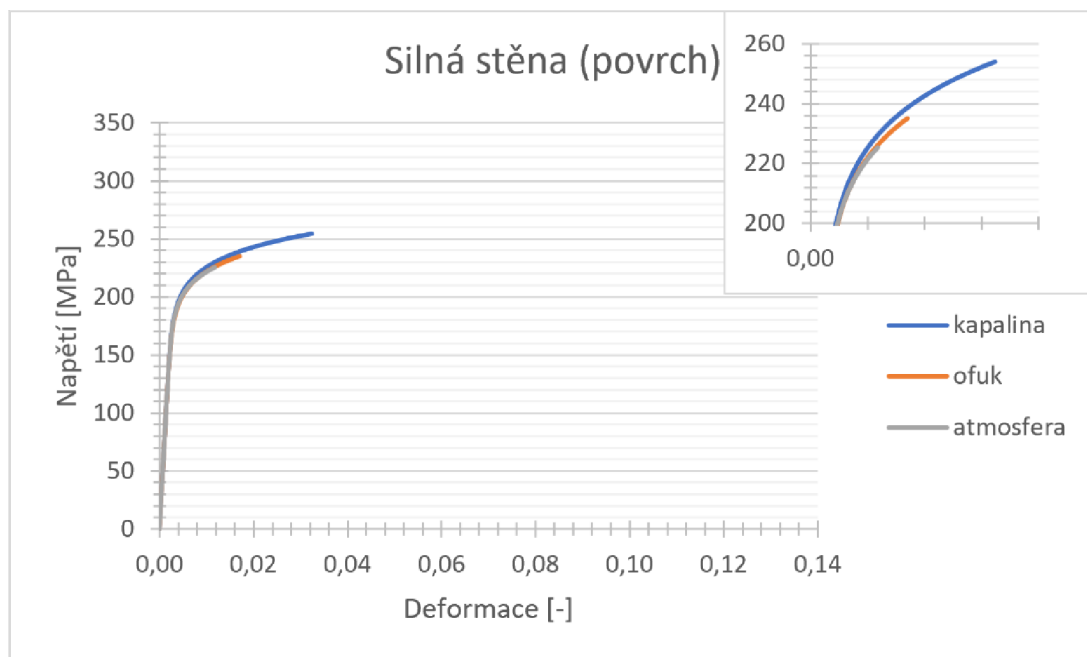


Obr. 35 - Tahový diagram – střední síla stěny

Poslední dva grafy znázorňují mechanické vlastnosti odlitků o průřezu 30×40 mm v ose odlitku (**obr. 36**) a v povrchové části odlitku (**obr. 37**). Zde již lze pozorovat výrazný rozdíl v hodnotách pevnosti mezi vzorky ochlazenými ponořením do kapaliny a vzorky ochlazenými ofukem. Průměr hodnot pevnosti pro ochlazení tlakovým vzduchem zde byl 234,15 MPa v ose odlitku a 235,03 MPa v povrchové části odlitku. Tato hodnota pak díky použití ochlazení ponořením do kapaliny vzrostla na 252,5 MPa (v ose odlitku) a 254,1 MPa (v povrchové části odlitku).



Obr. 36 - Tahový diagram – silná stěna (osa)



Obr. 37 - Tahový diagram – silná stěna (povrch)

Při určení aritmetického průměru hodnot se však ze statistického hlediska dopouštíme vždy určité chyby. Proto byl vypočten interval spolehlivosti na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Obecný tvar intervalu je vyjádřen vztahem (3.6).

$$\left\langle \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n-1}} \cdot t_{1-\alpha/2;n}; \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n-1}} \cdot t_{1-\alpha/2;n} \right\rangle \quad (3.6)$$

kde: \bar{x} - Aritmetický průměr,
 s - směrodatná odchylka,
 n - rozsah výběrového souboru,
 $t_{1-\alpha/2;n}$ - kvantil studentova rozdělení.

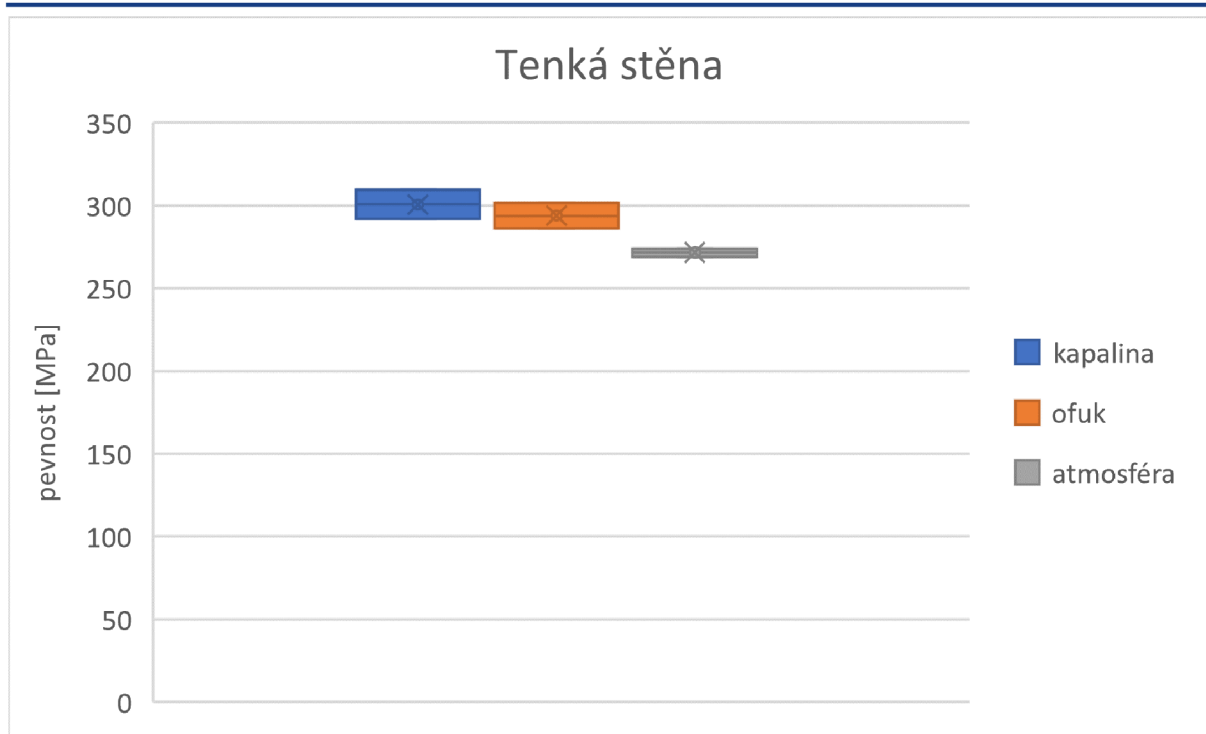
Hodnoty t-quantilu Studentova rozdělení byly voleny z tabulek [25]. V rámci experimentu byly pro každou konfiguraci tloušťky stěny a režimu ochlazování zhotoveny tři vzorky. Hodnota kvantilu Studentova rozdělení na hladině významnosti 0,05 pro 3 měření je 3,182. Pro případy, kdy byl jeden vzorek ze souboru vyloučen testy odlehklých hodnot a zbyla tak pouze dvě použitelná měření, je hodnota tohoto kvantilu rovna 4,303. Průměrné hodnoty tažností a pevností pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování se započítanou chybou průměru na hladině významnosti 0,05 jsou uvedeny v následující tabulce (**tab. 6**).

Tab. 6 – Průměrné hodnoty pevností a tažností se započítáním chyby na hladině významnosti 0,05.

Typ vzorku	Režim ochlazování	A [%]	R_m [MPa]
Tenká stěna	kapalina	11,67 +/- 9,36	300,57 +/- 8,79
	ofuk	5,10 +/- 1,37	293,90 +/- 7,59
	atmosféra	1,90 +/- 0,00	271,60 +/- 2,43
Střední stěna	kapalina	4,97 +/- 1,37	267,97 +/- 22,99
	ofuk	2,75 +/- 0,30	265,65 +/- 2,13
	atmosféra	1,30 +/- 0,00	244,20 +/- 7,30
Silná stěna osa	kapalina	3,00 +/- 0,39	252,50 +/- 5,71
	ofuk	1,00 +/- 0,00	234,15 +/- 31,06
	atmosféra	0,63 +/- 0,34	223,70 +/- 17,08
Silná stěna povrch	kapalina	2,87 +/- 1,69	254,10 +/- 13,46
	ofuk	1,37 +/- 1,06	235,03 +/- 24,02
	atmosféra	0,85 +/- 0,30	225,30 +/- 0,61

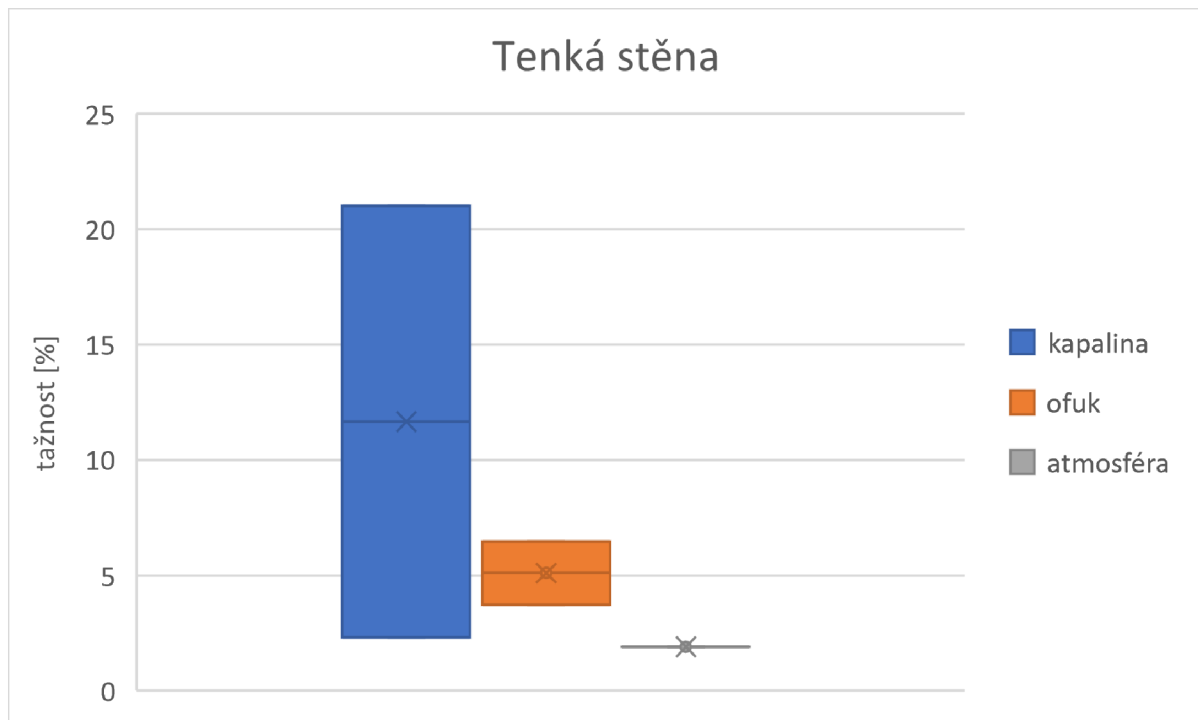
Lze pozorovat, že v některých případech je interval spolehlivosti velice široký. To je dáno především malým souborem dat naměřených pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování. S klesajícím počtem měření totiž dochází k nárůstu velikosti statistické chyby aritmetického průměru naměřených hodnot. Tento nárůst je pak v případě tří či dokonce pouze dvou měření o to výraznější.

Hodnoty intervalů spolehlivosti z tabulky (**tab. 6**) byly následně vyneseny do grafů. Ty pak představují grafické srovnání vlivu jednotlivých režimů ochlazování na pevnost a tažnost vzorků. Nejprve jsou srovnány hodnoty mechanických vlastností tenkostěnné části odlitku. První graf (**obr. 38**) znázorňuje vliv režimů ochlazování na pevnosti tenkostěnných vzorků.



Obr. 38 – srovnání vlivu režimu ochlazování na pevnost – tenká stěna.

V případě hodnot tažnosti tenkostěnných odlitků (**obr. 39**) lze pozorovat velký rozsah intervalu spolehlivosti vzorků ochlazovaných ponořením do kapaliny. To je způsobeno velkými rozdíly naměřených hodnot, kdy v jednom případě byla naměřena hodnota tažnosti 16,4 %. Grubbsův ani Dixonův test však tuto hodnotu nevyločil jako odlehlou, bylo s ní tedy nadále počítáno. Pro získání přesnějších výsledků by tak v tomto případě bylo třeba provést další měření.



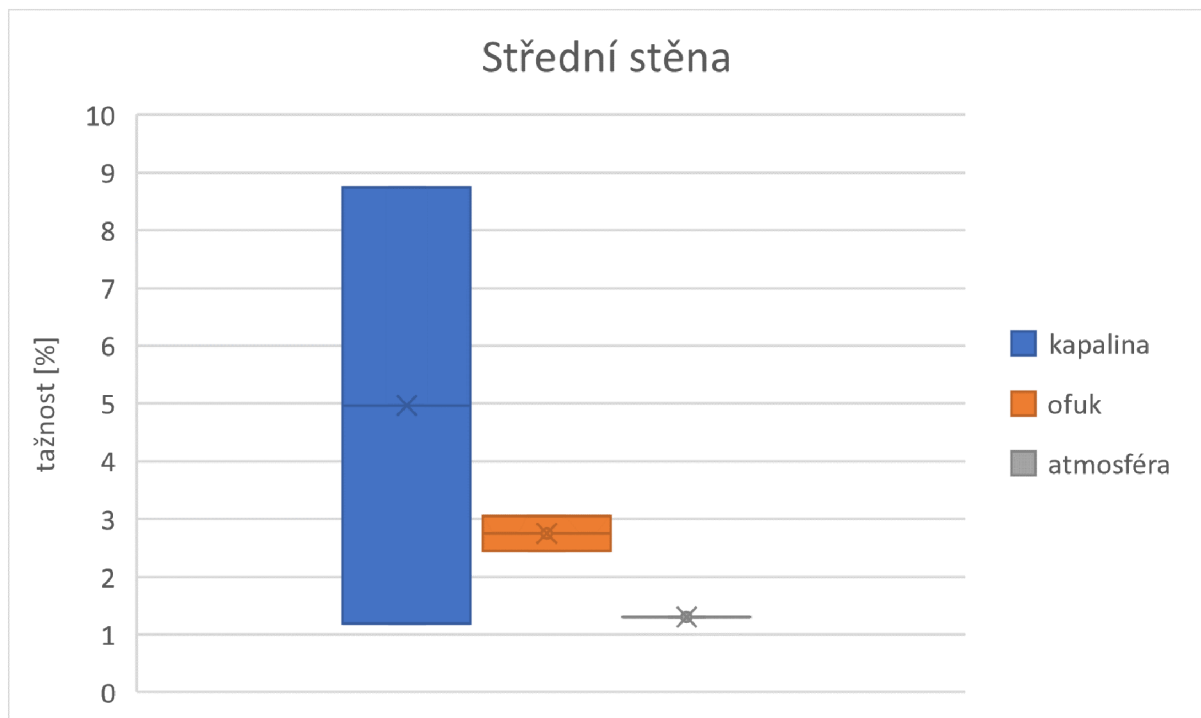
Obr. 39 – srovnání vlivu režimu ochlazování na tažnost – tenká stěna.

Obdobně byla zpracována i data naměřená na vzorcích zhotovených z části odlitku se střední tloušťkou stěny. Nejprve je opět zachycen vliv režimu ochlazování na hodnoty pevností vzorků (**obr. 40**).



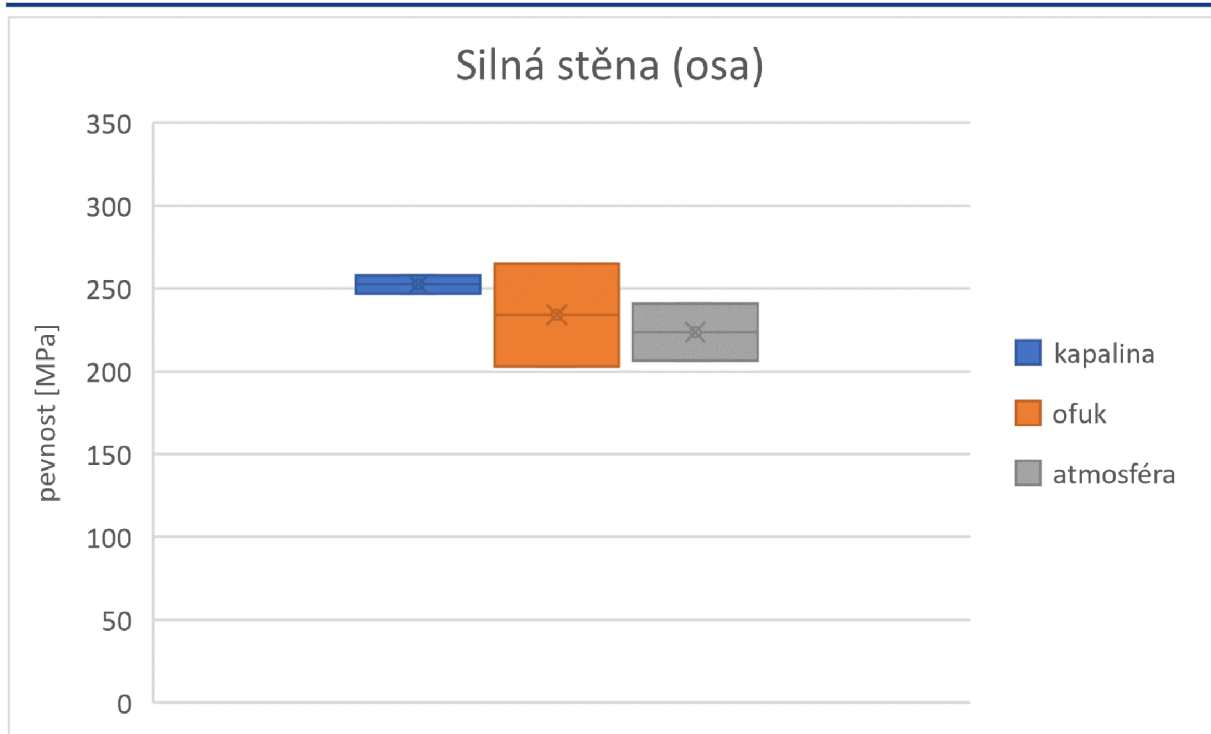
Obr. 40 – srovnání vlivu režimu ochlazování na pevnost – střední stěna.

Podobně jako v případě tenkostěnné části odlitku dochází i u části o střední síle stěny (**obr. 41**) k podstatnému zvýšení hodnot tažnosti při použití ochlazování ponořením do kapaliny oproti ochlazování ofukem. I v tomto případě je však interval spolehlivosti pro ochlazování do kapaliny značně široký a pro jednoznačnost závěrů by bylo třeba provést ještě další měření.



Obr. 41 – srovnání vlivu režimu ochlazování na tažnost – střední stěna.

Následující grafy představují srovnání intervalů spolehlivosti hodnot pevnosti (**obr. 42**) a tažnosti (**obr. 43**) pro vzorky z oblasti osy silnostěnné části odlitku.

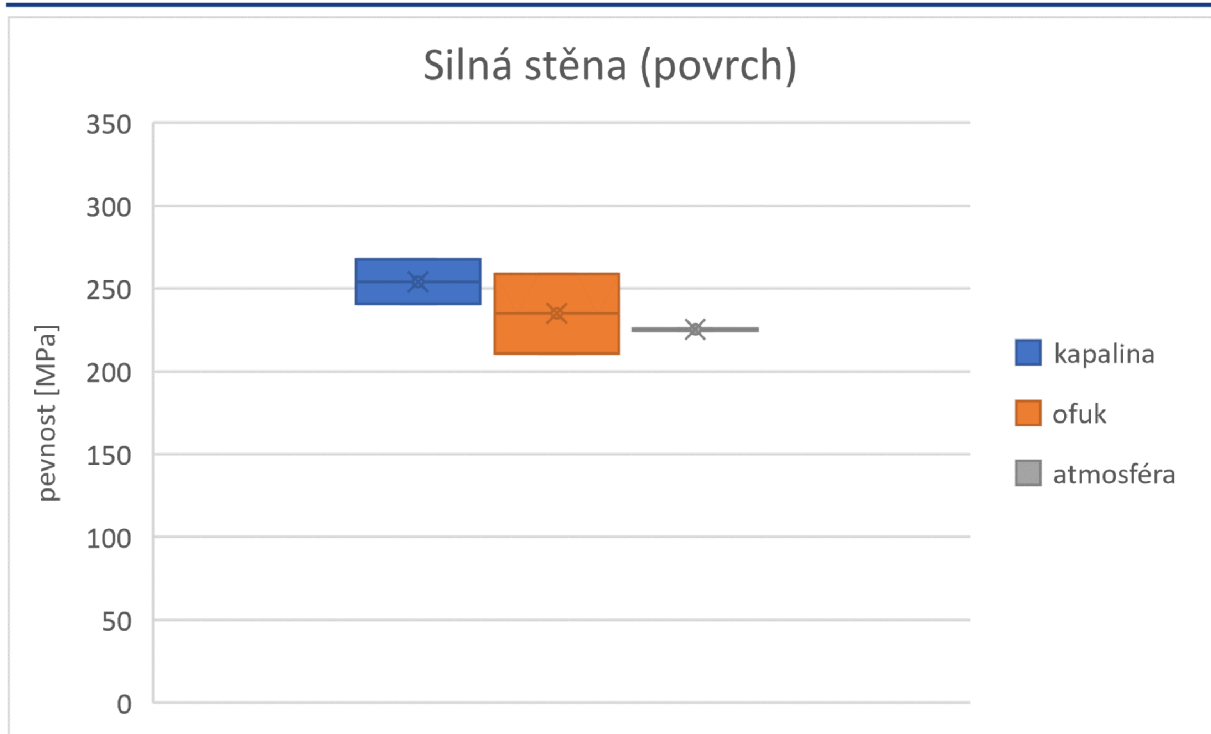


Obr. 42 – srovnání vlivu režimu ochlazování na pevnost – silná stěna (osa).

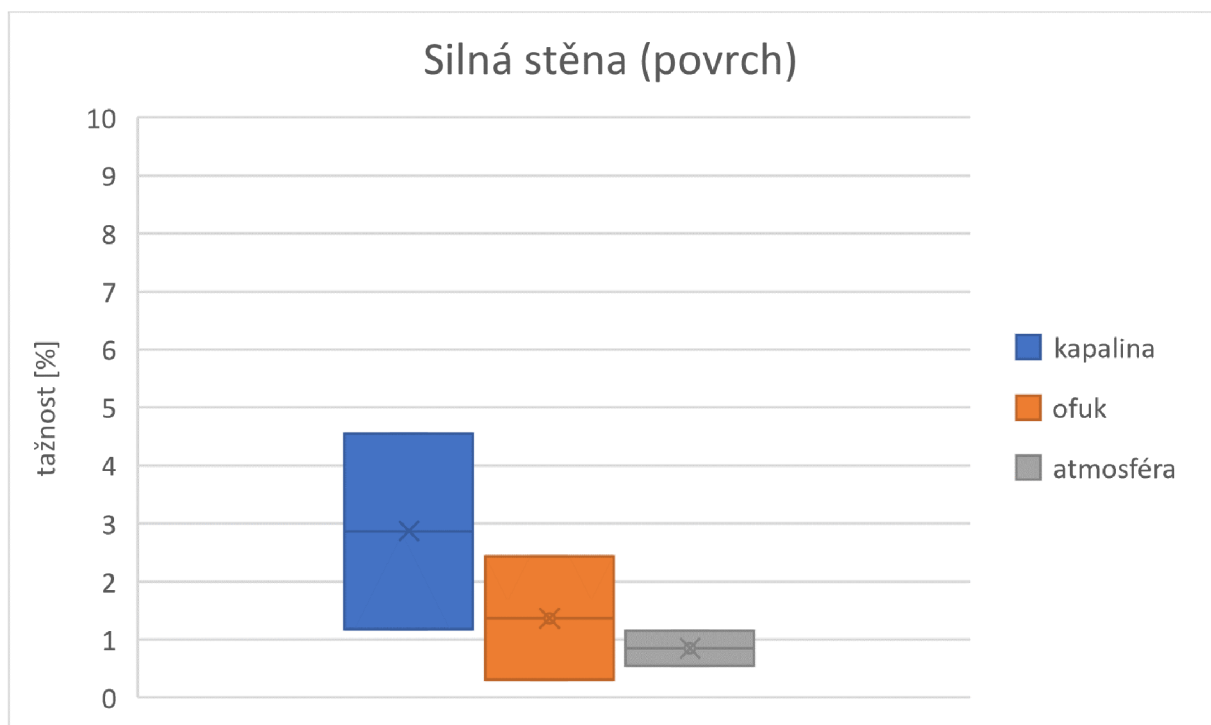


Obr. 43 – srovnání vlivu režimu ochlazování na tažnost – silná stěna (osa).

Poslední dva grafy (**obr. 44** a **obr. 45**) pak reprezentují vzorky z povrchové části silnostěnných vzorků.



Obr. 44 – srovnání vlivu režimu ochlazování na pevnost – silná stěna (povrch).



Obr. 45 – srovnání vlivu režimu ochlazování na tažnost – silná stěna (povrch).

Pro zkušební tavbu byly dále zhotoveny zkušební tyčinky kruhového průřezu o průměru 6 mm, které jsou ve firmě standardně používány pro měření mechanických vlastností materiálu. Bylo zhotoveno celkem 20 těchto zkušebních těles. Tyčinky byly lity do skořepiny po deseti kusech. Po očištění od keramiky byly tyčinky tepelně zpracovány spolu se vzorky zhotovenými pro experiment. Byly tedy dodrženy shodné podmínky tepelného zpracování. Tyčinky nebyly obráběné, byla tedy zachována licí kůra. Z toho důvodu lze předpokládat vyšší hodnoty

mechanických vlastností v porovnání se vzorky vyřezanými z objemu odlitku. Hodnoty naměřených mechanických vlastností jsou uvedeny v tabulce (**tab. 7**).

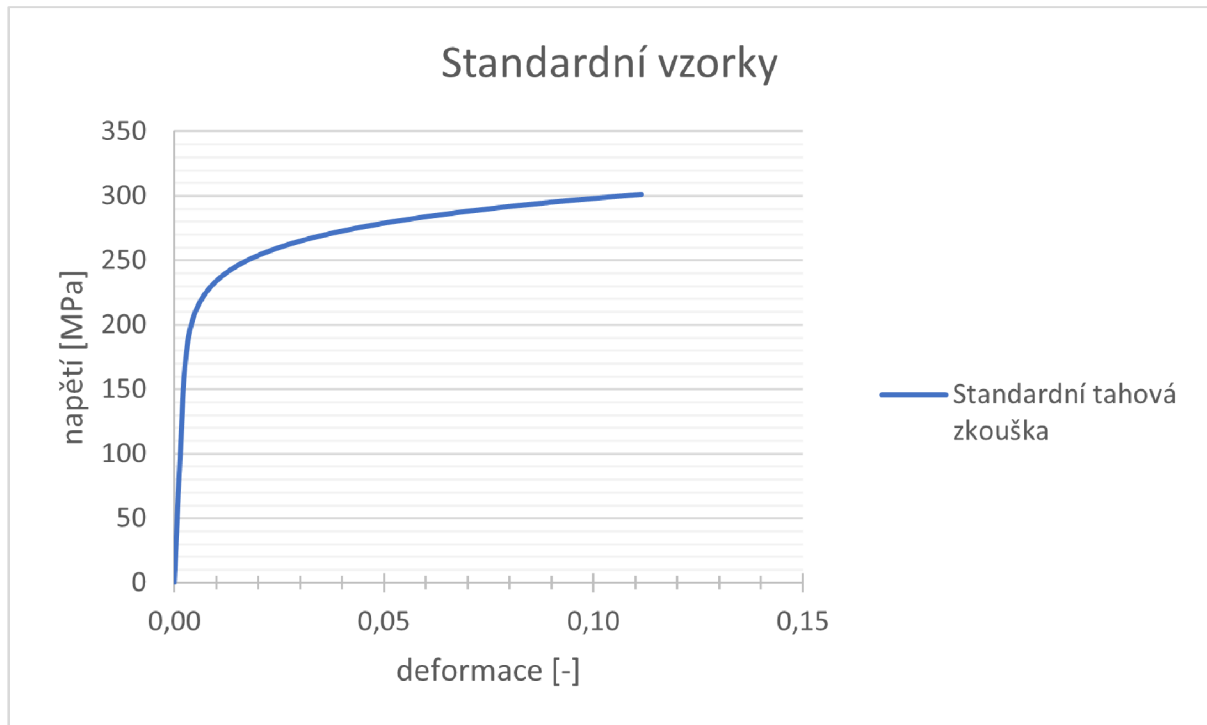
Tab. 7 – Naměřené hodnoty mechanických vlastností pro standardní vzorky ze zkušební tavby.

Pořadí vzorku	R_m [MPa]	A [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]
1	294	10,4	221,9
2	290,7	9,9	200,9
3	297,5	9,8	212,6
4	297,5	9,3	206,3
5	291	6,5	209,8
6	296,9	9,7	206,6
7	298,4	9	209,4
8	293,1	10	206,2
9	293,1	8,2	206,7
10	297,7	9,3	203,5
11	299,7	10,5	208,6
12	305,3	11,4	212,8
13	305,5	10,6	216
14	302,4	10,7	207,4
15	303,7	8,7	211,9
16	300,8	9,5	214
17	291,1	5,4	208,9
18	298,9	10,2	210,2
19	299,5	10,1	206,5
20	301	10,2	211,2

Pro jednotlivé mechanické vlastnosti byl proveden Grubbsův a Dixonův test odlehlých hodnot. Na základě hodnoty tažnosti byl ze souboru dat vyloučen vzorek s pořadovým číslem 17 (v **tab. 7** jsou tyto hodnoty zvýrazněny červeným písmem). Následně byla z vypočítána průměrná hodnota mechanických vlastností pro všechna měření a sestaven diagram tahové zkoušky (**obr. 46**) stejným způsobem jako v případě předchozích vzorků. Průměrné hodnoty mechanických vlastností uvádí tabulka (**tab. 8**).

Tab. 8 – Průměr mechanických vlastností standardních vzorků zkušební tavby.

A [%]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
9,68	298,25	209,61

Obr. 46 – Tahový diagram – standardní vzorky $\varnothing 6$ mm.

Následně byl na hladině významnosti 0,05 stanoven interval spolehlivosti pro hodnoty tažnosti a pevnosti. Pro pevnost nabývá rozměru $\langle 296,07; 300,43 \rangle$ MPa, pro tažnost $\langle 9,15; 10,22 \rangle$ %.

Tyto hodnoty zhruba odpovídají hodnotám naměřeným pro tenkostěnné části zkušební odlitku ochlazované za pomoci ponoření do kapaliny. To názorně dokazuje mimo jiné pozitivní vliv lící kůry na hodnoty mechanických vlastností odlitku.

3.2.2 Mikrostruktura

Vedle hodnot mechanických vlastností byl v rámci experimentu sledován také vliv tloušťky stěny odlitku a režimu ochlazování na jemnost struktury materiálu odlitku. Sledovaným kritériem byla hodnota veličiny DAS (Dendrite Arm Spacing).

Ke zhotovení metalografických vzorků byla použita přetržená zkušební tělesa tahové zkoušky. Z okraje tyčinky, schematicky zachycené již dříve (**obr. 30**), byl odříznut bloček kovu o výšce cca 2 mm. Malý rozměr byl zvolen především z důvodu snadného zalisování, kdy nedocházelo k převrácení vzorku po zasypaní práškovou pryskyřicí. Schéma vzorku s vyznačením části odříznuté pro zhotovení metalografického výbrusu je zachyceno na následujícím obrázku (**obr. 47**).



Obr. 47 – Metalografický vzorek.

Vyřezané vzorky byly následně zalisovány do pryskyřice. Za účelem co největšího využití prostoru byly lisovány vždy po čtyřech kusech. Zalisované vzorky byly následně broušeny a leštěny. Metalografické výbrusy jsou zachyceny na fotografii (**obr. 48**).



Obr. 48 – Metalografické výbrusy.

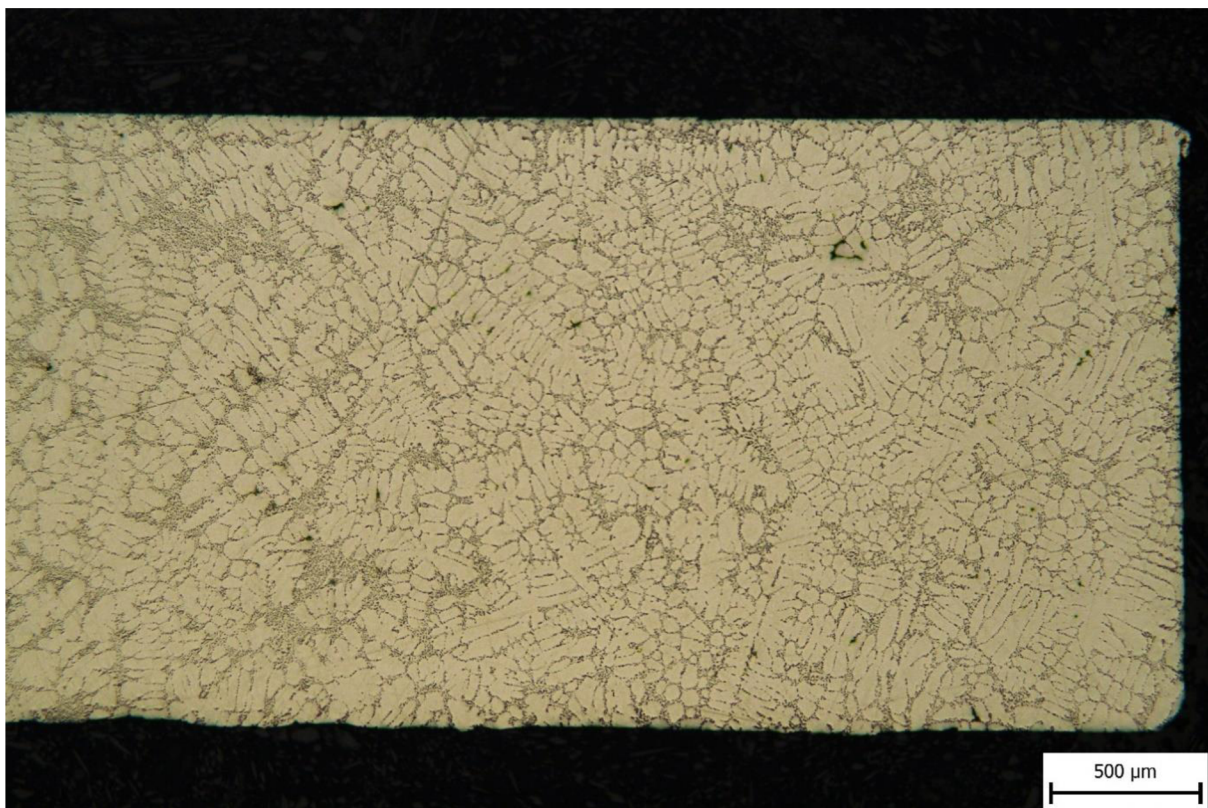
Po vyleštění byly vzorky pozorovány pod mikroskopem při padesátinásobném zvětšení. Na snímcích pak byla hodnocena struktura, konkrétně byla měřena hodnota DAS. Hodnota DAS je vyjádřena vztahem (3.7) [4].

$$DAS = \frac{L}{n - 1} \quad (3.7)$$

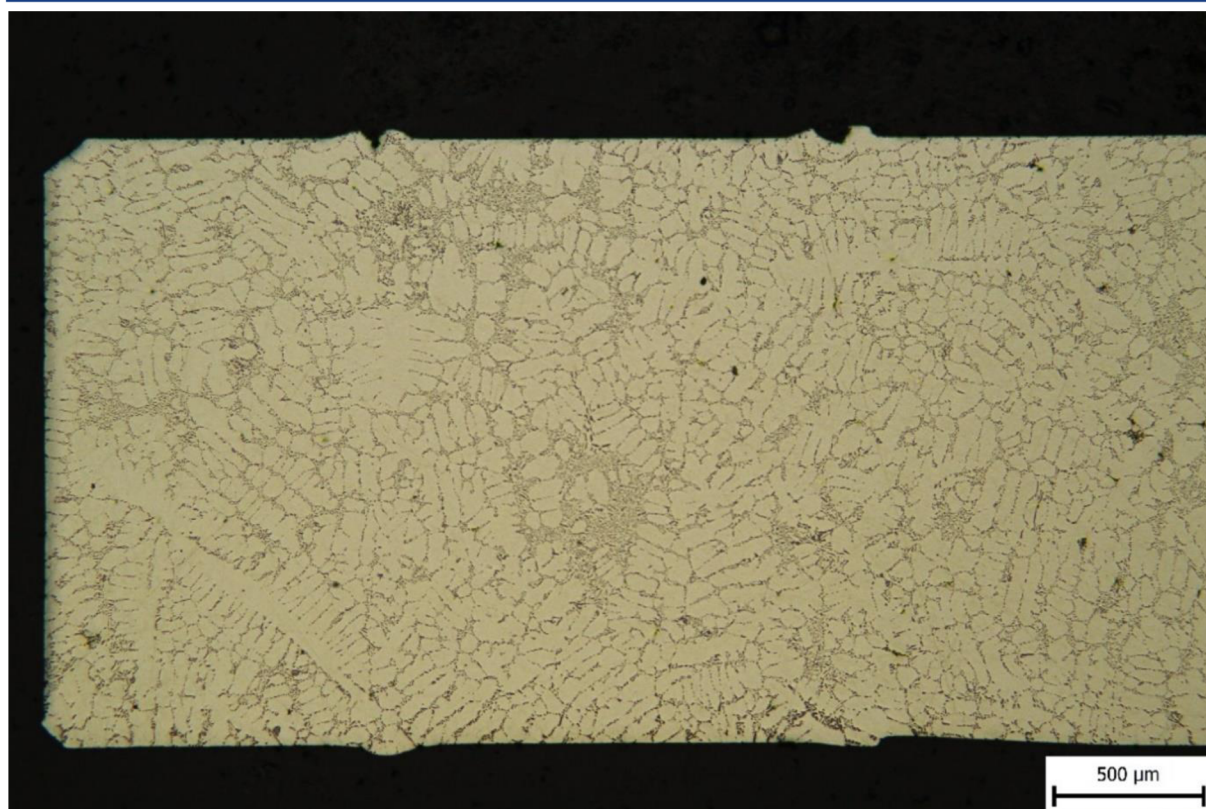
- kde: DAS - vzdálenost sekundárních os dendritů (Dendrite Arm Spacing) [μm],
 L - vzdálenost os krajních sekundárních větví dendritu [μm],
 n - Počet sekundárních větví dendritu na vzdálenosti L ,

Na každém vzorku bylo měřeno vždy několik dendritů (počet měřených dendritů se lišil dle počtu vhodných dendritů nacházejících se na daném snímku), jednotlivé hodnoty DAS pak byly podrobeny kontrole na případný výskyt odlehlých hodnot pomocí Grubbsova a Dixonova testu na hladině významnosti 0,05. Po vyřazení odlehlých hodnot ze souboru dat byl stanoven aritmetický průměr hodnot DAS pro danou konfiguraci podmínek ochlazování a byl spočítán interval spolehlivosti na hladině významnosti 0,05.

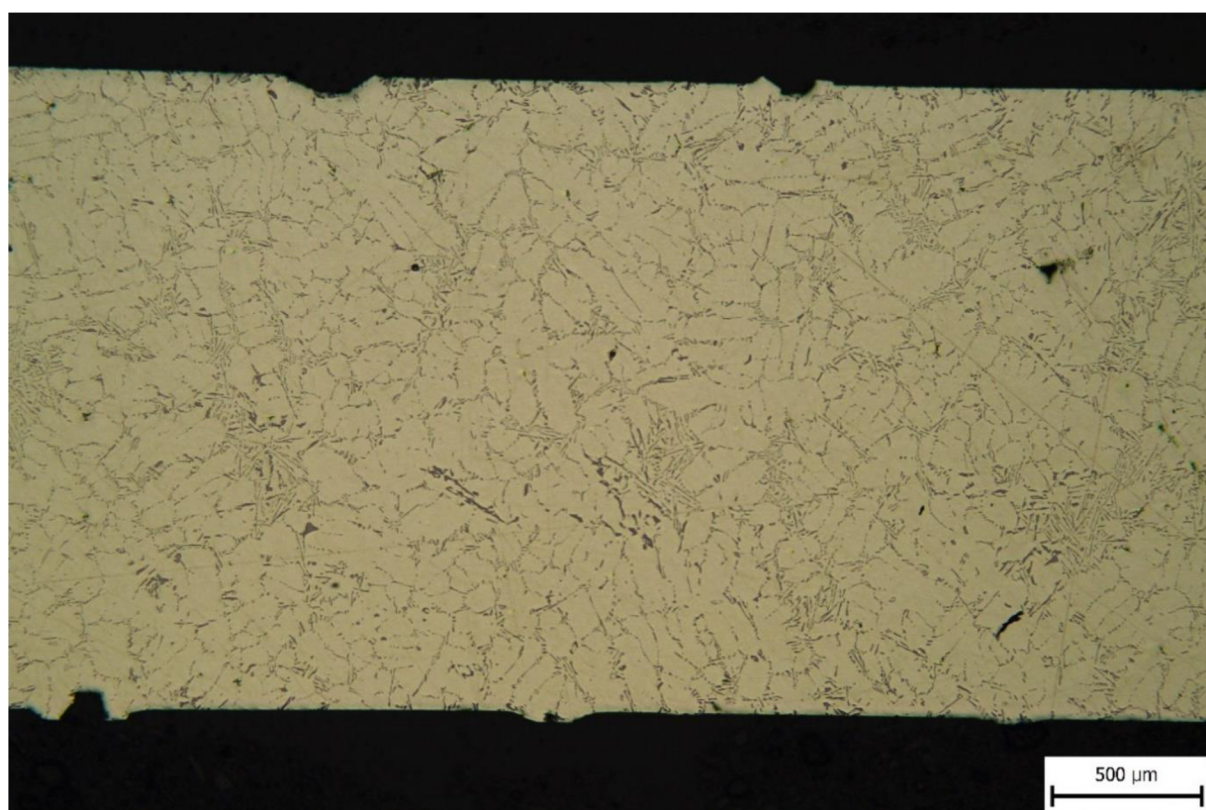
Na následujících fotografiích (**obr. 49** až **obr. 60**) jsou jednotlivé struktury vzorků. Každá konfigurace podmínek chladnutí je zastoupena vždy jednou fotografií.



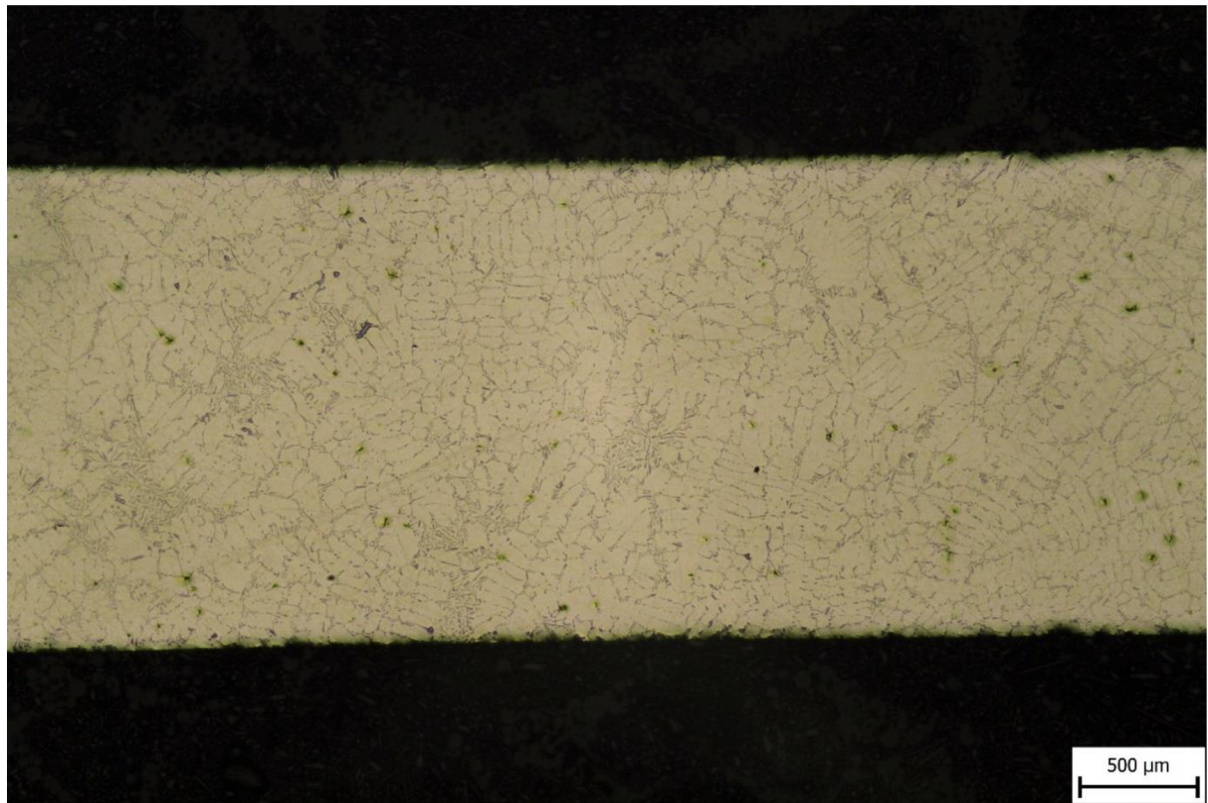
Obr. 49 – Tenká stěna – kapalina.



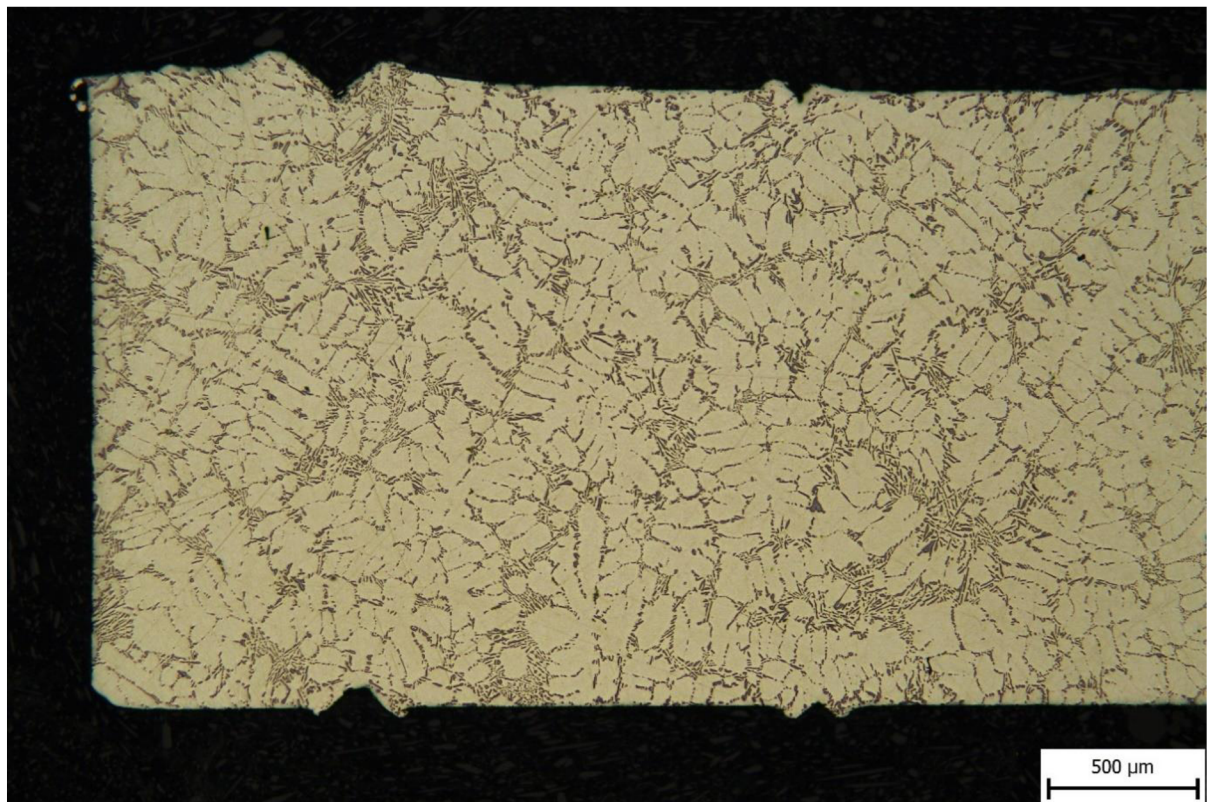
Obr. 50 – Tenká stěna – ofuk.



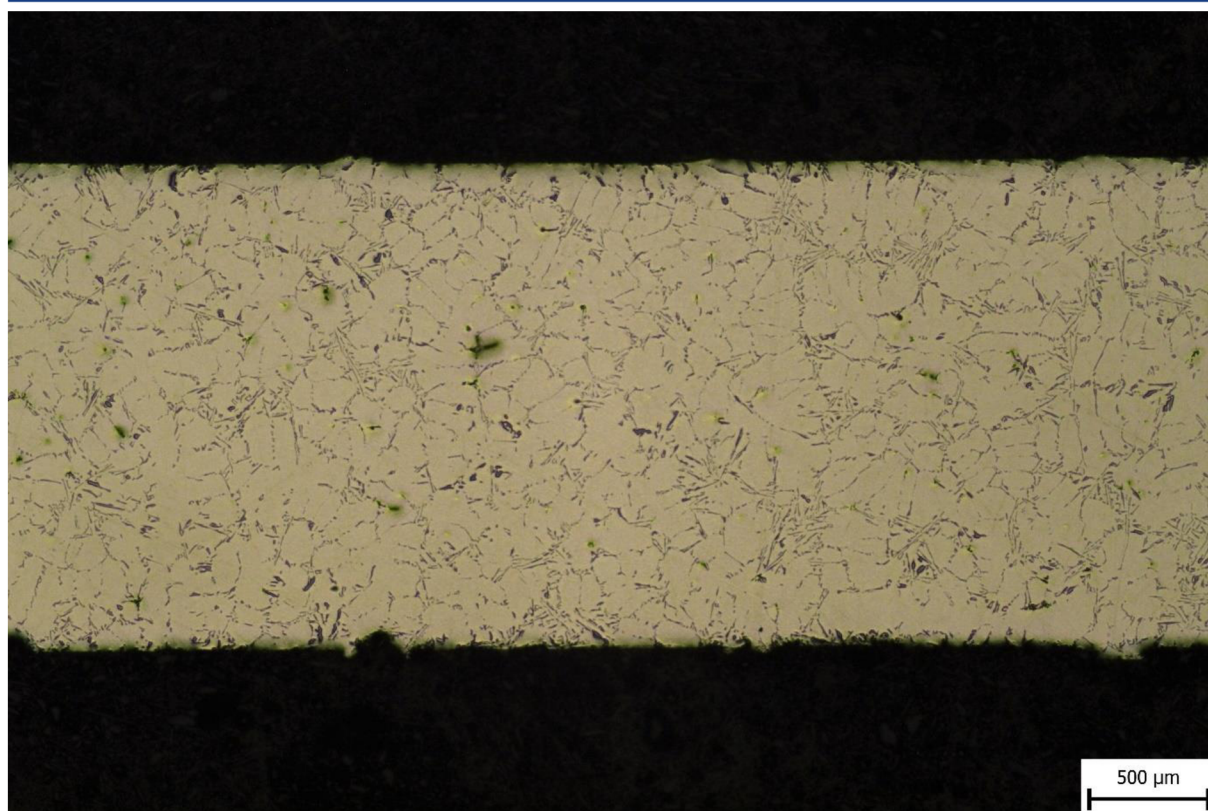
Obr. 51 – Tenká stěna – atmosféra.



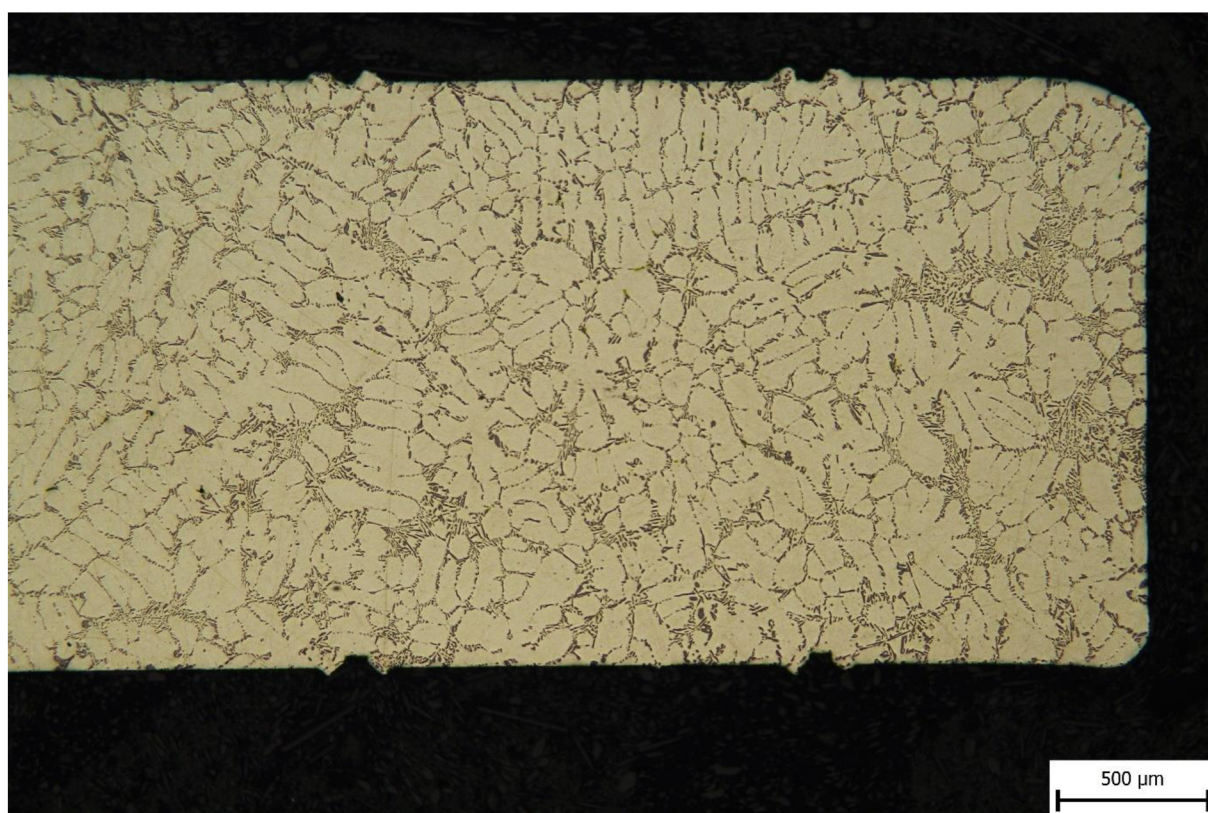
Obr. 52 – Střední stěna – kapalina.



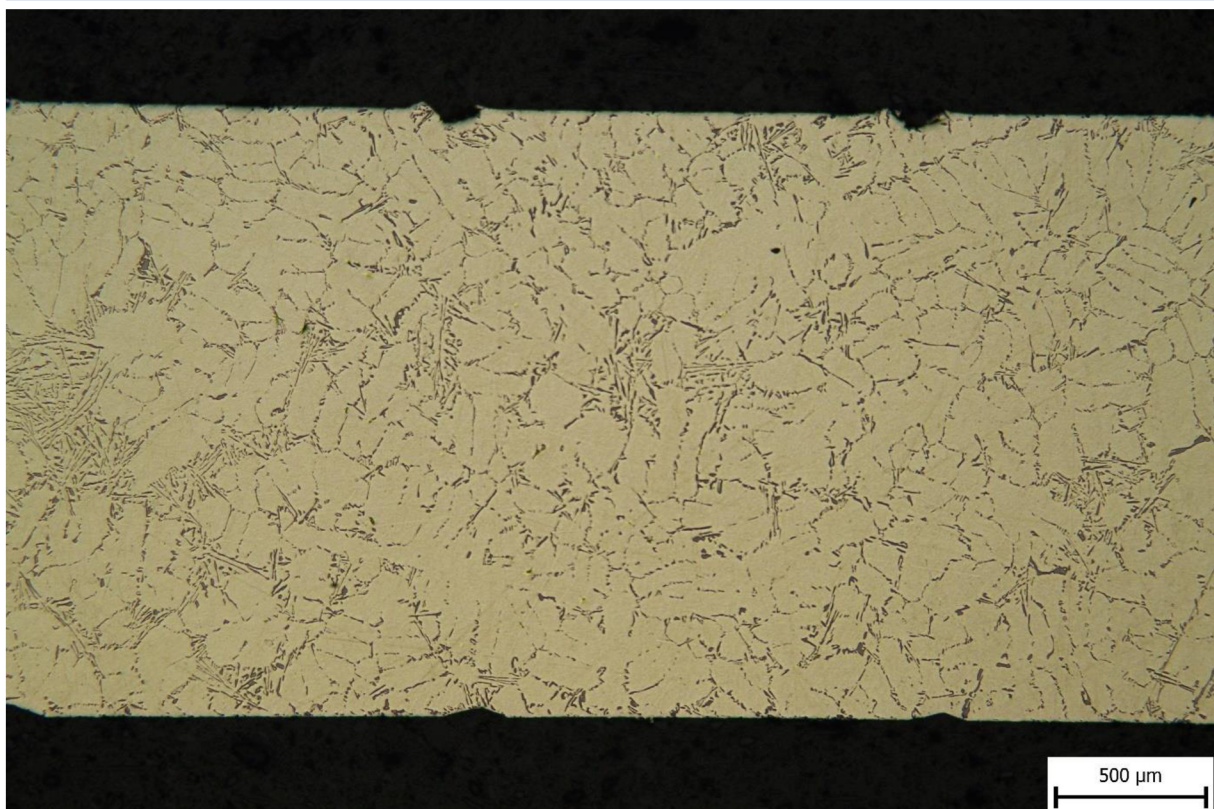
Obr. 53 – Střední stěna – ofuk.



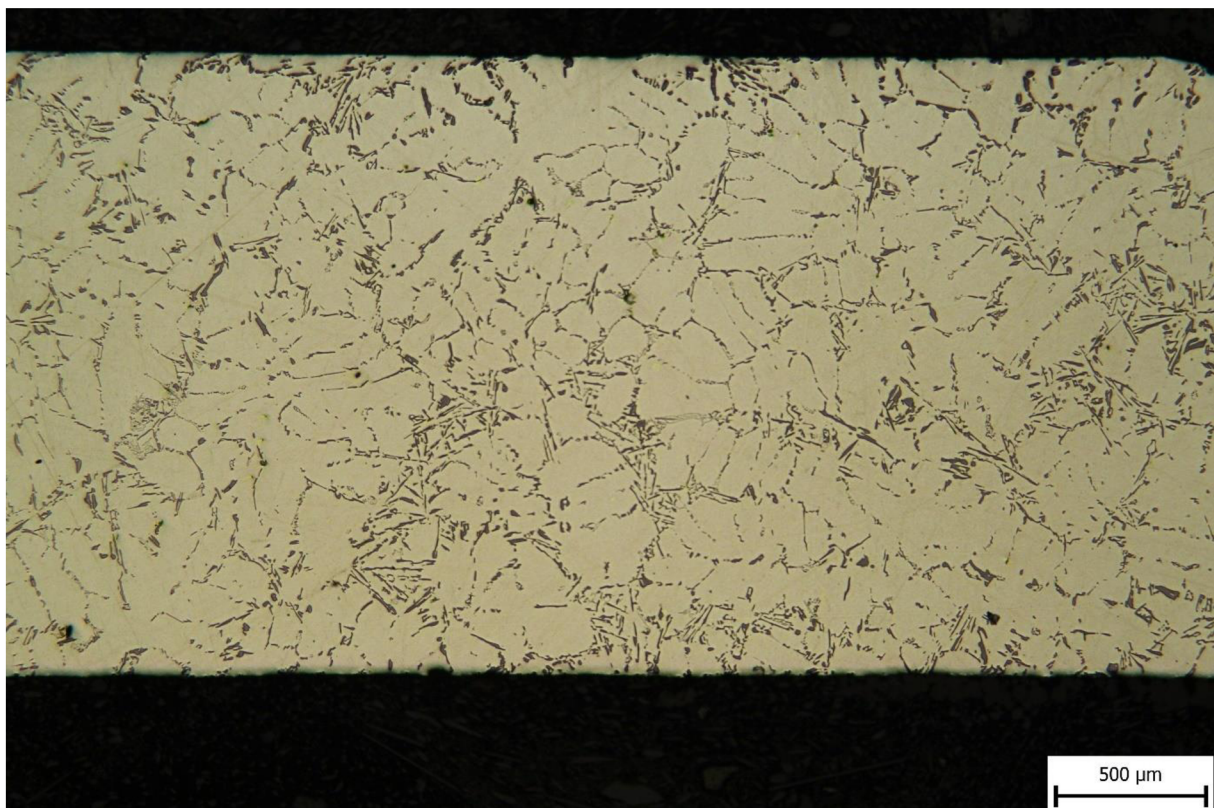
Obr. 54 – Střední stěna – atmosféra.



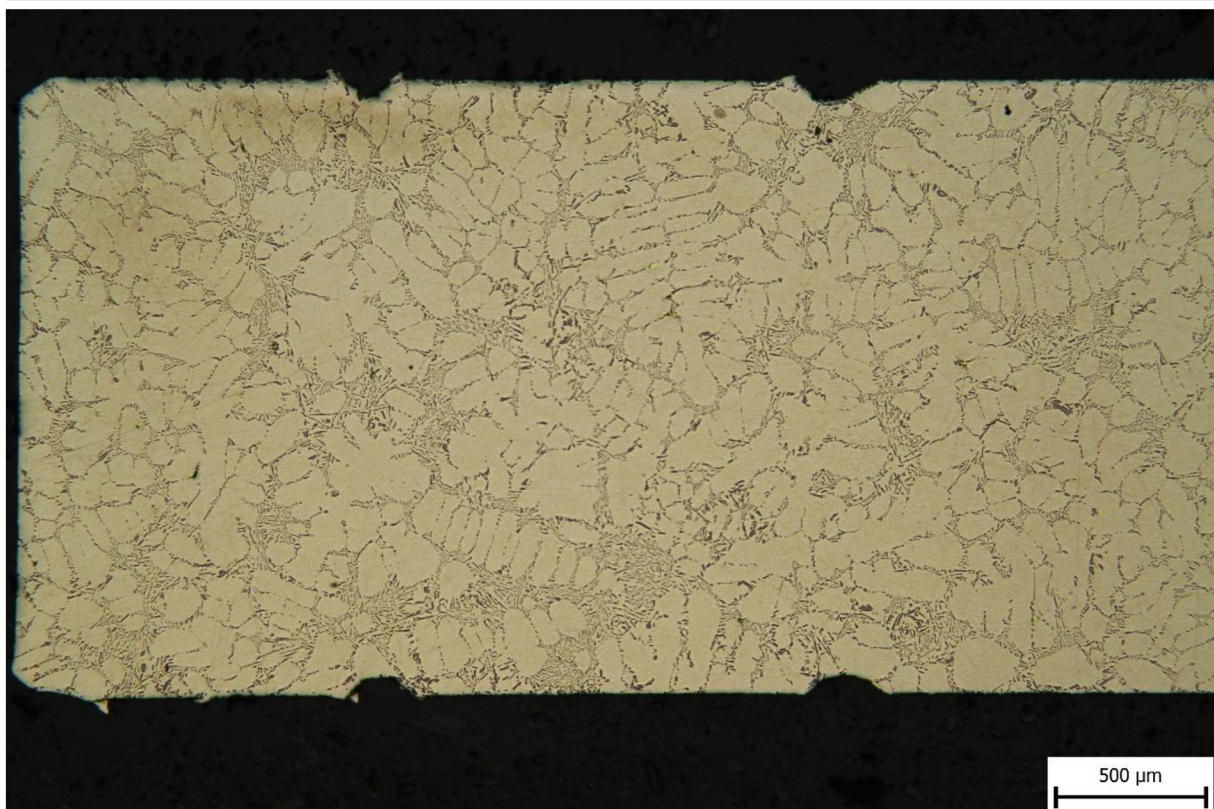
Obr. 55 – Silná stěna (osa) – kapalina.



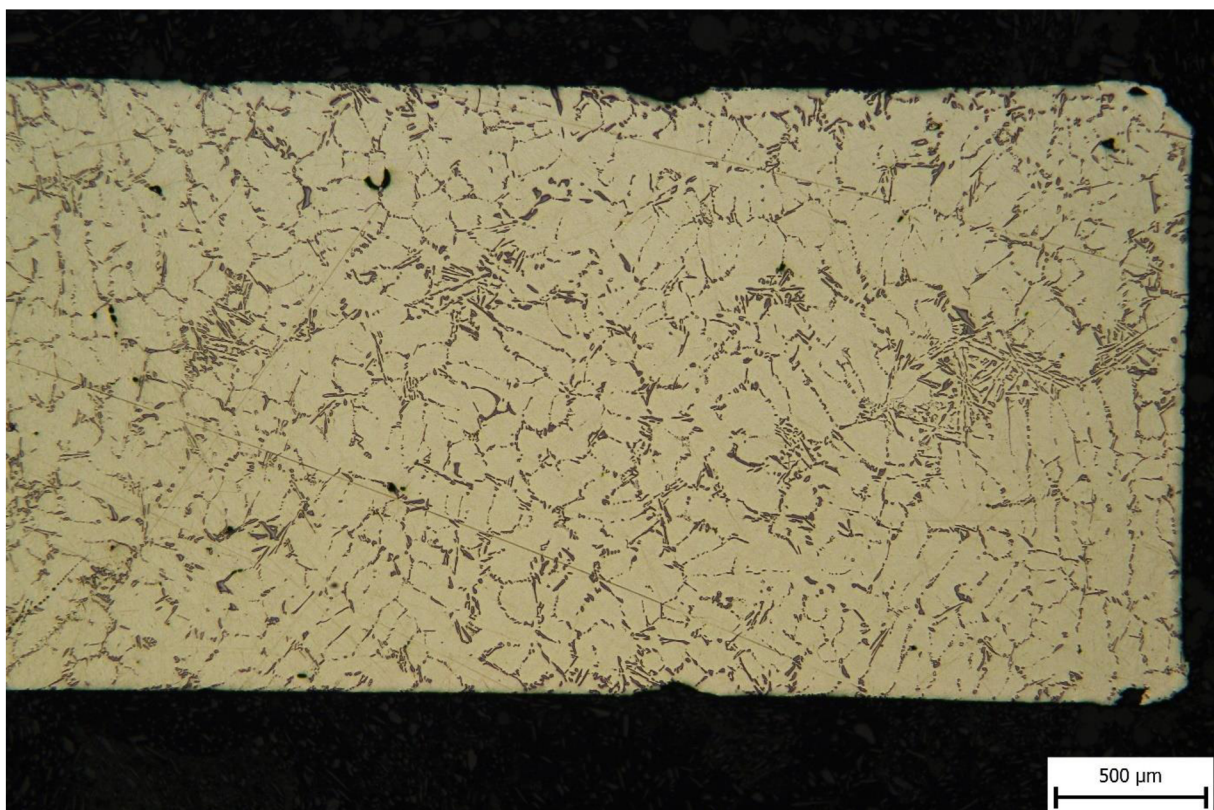
Obr. 56 – Silná stěna (osa) – ofuk.



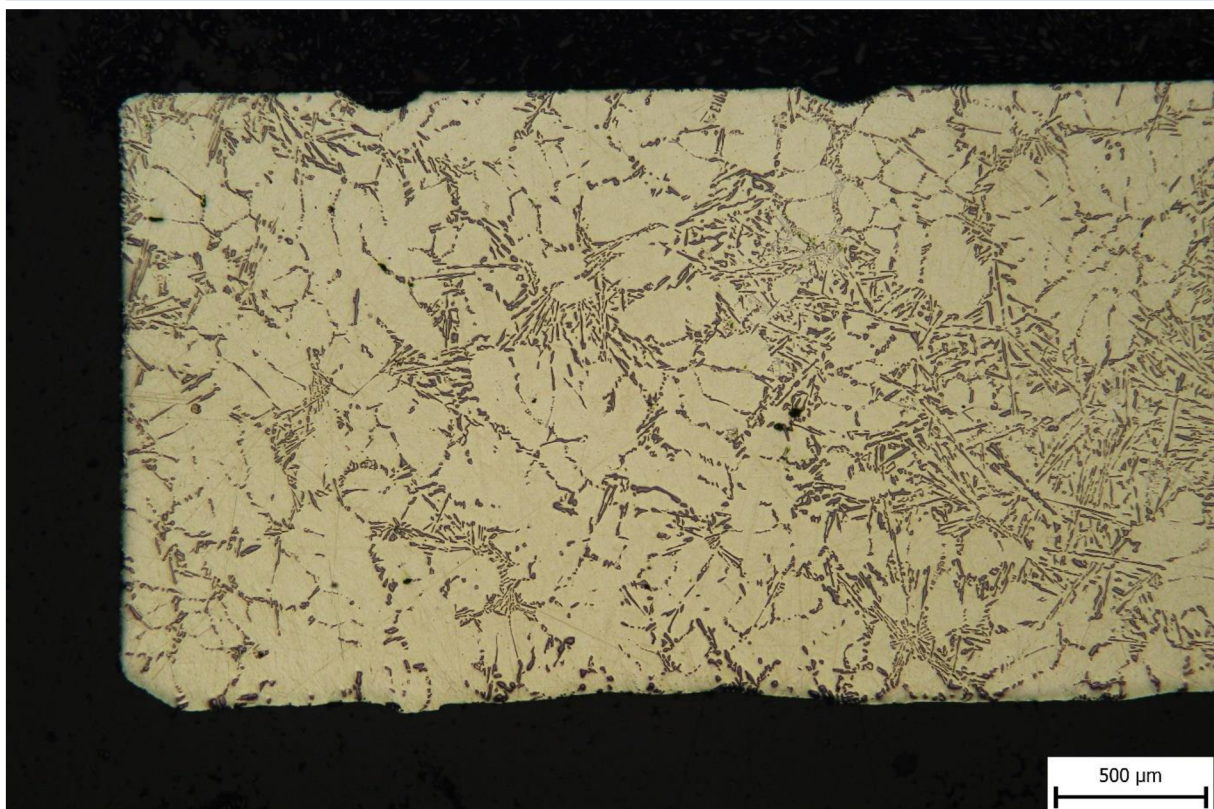
Obr. 57 – Silná stěna (osa) – atmosféra.



Obr. 58 – Silná stěna (povrch) – kapalina.



Obr. 59 – Silná stěna (povrch) – ofuk.



Obr. 60 – Silná stěna (povrch) – atmosféra.

Naměřené hodnoty parametru DAS jsou uvedeny v následující tabulce (**tab. 9**). Vždy je uveden interval spolehlivosti na hladině významnosti 0,05 a průměrná hodnota (střed tohoto intervalu).

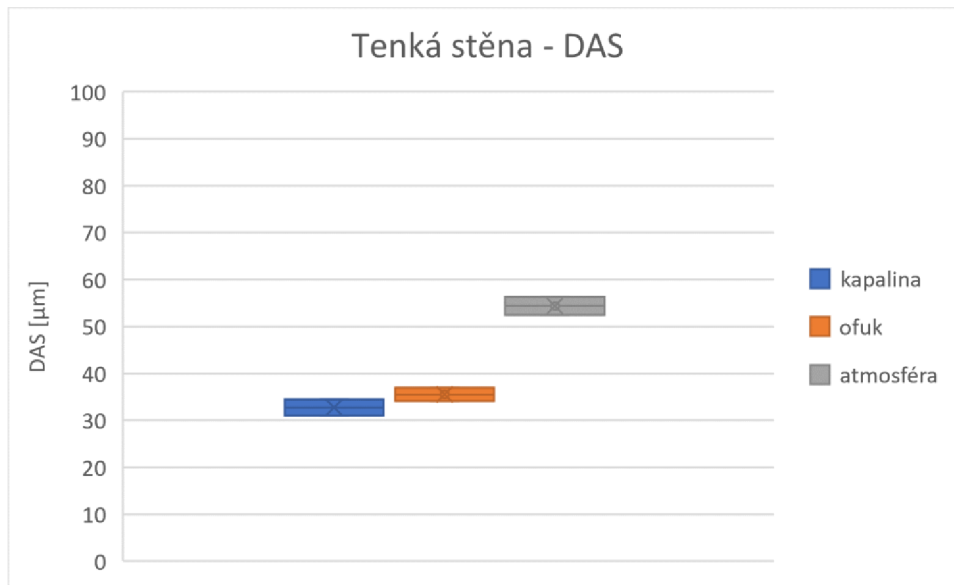
Tab. 9 – naměřené hodnoty DAS.

Typ vzorku	Režim ochlazování	Interval spolehlivosti DAS [μm]	Průměr DAS [μm]
Tenká stěna	kapalina	<31,01; 34,48>	32,75
	ofuk	<34,08; 37,01>	35,54
	atmosféra	<52,52; 56,25>	54,38
Střední stěna	kapalina	<40,58; 45,04>	42,81
	ofuk	<48,27; 53,37>	50,82
	atmosféra	<56,88; 69,86>	63,37
Silná stěna osa	kapalina	<45,06; 52,56>	48,81
	ofuk	<57,88; 67,41>	62,65
	atmosféra	<70,12; 77,49>	73,81
Silná stěna povrch	kapalina	<46,45; 53,03>	49,74
	ofuk	<54,50; 58,72>	56,61
	atmosféra	<71,92; 91,21>	81,56

Nejlepších výsledků bylo dle předpokladu dosaženo u tenkostěnných vzorků ochlazovaných ponořením do kapaliny. Struktura při zvětšení 50x je znázorněna na fotografii (**obr. 49**). Při těchto podmínkách tuhnutí se hodnota DAS se spolehlivostí 95 % pohybuje v intervalu <31,01; 34,48> μm .

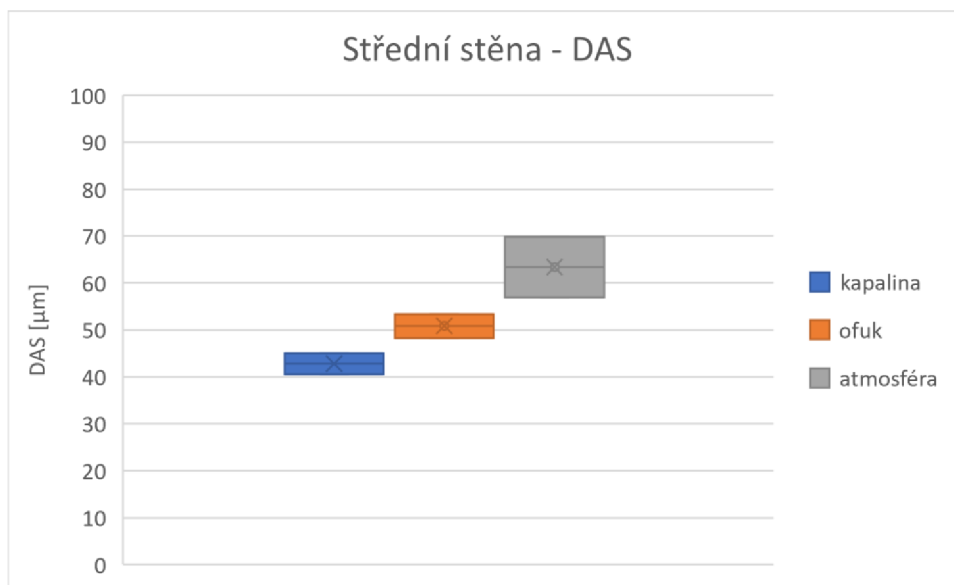
Pouze k malému zhoršení jemnosti struktury (zvýšení DAS o cca 3 μm) dochází při využití ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem místo ponořením do kapaliny (**obr. 50**). To ale platí pouze v případě tenkostěnných odlitků, spolu se zvyšující se tloušťkou stěny tento rozdíl narůstá.

Výrazný nárůst hodnoty DAS byl zaznamenán v případě volného ochlazování bez jakéhokoliv zásahů (**obr. 51**). Srovnání pásem hodnot DAS při spolehlivosti 95 % je pro tenkostěnné vzorky zachyceno v následujícím grafu (**obr. 61**).



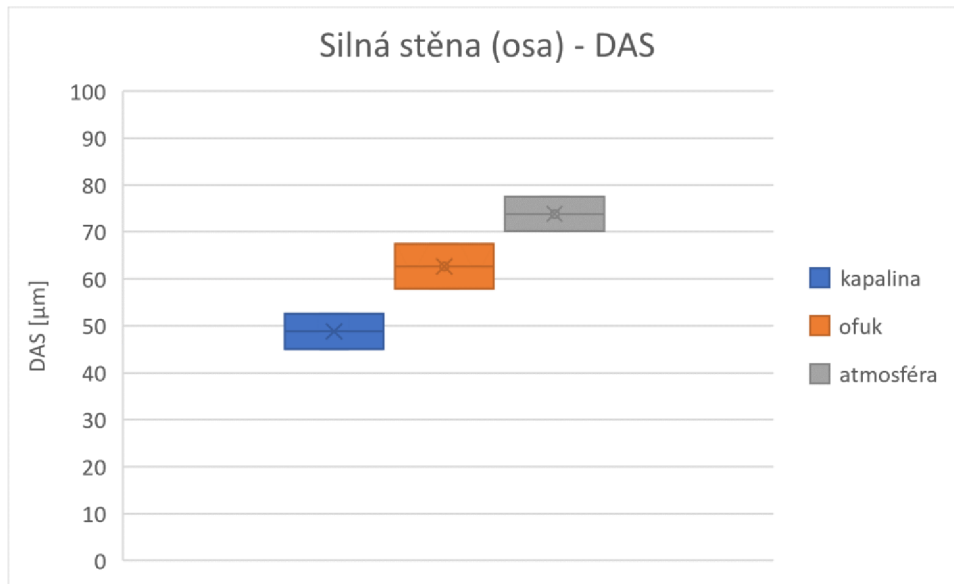
Obr. 61 – Srovnání vlivu režimu ochlazování na hodnoty DAS – tenká stěna.

V případě vzorků se střední tloušťkou stěny (průřez 20×20 mm) lze pozorovat výraznější rozdíl mezi hodnotami DAS získanými pro ochlazování ponořením do kapaliny (**obr. 52**) a ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem (**obr. 53**). Naměřené hodnoty byly řádově o cca 10 μm vyšší než u vzorků s tenkou stěnou. To platí i v případě ochlazování na volné atmosféře (**obr. 54**). Srovnání vlivu jednotlivých režimů ochlazování na parametr DAS pro odlitky střední síly stěny je graficky zachyceno na následujícím obrázku (**obr. 62**).



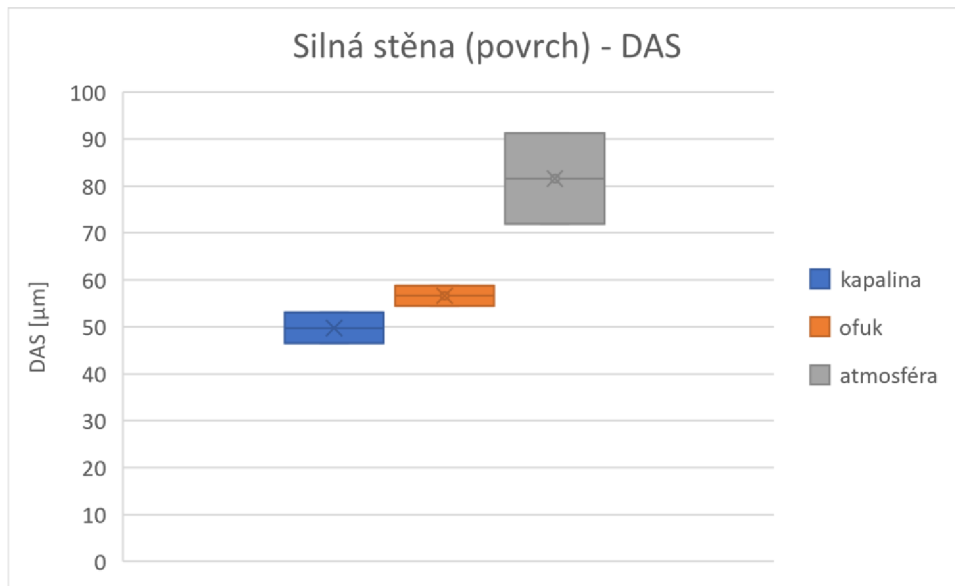
Obr. 62 - Srovnání vlivu režimu ochlazování na hodnoty DAS – střední stěna.

Následující graf (**obr. 63**) zachycuje vliv režimu ochlazování pro vzorky vyřezané z osy silnostěnné části odlitku. Struktury těchto vzorků jsou zachyceny na výše uvedených fotografiích, konkrétně ochlazování do kapaliny (**obr. 55**), ochlazování ofukem (**obr. 56**) a ochlazování na volné atmosféře (**obr. 57**). Nárůst hodnot DAS oproti vzorku se střední tloušťkou stěny je pak opět zhruba 10 μm .



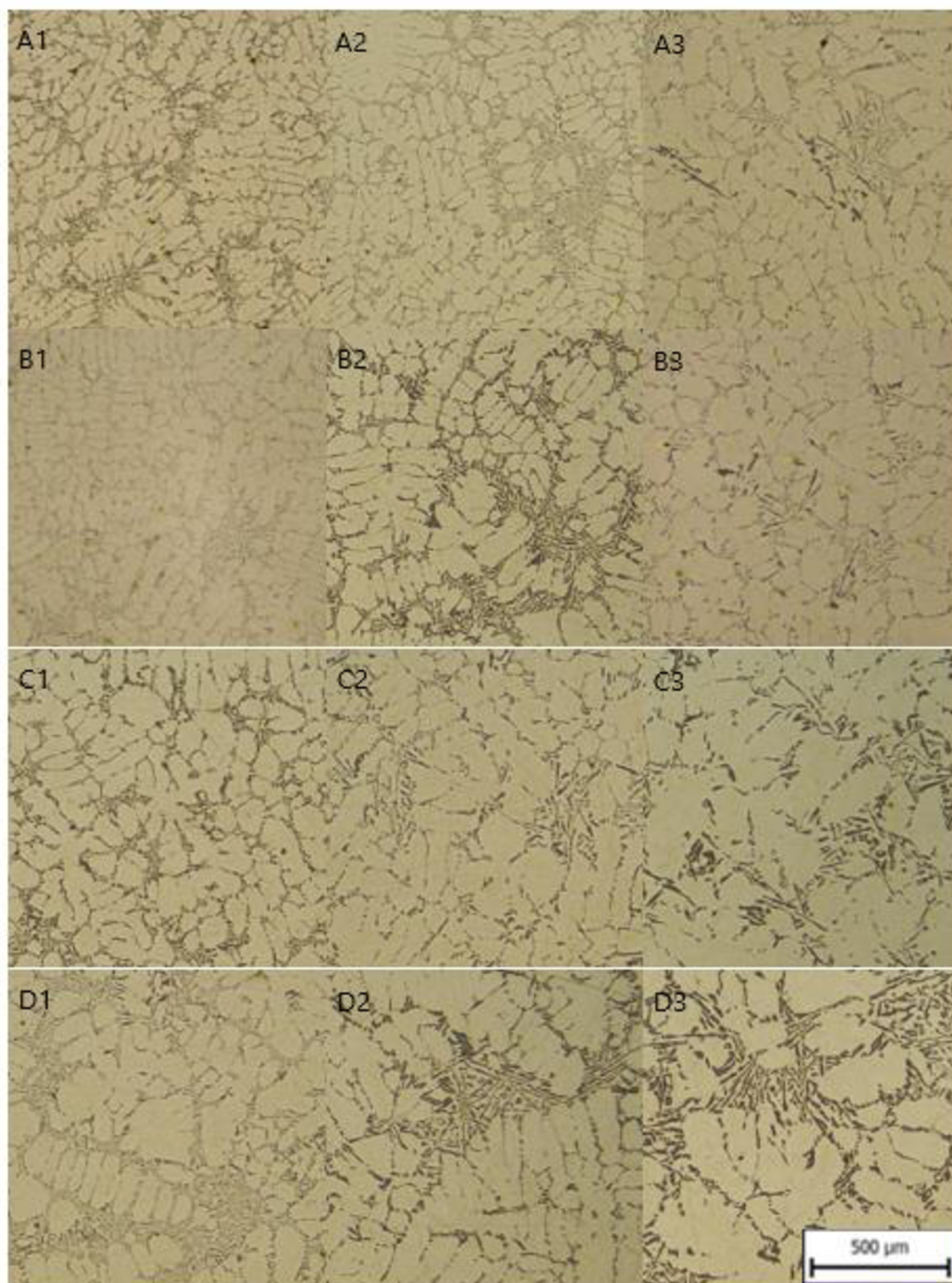
Obr. 63 - Srovnání vlivu režimu ochlazování na hodnoty DAS – silná stěna (osa).

Vliv režimu ochlazování na hodnotu DAS pro čtvrtý typ vzorků, tj. povrchová část silnostěnného odlitku, je opět zachycen v grafu (**obr. 64**). Hodnoty pro vzorky ochlazované za pomoci ponoření do kapaliny (**obr. 58**) zhruba odpovídají hodnotám naměřeným v ose odlitků, vzorky ochlazované pomocí ofukování tlakovým vzduchem (**obr. 59**) pak vykazují nižší hodnoty DAS, než jaké byly naměřeny v ose odlitku, což odpovídá předpokladu, že povrch odlitku tuhne rychleji než jeho střed. V případě tuhnutí odlitku na volné atmosféře (**obr. 60**) byla v povrchové části vzorku získána vyšší průměrná hodnota DAS než v jeho ose. To neodpovídá předpokladu, že povrch odlitku tuhne rychleji než jeho osa. Intervaly spolehlivosti hodnoty DAS pro tyto dva typy vzorku (povrch a osa silnostěnného odlitku) se však částečně překrývají, je tedy možné, že došlo např. pouze k řezu struktury pod jiným úhlem, čímž byla zkreslena naměřená data. Ovšem ani Grubbsův ani Dixonův test odlehlých hodnot žádné hrubé chyby měření nevyloučily.



Obr. 64 - Srovnání vlivu režimu ochlazování na hodnoty DAS – silná stěna (povrch).

Pro názornost je na další straně uvedena fotografie srovnávající morfologii struktury vzorků jednotlivých konfigurací podmínek ochlazování (**obr. 65**). Jedná se vždy o výřez z fotografií uvedených výše (**obr. 49** až **obr. 60**).



Obr. 65 – Srovnání struktur vzorků jednotlivých konfigurací. A – tenká stěna, B – střední stěna, C - silná stěna (osa), D – silná stěna (povrch); 1 – kapalina, 2 – ofuk, 3 – atmosféra.

3.3 Shrnutí experimentu

Vyhodnocení experimentu bylo rozděleno na dvě hlavní části, které představovaly hlavní výstupy práce. V první části byl hodnocen vliv rozdílných podmínek ochlazování na výsledné mechanické vlastnosti. Zkoumány byly tři různé tloušťky stěny odlitku a tři různé režimy ochlazování. To tedy představuje celkem 9 možných kombinací. Vzhledem k rozměrům zkušebního tělesa reprezentujícího silnostěnnou část odlitku bylo možno těchto 9 kombinací rozšířit ještě o tři vzorky získané z povrchové části tohoto silnostěnného tělesa. Celkem tedy bylo zkoumáno 12 různých konfigurací podmínek ochlazování během tuhnutí. Předpokládalo se, že vyšší rychlost ochlazování bude mít za následek vyšší hodnoty mechanických vlastností materiálu. To bylo také experimentálně potvrzeno. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro tenkostěnné vzorky ochlazované ponořením do kapaliny, které představovaly nejvyšší možnou rychlost ochlazování.

V případě pevnosti bylo vyšším stupněm intenzifikace procesu ochlazování během tuhnutí odlitku vždy dosaženo vyšších hodnot. Hodnotíme-li však rozdíl mezi vlivem ponoření do kapaliny a ofukováním tlakovým vzduchem, musíme dojít k závěru, že pro tenkostěnné odlitky (v rámci experimentu zkoumaná síla stěny 3 mm) není tento rozdíl příliš velký, pohybuje se zhruba v řádu 5-10 MPa. Pro některé aplikace může být i takovýto rozdíl zásadní (pokud jsou takto vysoké hodnoty pevnosti vyžadovány zákazníkem).

Podstatný rozdíl lze ale i u tenkostěnných odlitků pozorovat v případě hodnot tažnosti. Zde bylo při přechodu na ochlazování ponořením do kapaliny dosaženo podstatného zlepšení výsledků. Průměrnou hodnotu tažnosti se takto podařilo zdvojnásobit v porovnání s hodnotou pro ochlazování ofukem.

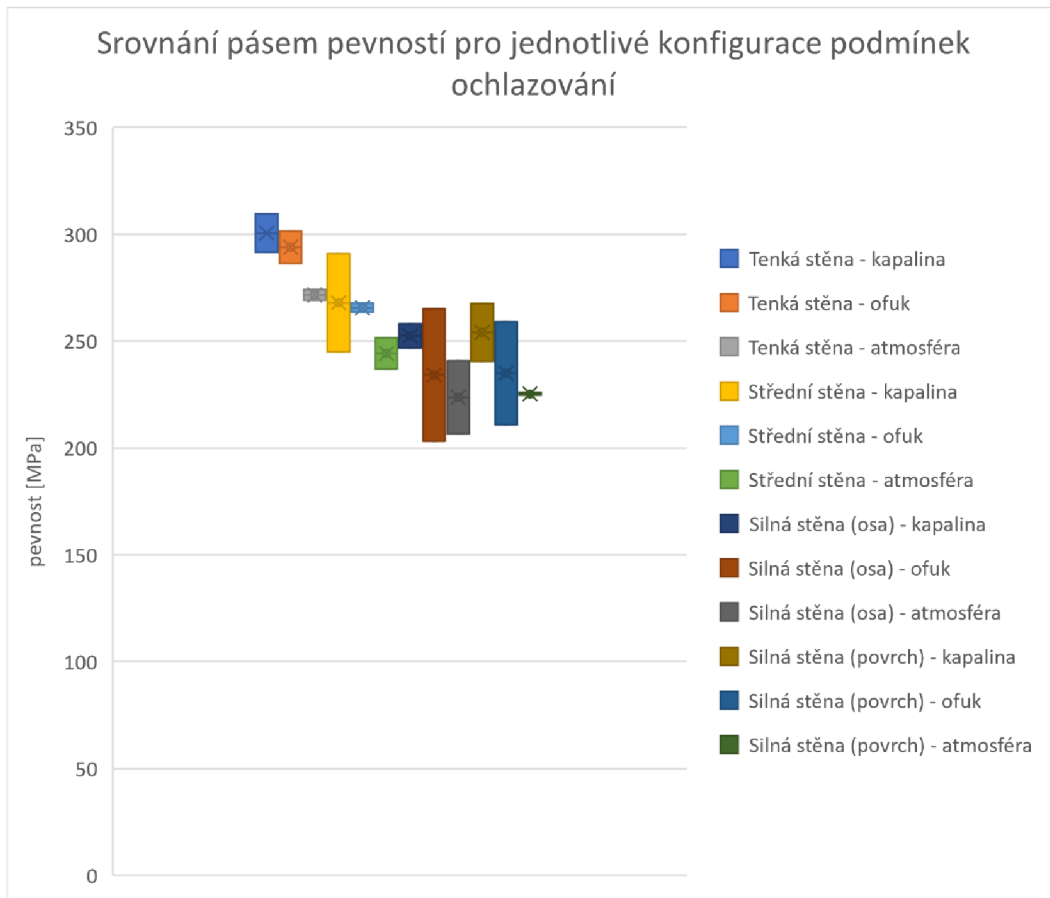
S rostoucí tloušťkou stěny odlitku docházelo k postupnému snižování mechanických vlastností. V případě odlitků se střední tloušťkou stěny, tj. 20 mm, dosahují pevnosti hodnot přibližně odpovídajících hodnotám naměřeným na tenkostěnných vzorcích, které chladly na volné atmosféře, až v případě ochlazování ponořením do kapaliny. Z toho plyne, že vhodným režimem ochlazování může být do určité míry eliminována nepříliš vhodná konstrukce odlitku. I toto pravidlo však má své meze, u silnostěnných vzorků již k dostatečnému zvýšení mechanických vlastností nedošlo ani v případě ochlazování do kapaliny. Srovnání hodnot pevnosti pro ochlazování do kapaliny a ofukem vychází pro vzorky se střední tloušťkou stěny podobně jako v případě tenkostěnných odlitků. Nejvýraznější rozdíl tak můžeme opět pozorovat v hodnotách tažnosti, které se vlivem intenzivnějšího ochlazování v kapalině podařilo znovu zvýšit na zhruba dvojnásobnou hodnotu.

Nejzásadnější rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi naměřenými pro jednotlivé režimy ochlazování lze pozorovat u silnostěnných odlitků. Tyto vzorky již vykazují zásadní rozdíl v hodnotách pevnosti. Rozdíly mezi pevností vzorků ochlazovaných ofukem a pomocí kapaliny již nabývají hodnot okolo 20 MPa. Vliv na tažnost je i v tomto případě výrazný.

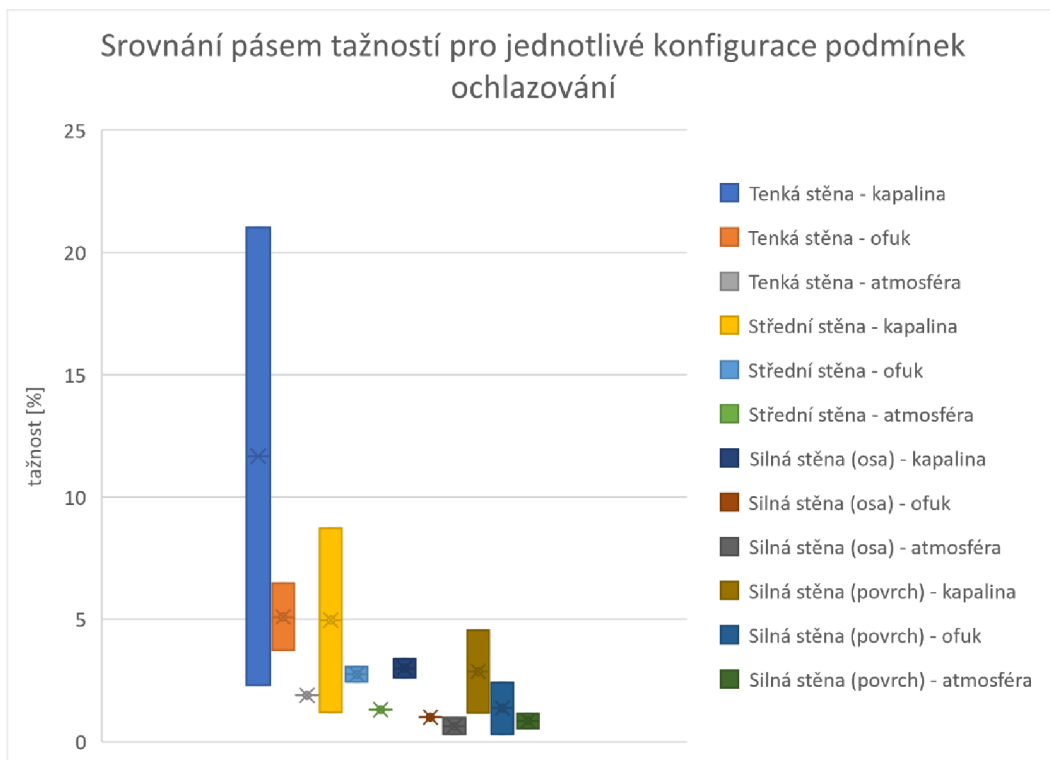
Pro porovnání mechanických vlastností vzorků zhotovených z povrchové části a z osy silnostěnné části zkušebního odlitku bylo předpokládáno, že mechanické vlastnosti při povrchu odlitku budou nabývat vyšších hodnot. Rozdíl však není nijak markantní, pevnosti se liší pouze o nízké jednotky MPa, tažnosti pouze v řádu desetin procenta.

Pro všechny jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování byly v rámci vyhodnocení naměřených dat vypočteny průměrné hodnoty a sestaveny intervaly spolehlivosti na hladině významnosti 0,05. V některých případech tyto intervaly vycházely značně široké. Tato skutečnost je způsobena především malým rozsahem souborů dat. Pro úplnou jednoznačnost dat by bylo vhodné provést větší množství měření.

Intervaly spolehlivosti pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování jsou znázorněny v následujících grafech (**obr. 66** a **obr. 67**).

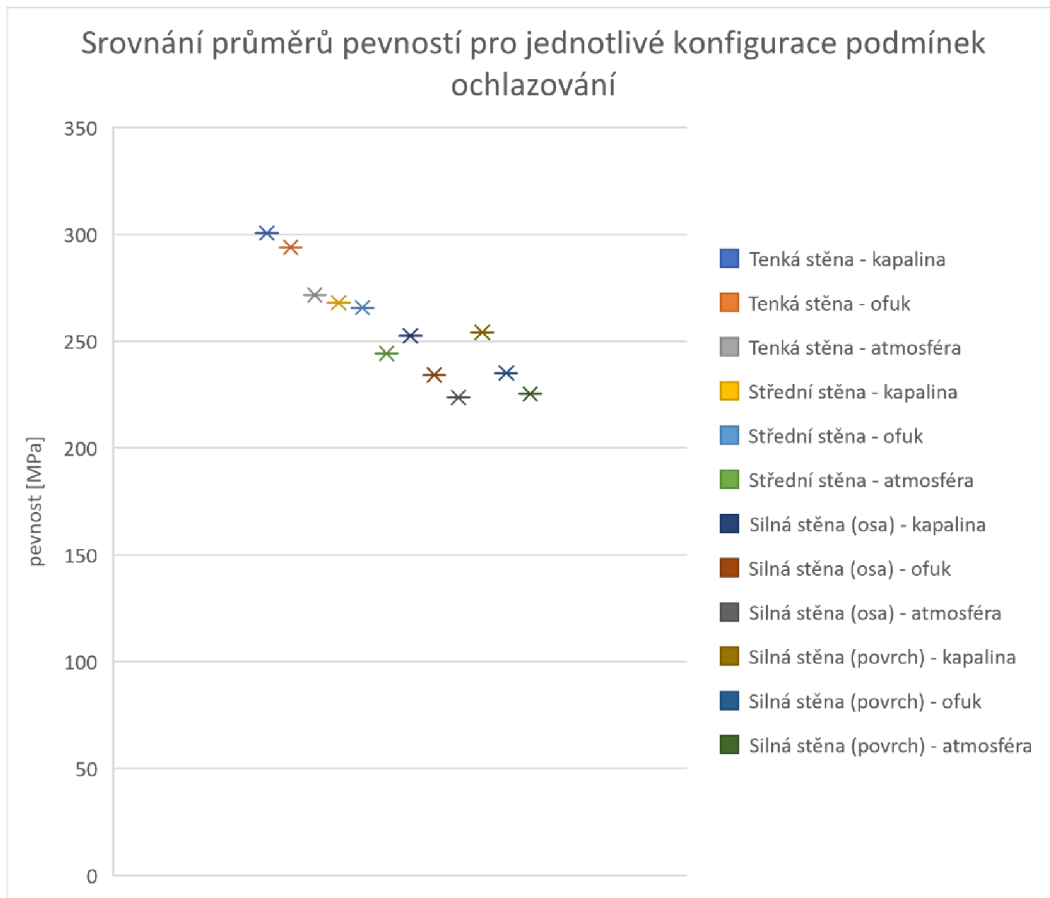


Obr. 66 – Srovnání pásem hodnot pevností pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování

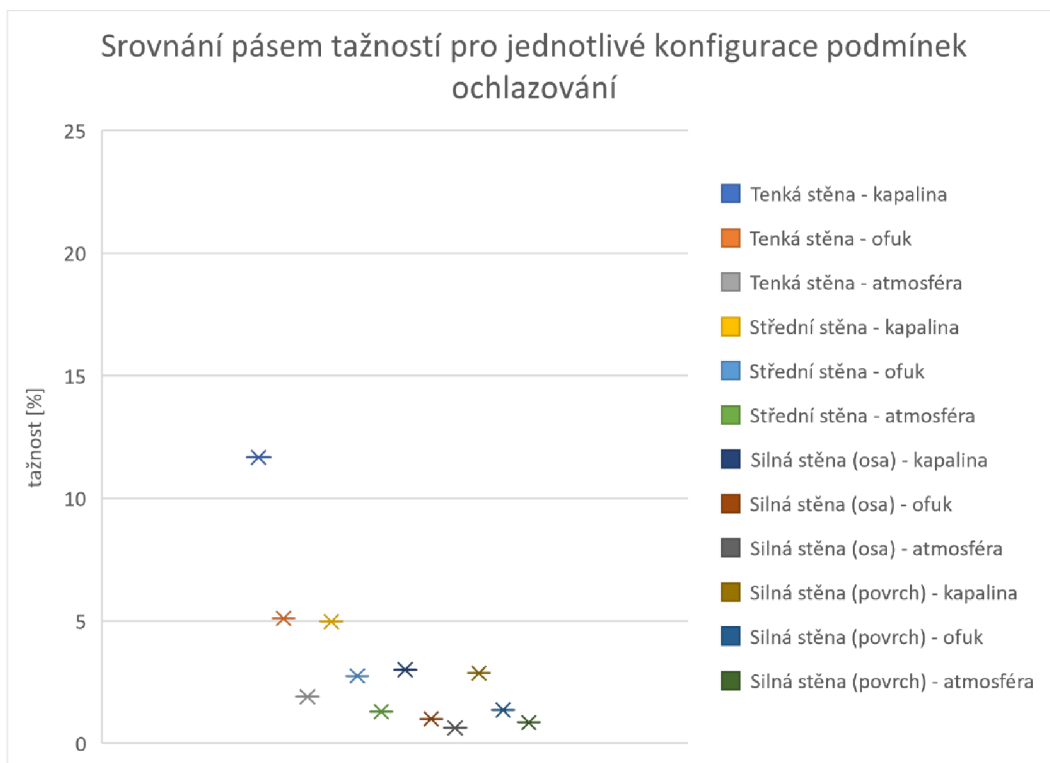


Obr. 67 – Srovnání pásem tažností pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování

Grafy srovnávající pouze vypočtené průměrné hodnoty naměřených hodnot pevnosti (**obr. 68**) a tažnosti (**obr. 69**) jsou uvedeny níže.



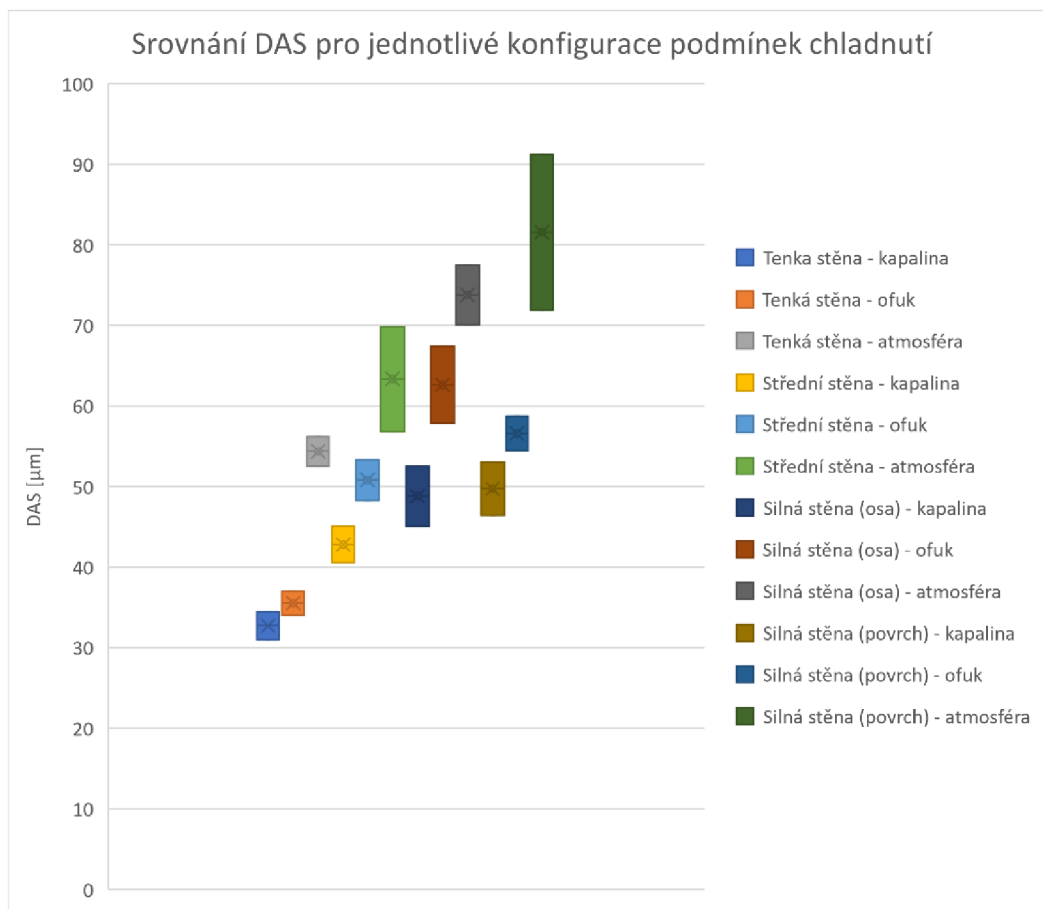
Obr. 68 – Srovnání průměrů hodnot pevností pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování.



Obr. 69 – Srovnání průměrů hodnot tažností pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování.

Druhým sledovaným parametrem vedle mechanických vlastností byla jemnost struktury daných vzorků. Ta byla reprezentována hodnotou veličiny DAS. I v tomto případě byl experimentem potvrzen výrazný vliv kombinace tloušťky stěny a režimu ochlazování na výsledné hodnoty. Vliv režimu ochlazování je v případě struktury významný. U všech tloušťek stěn došlo pomocí intenzifikace ochlazování ke značnému zlepšení struktury. Nejlepších výsledků bylo opět dosaženo pro kombinaci tenké stěny a ochlazování pomocí kapaliny, kde bylo dosaženo hodnot DAS okolo 33 μm .

Pro celkový přehled je níže uveden graf (**obr. 70**) znázorňující srovnání intervalů spolehlivosti hodnot DAS pro jednotlivé konfigurace podmínek ochlazování (tloušťky stěn a režimy ochlazování). Interval představuje pásma hodnot, v nichž lze na základě provedených měření očekávat výslednou mikrostrukturu odlitku se spolehlivostí 95 %.

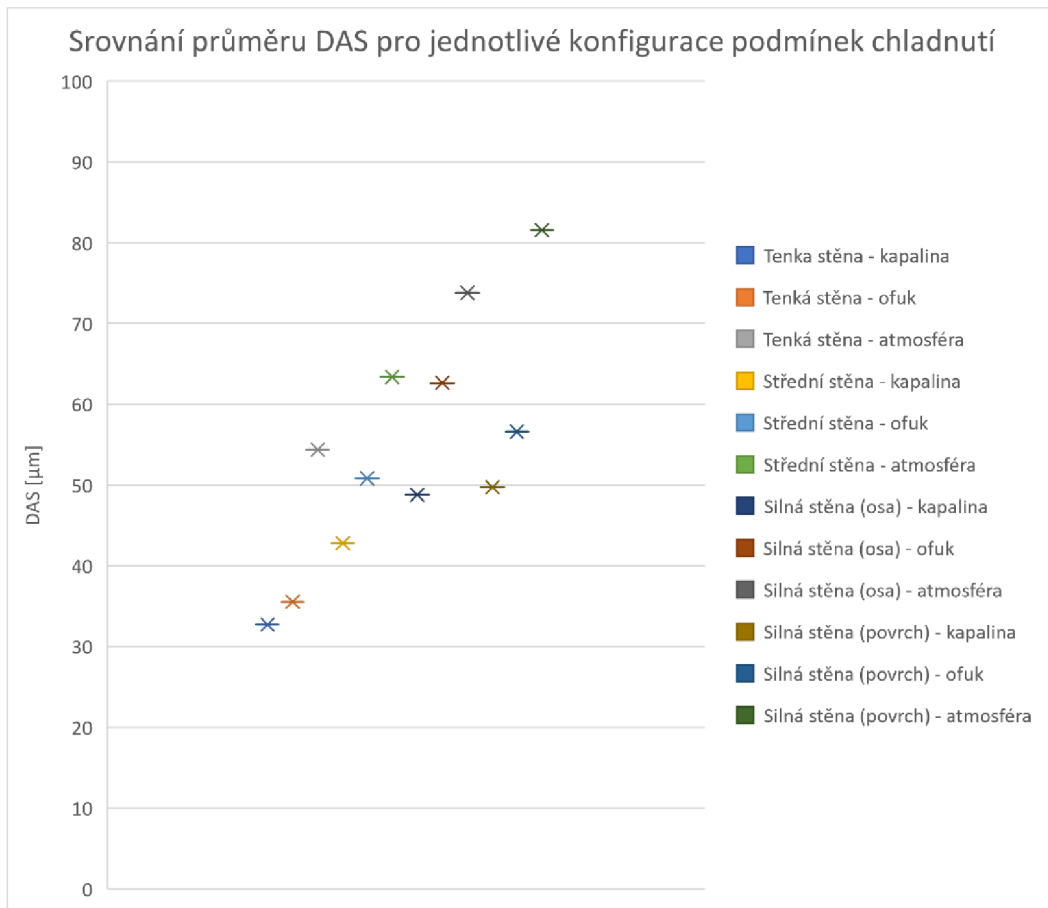


Obr. 70 – Srovnání intervalů spolehlivosti hodnot DAS jednotlivých konfigurací podmínek ochlazování.

Graf (**obr. 70**) mimo jiné názorně prezentuje, že stejných hodnot jemnosti struktury lze dosáhnout různou kombinací sledovaných parametrů. Tedy např. silnostěnné odlitky (30×40 mm) nabývají srovnatelných hodnot DAS jako odlitky se střední tloušťkou stěny (20×20 mm) ochlazované ponořením do kapaliny. Z těchto dat pak lze vycházet při optimalizaci konstrukce odlitku, pokud je jedním z požadavků zákazníka určitá hodnota DAS.

Dále rozdíl mezi hodnotami DAS získanými pro vzorky z povrchu a z osy silnostěnné části odlitku, podobně jako v případě mechanických vlastností, je vcelku zanedbatelný.

Následující graf (**obr. 71**) pak zachycuje stejné srovnání jako předchozí obrázek, avšak v tomto případě jsou vyneseny pouze průměrné hodnoty DAS jednotlivých konfigurací podmínek tuhnutí vzorků.



Obr. 71 – Srovnání průměrných hodnot DAS jednotlivých konfigurací podmínek ochlazování.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit vliv rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí na mechanické vlastnosti a strukturu hliníkových odlitků zhotovených technologií přesného lití na vytavitelný voskový model.

V teoretické části je nejprve stručně popsán princip technologie vytavitelného modelu. Dále jsou popsány slévárenské slitiny hliníku s důrazem na siluminy, které představují nejpoužívanější slévárenskou slitinu hliníku a také skupinu, do níž se řadí slitina dále zkoumaná v experimentální části práce. Byla popsána teorie krystalizace, vliv legujících prvků na vlastnosti siluminů, možnosti ovlivnění průběhu krystalizace a zjemnění struktury a nejčastěji používané tepelné zpracování slitiny.

V experimentální části byl zkoumán vliv síly stěny a režimu ochlazování na výsledné mechanické vlastnosti a strukturu odlitku. Byly navrženy tři zkušební vzorky modelující různou tloušťku stěny odlitku. Tyto vzorky byly zkompletovány do odlitku, který pak byl podroben vždy danému režimu ochlazování. Hodnoceny byly tři režimy ochlazování: ochlazování za pomoci ponoření do kapaliny, ochlazování pomocí ofukování tlakovým vzduchem a volné ochlazování na okolní atmosféře. Pro každou z těchto metod byly za shodných podmínek zhotoveny tři zkušební odlitky. Z jednotlivých odlitků byla vyřezána zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, pomocí které byly hodnoceny mechanické vlastnosti. Z těchto zkušebních těles byly následně zhotoveny metalografické vzorky. Struktura byla vyhodnocována na základě parametru DAS.

Měření mechanických vlastností prokázalo jasný pozitivní vliv ochlazování pomocí kapaliny i tlakového vzduchu na výsledné mechanické vlastnosti a strukturu materiálu. V případě kombinace tenké stěny odlitku a ochlazování pomocí ponoření do kapaliny, tedy nejlepší kombinace, dosahovaly hodnoty meze pevnosti přes 300 MPa při tažnosti okolo 10 %. Hodnota DAS se v tomto případě pohybovala okolo 33 μm .

Výsledky diplomové práce prokázaly výrazný vliv ovlivnění rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí odlitku na jeho výsledné mechanické vlastnosti a strukturu. Bylo navíc prokázáno větší ovlivnění těchto parametrů za použití ochlazování ponořením do kapaliny oproti metodě využívající ofukování tlakovým vzduchem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, PR a RF SMART. *Investment casting*. Cambridge: The university press, 1995, 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
 2. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitek vyráběných metodou vytavitelného modelu: Studijní opory*. Brno: VUT FSI, 2009, 92 s.
 3. Investment Casting Process Steps (Lost Wax). *Americancastingco.com* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: americancastingco.com/investment-casting-process/
 4. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
 5. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
 6. OIUVU, Miao, Wu DONGJIANG, Chai DONGSHENG, Zhan YU, Bi GUIJUN, Niu FANGYONG a Ma GUANGYI. Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2020, (186) [cit. 2022-04-23]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108205>
 7. PÍŠEK, F., L. JENÍČEK, P. RYŠ a kol. *Nauka o materiálu I. Část 3. 2*. Praha: Academia, 1973, 596 s.
 8. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.
 9. STROUHALOVÁ, Michaela. *Studium fázových změn v oceli během jejího tuhnutí*. Ostrava, 2018. Disertace. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálůvě-technologická. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D.
 10. ZEMČÍK, Ladislav. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1991. ISBN 80-214-0248-2.
 11. Thermodynamics of homogeneous nucleation. *Polymerdatabase.com* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Spherulites.html>
 12. Thermodynamics of heterogeneous nucleation. *Chegg.com* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/4-20pts-consider-heterogeneous-nucleation-shown-figure--scientist-measured-interface-energ-q46163627>
 13. BEŇO, J. a J. ŠPIRUTOVÁ. *Počítačová podpora liti a tuhnutí odlitek: Studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-80-248-3355-2. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno_Pocitacova-podporaliti-a-tuhnuti-odlitku.pdf
 14. KUCHAR, L. a J. DRÁPALA. *Příspěvek k teorii segregáčních jevů při krystalizaci kovů a slitin* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://adoc.pub/pispvek-k-teorii-segreganich-jev-pi-krystalizaci-kov-a-sliti.html>
 15. OKAYASU, M. a S. YOSHIDA. Influence of solidification rate on material properties of cast aluminium alloys based on Al–Si–Cu and Al–Si–Mg. *International Journal of Cast Metals Research* [online]. 2014, **28**(2), 105-116 [cit. 2022-05-17]. ISSN 1364-0461. Dostupné z: doi:10.1179/1743133614Y.0000000128
-

-
16. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
 17. REN-GUO, Guan a Tie DI. A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)* [online]. 2017, **30**(5), 409-432 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0565-8>
 18. ZEMČÍK, Ladislav. *Výroba speciálních odlitků*. Brno: VUT, 1981.
 19. SLOVÁK, Stanislav. *Teorie slévárenských pochodů: určeno pro posl. 3. a 4. roč. hutnické fak. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990, 310 s. ISBN 80-7078-064-9.*
 20. JIA, S., L. NASTAC a X. LIU. Ultrasonic Stirring Effects on the Microstructure of A356 Castings. *Transactions AFS*. 2013, (121), 181-187. ISSN 0065-8375.
 21. LI, N., L. ZHANG, R. ZHANG, P. YIN, H. XING a H. WU. Research on Grain Refinement in Hypoeutectic Al-Si Alloy during Solidification under an Alternating Electric Current Pulse. *Metals* [online]. 2019, **2019**, 9 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9050571>
 22. HUERTA, E., A. I. OLIVA, F. AVILÉS, J. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ a J. E. CORONA. Elastic Modulus Determination of Al-Cu Film Alloys Prepared by Thermal Diffusion. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2012, 2012, **2012**, 8 [cit. 2022-04-23]. 895131. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2012/895131>
 23. MISHRA, A. Friction Stir Welding of Dissimilar Metal: A Review. *International Journal fo Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* [online]. 2018, **2018**(6) [cit. 2022-04-23]. ISSN 2321-9653. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322631292_Friction_Stir_Welding_of_Dissimilar_Metal_A_Review/download
 24. DURMUS, YE, SS MONTIEL GUERRERO, H TEMPEL, F HAUSEN, H KUNGL a RA EICHEL. *Influence of Al Alloying on the Electrochemical Behavior of Zn Electrodes for Zn-Air Batteries with Neutral Sodium Chloride Electrolyte* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: doi:10.3389/fchem.2019.00800
 25. KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV*. 4., přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
DAS	vzdálenost os sekundárních větví dendritu (Dendrite Arm Spacing)	[μm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	volná entalpie (Gibbsova energie)	[J]
H	entalpie	[J]
L	délka	[m]
N	exponent deformačního zpevnění	[-]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
S	entropie	[JK ⁻¹]
T	termodynamická teplota	[K]
n	Počet hodnot souboru (počet měření)	[-]
r	poloměr	[m]
s	směrodatná odchylka	[-]
$t_{1-\alpha/2;n}$	kvantil Studentova rozdělení	[-]
\bar{x}	aritmetický průměr	[-]
$x_{(1)}$	nejnižší hodnota souboru dat	[-]
$x_{(2)}$	druhá nejnižší hodnota souboru dat	[-]
$x_{(n)}$	nejvyšší hodnota souboru dat	[-]
$x_{(n-1)}$	druhá nejvyšší hodnota souboru dat	[-]
α	hladina významnosti	[-]
γ	energie fázového rozhraní	[J]
ε	deformace	[-]
σ	napětí	[MPa]