

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROZMĚROVÁ STABILITA ODLITKŮ ZE SLITIN AL ZHOTOVENÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

DIMENSIONAL STABILITY OF INVESTMENT AL CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ ÚŘEDNÍČEK

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MILAN HORÁČEK, CSC.

BRNO 2008

OBSAH

1	Úvod	10
1.1	Cíl diplomové práce	10
1.2	Historie přesného lití	10
1.3	Současné přesné lití ve světě	11
2	Teoretická část	13
2.1	Podstata metody přesného lití	13
2.1.1	Matečné formy	15
2.1.2	Voskové modely	16
2.1.3	Sestavování stromečku	17
2.1.4	Výroba keramické formy	18
2.1.5	Vytavení vosku ze skořepiny	20
2.1.6	Vypalování skořepiny	21
2.1.7	Odlévání	21
2.1.8	Dokončovací operace	22
2.2	Slitiny hliníku	23
2.2.1	Strukturní složky slitin hliníku	23
2.2.2	Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$	23
2.2.3	Dendritická struktura	25
2.2.4	Slitiny Al-Si	25
2.2.5	Morfologie eutektika slitin Al-Si	26
2.2.6	Modifikace slitin Al-Si	28
a)	Modifikace sodíkem	28
b)	Modifikace stronciem	29
2.3	Způsoby plnění formy	29
2.3.1	Horní plnění formy	29
2.3.2	Spodní plnění formy	30
2.3.3	Srovnání horního a spodního plnění formy	31
2.4	Využití simulačního softwaru ve slévárenství	32
2.4.1	Struktura simulačních programů	32
2.4.2	Výsledky simulací	33
2.5	Strukturní analýza vzorků	34
2.5.1	Měření DAS	34
2.5.2	Měření pórovitosti	34
3	Praktická část	36
3.1	Cíl praktické části	36
3.2	Postup zhotovení zkoumaného odlitku	36
3.2.1	Výroba voskového modelu	36
a)	Matečná forma	36
b)	Naplnění formy a vyjmutí voskového modelu	37
c)	Kompletace voskového modelu	39
d)	Vtoková soustava	39
3.2.2	Výroba keramické skořepiny	41
a)	Namáčení a posyp stromečku	41
b)	Sušení obalů	43
c)	Vytavování skořepiny	44
3.2.3	Odlévání	44
a)	Charakteristika odlévané slitiny	44

b) Úprava taveniny	45
c) Postup lití	46
3.2.4 Dokončovací operace.....	49
3.3 Výsledky počítačové simulace.....	50
3.3.1 Plnění formy	50
3.3.2 Tuhnutí odlitku.....	53
3.4 Laboratorní hodnocení	57
3.4.1 Odběr a úprava vzorků.....	57
3.4.2 Výsledky hodnocení DAS.....	60
3.4.3 Výsledky hodnocení pórovitosti.....	62
4 Závěr.....	69
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	72
Seznam použité literatury.....	73
Seznam příloh.....	74

1 ÚVOD

1.1 Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce je dosažení lepších strukturních vlastností a odstranění typických vad u vytipovaného odlitku ze slitiny AlSi7MgTi (ČSN 424334). Těchto výsledků se má dosáhnout využitím spodního plnění keramické skořepiny vyrobené metodou vytavitelného modelu.

Spodní plnění je pomocí počítačového softwaru simulováno a případné problémy řešíme a snažíme se je v našich podmínkách odstranit nebo snížit riziko jejich vzniku. Tato práce má za cíl srovnání s konvenční metodou horního plnění.

Jedná se o velice zajímavou problematiku zasluhující si větší pozornost. Dosažení pozitivních výsledků přinese určitou výhodu v tvrdém konkurenčním boji, který dnes v oblasti přesného lití panuje. Na druhou stranu neúspěch zase ukáže, je-li třeba hledat jiný technologický způsob výroby.

1.2 Historie přesného lití

Přesné lití je jednou z nejstarších technologií výroby odlitků na světě. Dokládají to četné archeologické nálezy.

Jedním z nejstarších nálezů je bronzový model vozu tažený čtyřmi osly, nalezený ve vykopávkách v Tell Agrabu v Iráku. Většina odlitků byla používána jako umělecké předměty, ale není pochyb, že se odlitky přesného lití prosadily i jako díly výstroje, hroty šípů apod. Je také známo, že přesným litím se odlévaly během egyptské Střední říše (2134 – 1778 před Kristem) britvy a zrcadla. Znalost tohoto umění se rozšířila napříč Asií a Evropou tak, že koncem 1. tisíciletí př. n. l. bylo používáno od Číny až po Velkou Británii [1].



obr. 1 Bronzový Buddha, Kamakura, Japonsko

Dalším vzácným artefaktem, který stojí za zmínku, je bronzová 16m vysoká a 450 tun vážící socha Buddhy v japonské Kamakuře v klášteře Todaiji, která byla odlita v letech 743 – 749 našeho letopočtu (obr. 1). Socha byla vyrobena po částech metodou vytavitelného modelu a díly byly poté spojeny tvrdým pájením. Literární prameny dokládají spotřebu 7000kg uhlí a 7000kg včelího vosku [1].

Zajímavé jsou také odlitky Benvenuto Cellinyho, zlatníka a sochaře. Ten je autorem 400 let starého odlitku Persea, který dodnes stojí ve Florencii. Celliny vymyslel systém nálitkování a odvzdušňování, který se používá v technické praxi dodnes. Mimo

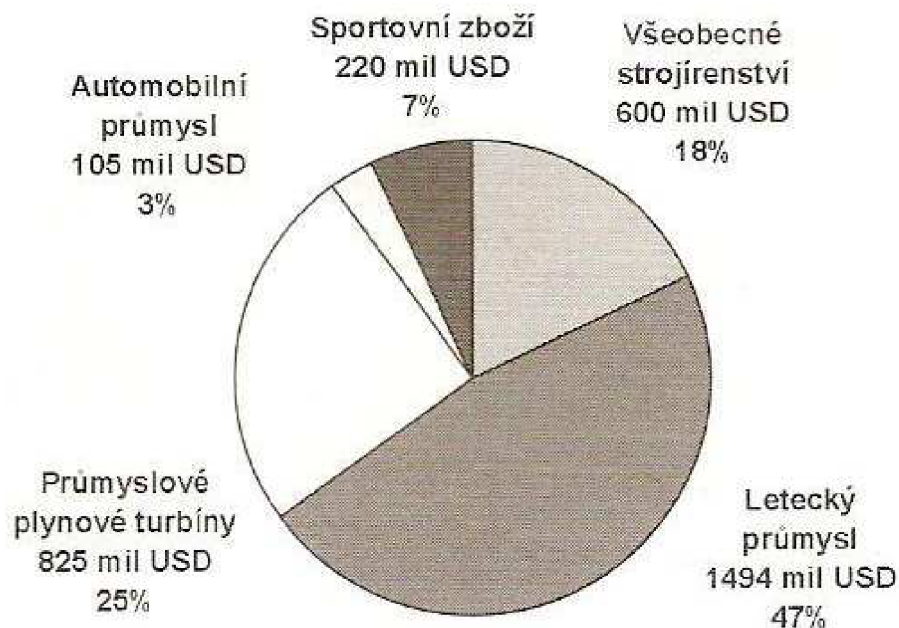
jiné také popsal postup výroby jader pro duté sochy. Tyto postupy se paralelně rozvíjely i v Nigérii a v Jižní Americe.

Do konce 19. století sloužily odlitky především jako umělecké předměty. Poté byly provedeny první kroky k obchodnímu využití tohoto procesu americkým zubařem R. D. Philbrookem, který v roce 1897 využil metodu ztraceného vosku k výrobě zubních korunek.

1.3 Současné přesné lití ve světě

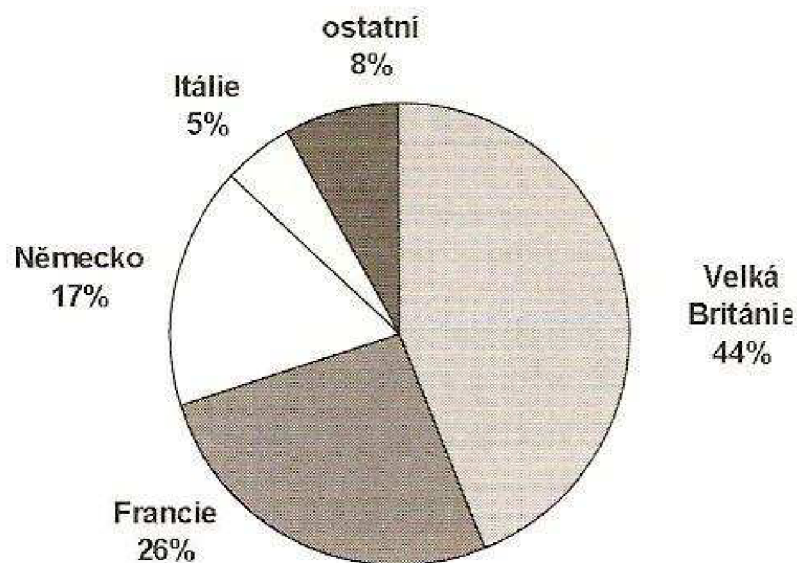
Velký zvrat přinesla pro technologii vytavitelného modelu druhá světová válka, kdy se touto metodou začaly vyrábět například součásti pro letecký průmysl. Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu se neustále rozšiřuje a v roce 2000 dosáhla hodnoty obrátu okolo 5 miliard USD [2]. K největším odběratelům přesných odlitků vyrobených touto technologií patří průmysl letecký, automobilový, kosmický, energetický a obecně strojírenský.

Největším světovým výrobcem přesných odlitků z hlediska teritorií je Severní Amerika, zahrnující USA (95%), Kanadu (3%) a Mexiko (2%). Její celkový podíl na světové výrobě odlitků činí 52%. Přehled hlavních odběratelů viz obr. 2



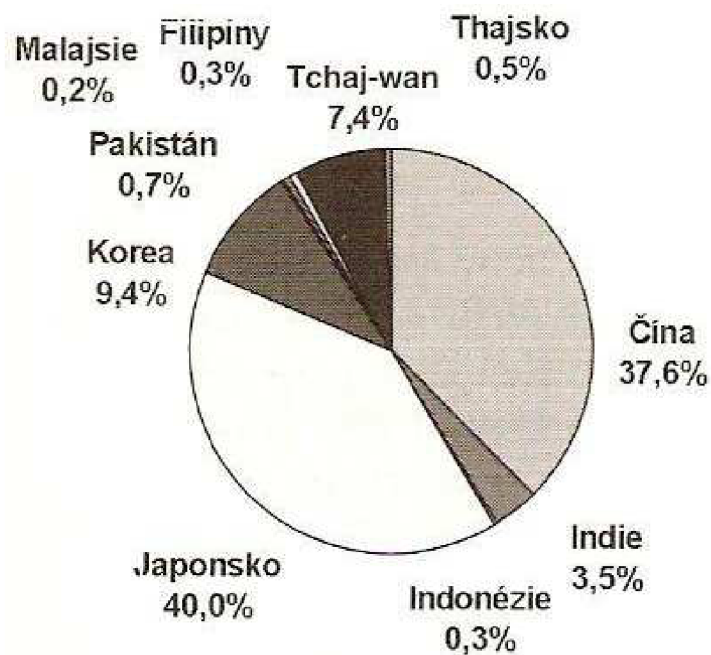
obr. 2 Přehled největších odběratelů přesných odlitků v Severní Americe [2]

Druhým největším výrobcem přesných odlitků (25% celkové světové produkce) je západní Evropa. V této lokalitě má největší slovo Velká Británie a Francie (obr. 3)



obr. 3 Rozdělení výroby přesných odlitků v západní Evropě [2]

Dalším významným teritoriem je Asie, kde má největší produkci přesných odlitků Japonsko, Čína a Korea (obr. 4)



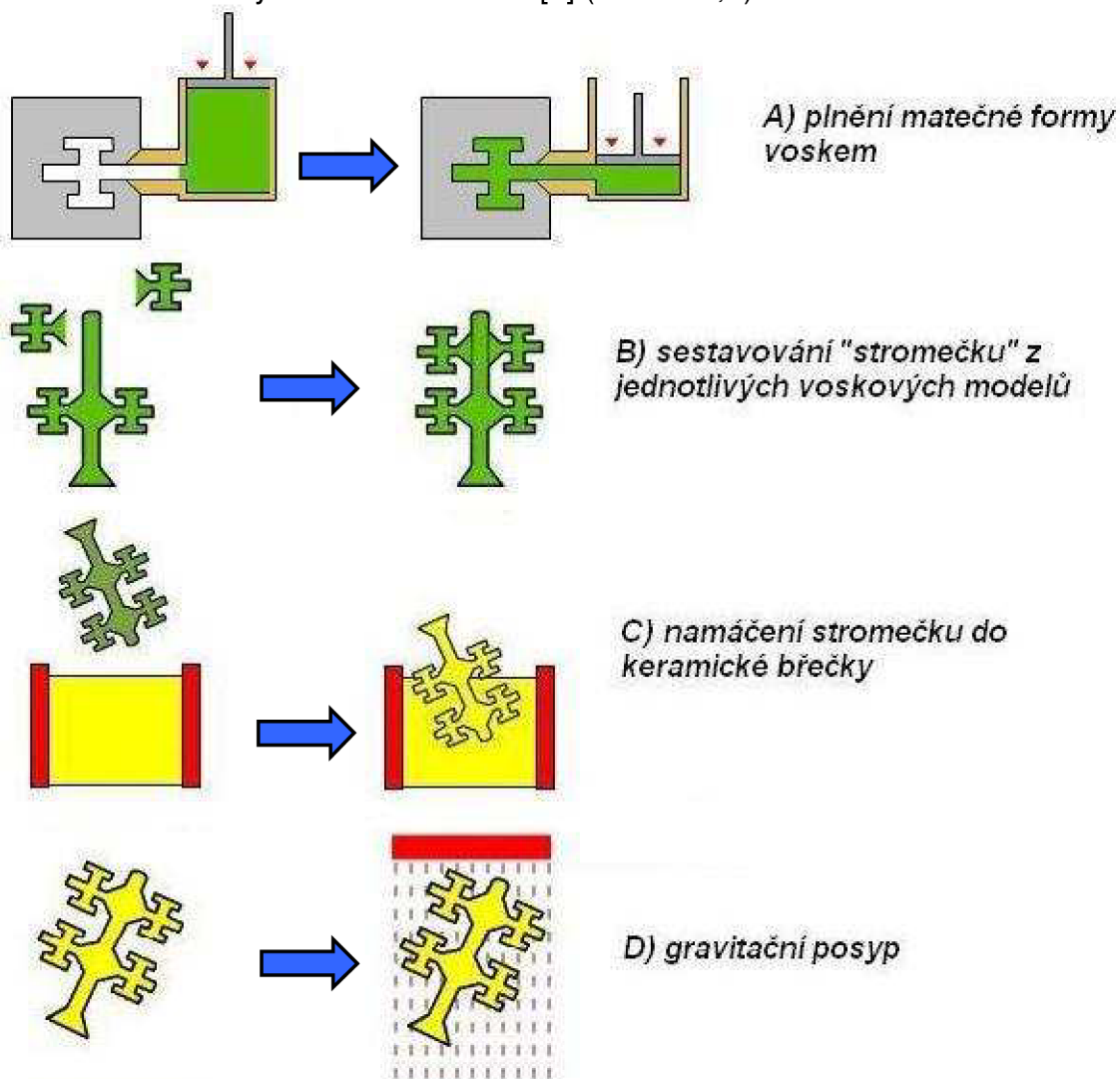
obr. 4 Situace ve výrobě přesných odlitků v Asii [2]

2 TEORETICKÁ ČÁST

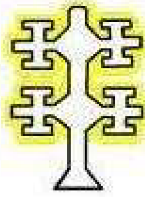
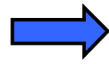
Technologie vytavitelného modelu (ztraceného vosku, či přesné lití) zaujala bezesporu jedno z předních míst mezi moderními slévárenskými technologiemi. Za posledních 50 let se tato výrobní metoda vyvinula z technologie považované za metodu vysoce specializovanou na technologii v dnešní době velice rozšířenou, reflektující požadavky zákazníků na odlitky jak z pohledu přesnosti tvarové a rozměrové, tak i materiálové náročnosti.[3]

2.1 Podstata metody přesného lití

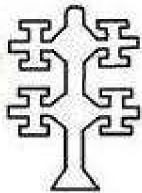
Ve stručnosti lze popsat technologii tak, že nejdříve vytvoříme voskový model (vstřikováním vosku do matečné formy), ten se pak spolu s dalšími modely připojí k vtokové soustavě (také z vosku) a takto vytvořený voskový stromeček se pak postupně obaluje keramickou hmotou. Potom následuje vytavení vosku z keramiky a její tepelné zpracování žiháním. Odlévá se převážně do žhavých forem. Následují dokončovací operace, tj. odstranění skořepiny a tryskání povrchu odlitků, které se před touto operací odstraní od vtokové soustavy většinou řezáním. [3] (viz obr.5,6)



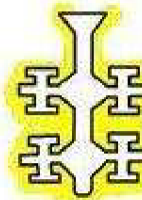
obr. 5 Postup výroby přesného lití [4]



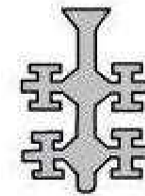
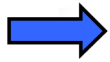
E) vytavování voskových modelů



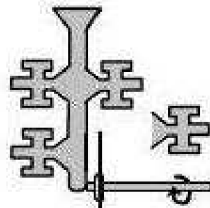
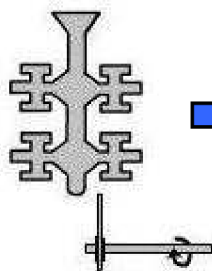
F) žihání skořepiny



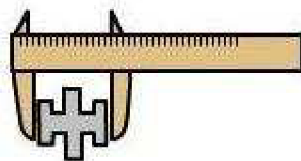
G) odlití



H) otryskání odlitek



J) odřezání vtoků



K) konečná kontrola rozměrů

obr. 6 Postup výroby přesného lití [4]

2.1.1 Matečné formy

První důležitou operací v přesném lití je výroba modelu. Hlavním zájmem je tedy vytvoření dokonalé formy pro budoucí voskový model. Formy na vytavitelný model by měly splňovat tyto požadavky:

- Umožnit výrobu kvalitních zdravých modelů s bezvadným povrchem a požadovanou přesností rozměrů, bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad.
- Doba nutná k setrvání odstříknutých modelů ve formě má být co nejkratší.

Formy lze rozdělit [4]:

- Podle konstrukce
 - Samostatné formy pro jeden model
 - Samostatné formy pro více modelů (etážový odstřík)
 - Ve formě výměnných vložek do upínacích stolic vstřikolisů
- Podle účelu a použití
 - Forma k výrobě vlastních modelů
 - Forma k výrobě vtoků, nálitků, konektorů apod.
- Podle stupně mechanizace
 - S ručním vyjímáním
 - S vyhazovači modelů
 - S jádry a částmi forem ručně nebo mechanicky rozebíratelnými
 - Celkově mechanizované nebo automatizované
- Podle způsobu výroby
 - Obráběním (podle výkresu)
 - Odléváním (podle matečného modelu)
 - Galvanoplastika, metalizace
- Podle materiálu formy
 - Ocel
 - Hliníkové slitiny
 - Nízkotavitelné slitiny
 - Zinkové slitiny
 - Plastické hmoty
 - Sádra
 - Kaučuk

Pro dlouhou životnost, rozměrovou přesnost a velkou sériovou výrobu jsou nejpoužívanější formy vyrobené obráběním z oceli nebo hliníkových slitin. Modely jsou velmi přesné, ale jistou nevýhodou je nákladnost výroby formy. Formy mohou totiž obsahovat několik výsuvných jader a částí.

2.1.2 Voskové modely

K výrobě voskových modelů slouží celá řada voskových směsí. Nejedná se tedy o čistě přírodní či čistě syntetický vosk, ale o jakési sloučeniny syntetických a přírodních vosků. Na tyto voskové směsi jsou samozřejmě kladeny nemalé nároky (bod tavení, viskozita, smršťování/roztahování).

Rozdělení voskových směsí [4]:

- Vosky na modely
 - Čisté (neplněné)
 - Plněné
 - Emulgované
- Vosky na vtoky a vtokové soustavy
- Rekultivované vosky
- Speciální vosky
 - Adhesní (lepivý)
 - Namáčecí
 - Opravný
 - Vosky na jádra
 - Rozpustné vosky

Hmota na výrobu voskových modelů musí mít následující charakteristiky [4]:

- Dostatečnou tvrdost, pevnost a dostatečnou stabilitu
- Dostatečnou pružnost pro manipulaci
- Malé smrštění během tuhnutí a tím i malou roztažnost za vyšších teplot
- Nízké procento popelu
- Vhodnou viskozitu
- Nesmí se lepit na stěny formy
- Musí odolávat oxidaci
- Nesmí reagovat s obalovými hmotami
- Musí přesně reprodukovat tvar formy
- Musí ztuhnout ve formě během krátké doby po vstříknutí
- Regenerace vosku – je důležitá z ekonomického a ekologického hlediska

V dnešní době je nejobtížnější dodržení přesného geometrického tvaru, protože modelová hmota při tuhnutí mění rozměr. To se projevuje nepříznivě hlavně u velkých hmotných modelů s rozdílnou tloušťkou stěn [4]. Částečně tomu můžeme zabránit zvýšením tlaku plněné voskové směsi a nebo také vkládáním voskových jader přímo do matečné formy.

Rozhodující pro výrobu kvalitních voskových modelů, bez ohledu na typ stroje jsou [4]:

- Teplota vosku ve vstřikovací stroji – měla by být konstantní v celém stroji, tzn. teplota vosku v zásobníku by měla být stejná jako teplota vosku v trysce.

- Teplota formy
- Vstřikovací tlak – měl by být dostatečně vysoký k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.
- Průtoková rychlost – je nejdůležitějším parametrem při vstřikování slabostěnných modelů nebo modelů s nepravidelnými tvary. Průtoková rychlost by měla být tak vysoká, aby vosk dostatečně rychle vyplnil formu, ale zároveň by měla být dostatečně pomalá k zabránění turbulencí a vzniku bublin.
- Doba vstřikování a doba výdrže – měla by být dostatečná k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.

2.1.3 Sestavování stromečku

Sestavení stromečku se skládá z napojení jednotlivých voskových modelů na vtokovou soustavu. V případě velkých modelů je možné umístit na vtokovou soustavu pouze jeden model. V případě velmi malých kusů je možné umístit na vtokovou soustavu i desítky těchto modelů.

Tvar stromečku ovlivňuje:

- Způsob připojení modelu:

Modely se napojují na vtokovou soustavu lepením nebo pájením. Lepení spočívá v nanášení lepidla na stykové plochy modelu a vtok. soustavy. Pájení spočívá v místním natavení styčných ploch modelu a vtok. soustavy a k jejich následnému spojení. (pájení viz obr. 7)



obr. 7 Pájení voskových modelů na stromeček

- Obalování:

Z hlediska obalování by měly být modely umístěny dutinou dolů, aby mohla obalová hmota lépe stékat a nezvětšovat tak na určitých místech vrstvu.

- Vytavování:

Stromeček musí umožnit vytečení vosku při vytavování (při nedostatečném vytečení jsou v odlitcích zbytky popelovin). Můžeme použít pomocné výfuky.

- Způsob lití:

Samonosná skořepina zaručí stabilní základnu pro lití.

- Plnění formy tekutým kovem:

Použití klidného plnění, případné použití filtru.

- Oddělování odlitků od vtokové soustavy:

Oddělování od vtokové soustavy má vliv na ekonomiku, využití kovu a práce na oddělení.

- Standardizace vtokových soustav:

I za cenu snížení využití tekutého kovu je kvůli manipulaci nutné standardizovat vtokové soustavy. (viz obr.8)



obr. 8 Standardizované vtoky

Sestavení jednotlivých modelů na stromeček musí být provedeno tak, aby byl možný dostatečný přístup k jednotlivým modelům pájedlem. Také vzdálenost mezi jednotlivými modely musí být taková, aby i po nanesení poslední vrstvy byla mezi modely mezera. Vzdálenost etází musí být taková, aby bylo zajištěno rovnoměrné obalení všech částí modelů.

2.1.4 Výroba keramické formy

Výroba keramické formy je jedním z nejdůležitějších úseků celé slévárny přesného lití. Keramická forma se vytvoří obalením celého stromečku v keramické hmotě.

Formovací hmoty pro výrobu keramických skořepin se skládají z:

- Plniva:

Základní vlastnosti skořepiny jsou dány hlavně vlastnostmi žáruvzdorného materiálu. Jako žáruvzdorné materiály používáme hlavně kysličníky a křemičitany. V praxi se používá z kysličníků Al_2O_3 – oxid hlinitý, ZrO_2 – oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se používá mulit, zirkon, silimanit a hlavně molochit. Molochit není běžná surovina, je to v podstatě mulit (56%) ve sklovité obálce amorfního oxidu křemičitého (44%). [4] Plniva používaná jako posypový materiál a plnivo do břechky mohou být stejné, ale nemusí. Na primární i sekundární posyp se volí jemnější zrno, pro další vrstvy posypu se volí struktura zrn hrubší. Primární a sekundární posyp se zrnitostí cca 0,175 – 0,25mm utváří výslednou strukturu povrchu odlitku. Další posypy se zrnitostí cca 0,25 – 0,5mm zajišťují prodyšnost formy a její manipulační pevnost [5].

- **Pojiva:**

Těž nazývaná jako vazná kapalina, spolu se žáruvzdorninou tvoří vlastní obalovou hmotu pro výrobu keramických skořepin.

Musí splňovat [4]:

- Nesmí snižovat žáruvzdornost formy a musí být netečné při vypalování formy k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu.
- Musí předat formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vypálení.

Jako pojiva se používají zejména koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále organické sloučeniny hliníku, zirkonu, titanu a některé anorganické sloučeniny. Křemičitá pojiva jsou buď na vodní bázi nebo lihové. Pro primární vrstvu se přednostně používají pojiva na vodní bázi. Ty mají nevýhodu v delší době sušení obalu oproti pojivům na alkoholové bázi. Pro sekundární a další obaly se mohou použít pojiva na alkoholové bázi a to hlavně tam, kde se k obalování používají roboti. Jejich výhodou je rychlejší doba sušení i vytvrzení, způsobená působením plynného prostředí – amoniaku.

Obalování:

Základem celé technologie vytavitelného modelu je používání nedělené formy, která se po odlití a ztuhnutí odlitku rozbije a je nutno pro další odlitek vyrobit formu novou. Stejně je to i s vlastním voskovým modelem, který je pro každý odlitek nový.

Obalování spočívá v namáčení modelových stromečků do obalové hmoty, posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů [4]. Počet vrstev je obvykle 5 – 15, podle velikosti stromečku. Velké, těžké stromečky budou mít pochopitelně více obalů než stromečky malé a lehké.

Při namáčení se čisté voskové stromečky ponořují do keramické břechky při rovnoměrném otáčení a naklápění, aby došlo k rovnoměrnému nanesení této břechky. Dutiny, žebra, kouty a jiná problematická místa se musí důkladně zkontrolovat, zda v nich nevznikly vzduchové polštáře. Po vyjmutí z břechky se stromeček opět otáčí, aby se obalová hmotu rovnoměrně rozdělila a přebytečná odkapala [4].

Následující operací je posypání, které se provádí pomocí fluidního posypu, nebo pomocí gravitačního posypu. (obr. 9)



obr. 9 Fluidní posyp (vlevo) , gravitační posyp (vpravo)

Po namočení a posypání dochází k tuhnutí obalu. Obaly tuhnou buď jen odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu soli v gel, nebo k této změně dojde působením chemického činidla (urychlení) a odpaření disperzního prostředí následuje později. První metoda je realizována sušením, druhá je základem tzv. rychloprocesů [4].

Při sušení musí každý obal schnout v klimatizovaném prostoru při teplotě 20 až 24 °C při vlhkosti 50 až 70%. Při sušení musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu.

Moderní metody pracují s tzv. chemickým tvrzením obalů (*rychloprocesy*). Jedná se o různé způsoby urychlování gelace. Značného zkrácení gelace je dosahováno použitím alkalicky reagujících látek (nejčastěji čpavku). Posypané obaly se suší krátkou dobu na vzduchu (volně), poté se vystaví krátkou dobu působení plynného čpavku. Následuje odstranění čpavkových par z obalu působením proudu vzduchu, nové namočení, odkapávání, posypání atd. až má skořepina potřebnou tloušťku. Pak se suší dle rozměrů skořepiny 3 až 8 hodin. Nevýhodou vytvrzování obalů čpavkem je toxicita par čpavku [4].

2.1.5 Vytavení vosku ze skořepiny

Po nanesení poslední vrstvy a důkladném usušení se pro vytvoření formy musí vosk vytavit.

Klíčovým bodem v této části procesu je rozdíl mezi menší tepelnou roztažností keramiky a větší tepelnou roztažností vosků. Protože, kdybychom keramickou formu jednoduše vložili do pece za účelem vytavení vosku (bod tavení 60 – 90 °C), tak by došlo k jejímu popraskání v návaznosti na tyto rozdílné tepelné roztažnosti. Ohřev vosku musí být proto rychlý, aby se zamezilo rozměrové dilataci modelu, která by způsobovala praskání skořepin.

Vytavování voskových modelů lze provést několika způsoby [4]:

- V autoklávu.
- Za vysoké teploty – v peci za teploty 900 až 1000 °C tak, že se spojí vytavení vosku s vypálením skořepiny. Ztráty vosku jsou 10 až 15%; vosková směs je částečně znehodnocována.
- Za nízké teploty – vytavování se provádí v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení jako má hmota modelů.
- Dielektrickým ohřevem – skořepiny se zvlhčí vodou a pak se umístí v poli vysokofrekvenčních oscilací. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, jenž zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem.
- Horkým vzduchem – proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku. Ten se protaví dříve než se celý model ohřeje a k odtavování pak dochází z vnitřku.

V současnosti se používá ve většině případů autokláv. Vytavení vosku je realizováno na základě tepelného šoku přehřátou párou v autoklávu (boilerklávu). Zařízení pracuje s tlakem 0,3 – 0,6 MPa při teplotě páry 135 – 165 °C. Skořepina je umístěna vtokem dolů, aby mohl vosk volně vytékat. Vosk se zachycuje a po regeneraci se opět použije pro vytvoření voskových

modelů. Tímto způsobem lze snížit riziko praskání skořepin, pracovat se skořepinou s tenkou stěnou a výhodou je také úspora modelového vosku.

2.1.6 Vypalování skořepiny

Před odléváním je nutno keramickou formu vypálit (žíhat). Důvody pro toto vypalování jsou následující:

- Odstranění zbytků modelových vosků a těkavých látek po vytavování
- Dosažení potřebné pevnosti formy – zhutnění struktury keramiky
- Předehřátí formy před litím

Žihání skořepin je možné provádět v odporových (obr.10) či plamenných pecích. Plamenné pece mají však nevýhodu ve spotřebě kyslíku, který je potřebný k dokonalému vypálení skořepiny. Tuto nevýhodu odstraňují pece odporové, které mají účinnou ventilaci, zdroj volně proudícího vzduchu. Existují dvě základní metody jak skořepinu vypalovat:

- a) Skořepinu vypálíme za vysoké teploty a ihned můžeme odlévat bez chlazení.
- b) Dvojitě vypálení s mezi-ochlazením – skořepinu vypálíme při nižší teplotě, odstraníme tak zbytky vosku, ochladíme a znovu ohřejeme na teplotu vhodnou pro odlévání. U tohoto postupu lze vizuálně zkontrolovat stav vypálených zbytků vosků apod. Je možné také udělat kapilární zkoušku skořepiny ještě před samotným litím, čímž předejdeme případným kolizím při odlévání.



obr. 10 Odporová žihací pec

2.1.7 Odlévání

Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí celé technologie. Zpravidla se odlévá přímo do žhavých skořepin, ihned po vytažení ze žihací pece (obr.11). Zmenší se tak teplotní šok a sníží se tím riziko výskytu vnitřních pnutí a prasklin při lití. Před odlitím lze umístit do vtokové soustavy předehřáté filtry.

Pro přesné lití na vytavitelný model se užívají k roztavení materiálu zejména pece elektrické indukční. Tavení náročných slitin se provádí ve vakuových pecích. Jedná se zejména o vysokolegované slitiny.



obr. 11 Vytahování vypálené skořepiny (vlevo), odlévání (vpravo)

2.1.8 Dokončovací operace

Jedná se o nejpracnější část celé technologie výroby odlitků.

Klasické pořadí dokončovacích operací [4]:

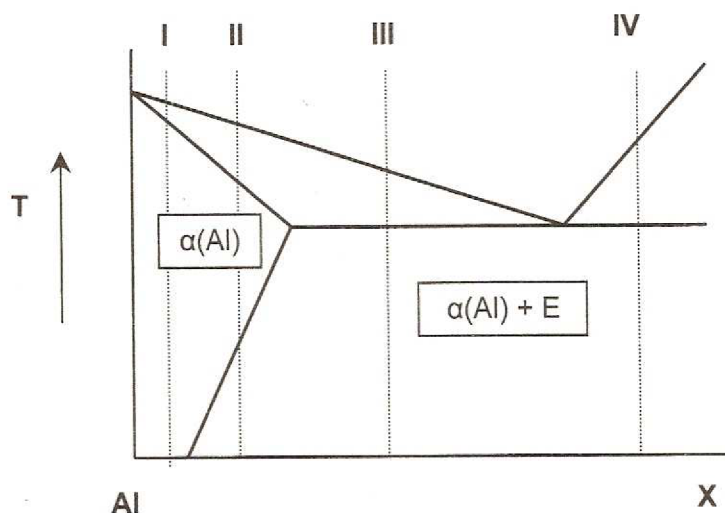
- Odstranění převážné části keramické skořepiny – ve většině případů se jedná o odstranění mechanické, jelikož po odlití má skořepina vysokou tvrdost. Používá se zejména vibrační oklepání, které je však velmi hlučné a navíc velmi prašné. Novým způsobem je tryskání skořepiny vysokotlakým paprskem.
- Odstranění odlitků z vtokové soustavy – odstranění se děje pomocí kotoučových, třecích či pásových pil.
- Odstranění zbylé skořepiny z odlitků – můžeme použít buď chemické nebo abrazivní metody:
 - Chemická metoda – existují dva způsoby:
 - a) Lázeň s rozpuštěnou solí – rozpuštěná sůl je hydroxid sodný s vyrovnávacími aditivy nebo bez nich. Sůl je rozpuštěna ve vaně při teplotě 475 – 600°C. Sůl velmi dobře odstraní zbytky keramiky. Doba ponoření odlitku cca 20minut. Odlitek je poté vyjmut ze solné lázně, opláchnut a ponořen do neutralizační kyseliny k odstranění okují.
 - b) Horká vodní žíravá lázeň – jedná se o lázeň s alkalickým koncentrátem, obvykle hydroxidem draselným. Odlitky jsou ponořovány do roztoku o teplotě cca 800°C po dobu několika hodin. Poté jsou opláchnuty a sušeny.
 - Abrazivní metoda:
 - a) Tlakové tryskání – k odstranění velké části skořepiny slouží vysokotlaký vodní paprsek nebo stlačený vzduch, který dopravuje abrazivo velkou rychlostí na odlitek.
 - b) Tryskání bez použití vzduchu – tyto stroje nepoužívají k dopravě abraziva vzduch ale používají lopatková kola.

- Broušení, dokončování – používá se celá škála brousících přípravků a zařízení (ruční brusky, brusky s výkyvným rámem, zapichovací brusky aj.)

2.2 Slitiny hliníku

2.2.1 Strukturální složky slitin hliníku

Struktura slitin je určena tvarem rovnovážných diagramů hliníku s příslušnými přísadovými prvky (obr.12).



obr. 12 Obecný tvar rovnovážných diagramů hliníku [6]

Ve slitinách hliníku mohou být přítomny tyto strukturální složky:

- **Homogenní tuhý roztok hliníku** – označuje se jako $\alpha(\text{Al})$. Jde o substituční tuhý roztok, v němž atomy přísadového prvku nahrazují v kubické plošně centrované mřížce hliníku jeden nebo více atomů.
- **Eutektikum** – je tvořeno fází $\alpha(\text{Al})$ a čistým přísadovým prvkem, nebo jeho sloučeninou (intermetalickou fází).
- **Primární fáze přísadového prvku** – při vyšším obsahu přísadového prvku, než odpovídá eutektickému složení, začíná tuhnutí s vylučováním primární fáze přísadového prvku. Po dosažení eutektické teploty tuhnutí pokračuje krystalizací eutektika. Tato fáze se vyskytuje pouze u nadeutektických slitin Al-Si.
- **Intermetalická fáze** – Jedná se o chemické sloučeniny, které vznikají z přítomných přísadových a doprovodných prvků, když jejich obsah přesáhne jejich rozpustnost v základním kovu [6].

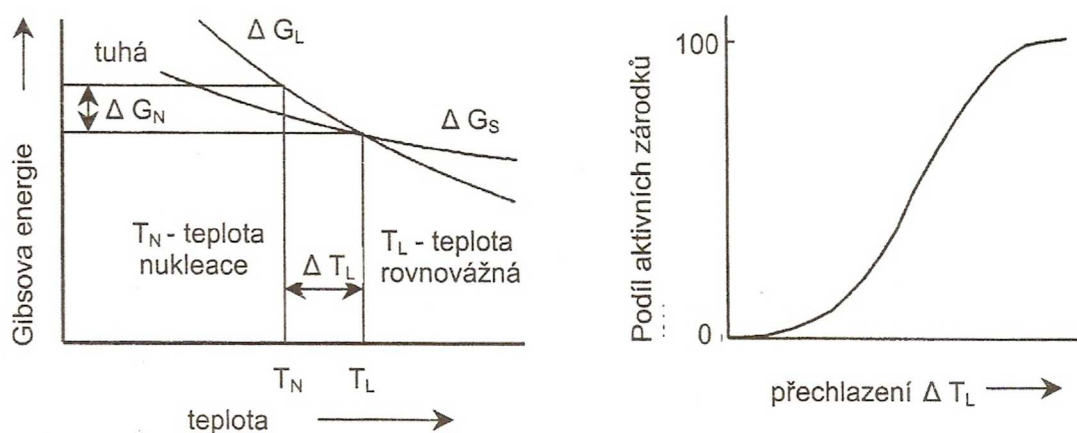
2.2.2 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

Převážná většina slévárenských slitin hliníku má podeutektické složení a jejich krystalizace proto začíná vznikem primární fáze $\alpha(\text{Al})$. Podmínky a průběh vzniku jsou společné pro všechny druhy podeutektických slitin.

Rozdíl mezi skutečnou teplotou kovu a teplotou odpovídající místnímu chemickému složení se nazývá koncentrační (konstituční) přechlazení.

A) Nukleace primární fáze:

V technických slitinách dochází ke krystalizaci této fáze mechanismem heterogenní nukleace na cizích zárodcích. Jako krystalizační zárodky mohou působit zejména spinely, oxidy, jiné částice nebo také stěny formy. Aby mohla částice působit jako zárodek je nutné, aby mezi ní a tuhnoucí fází byla co nejmenší mezifázová energie, tj. aby byl zárodek tuhnoucí fází smáčivý. Dobré smáčivosti je obvykle dosaženo, když jsou obě složky alespoň některými atomovými rovinami krystalograficky podobné. Čím je větší podobnost atomové stavby mezi částicemi, tím efektivněji částice působí jako zárodek, a tím menší aktivační energie je potřeba pro růst zárodku. Aktivační energie ΔG_N pro vznik zárodků je přímo úměrná přechlazení. Čím větší je přechlazení, tím se zvětšuje množství aktivních zárodků (obr.13) [6].

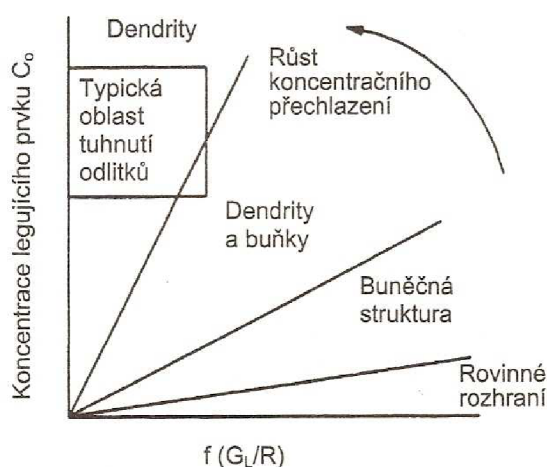


obr. 13 Aktivační energie pro nukleaci aktivních zárodků a vliv přechlazení na jejich počet [6]

Zvýšení počtu vhodných krystalizačních zárodků se docílí rychlým ochlazením nebo očkováním taveniny.

B) Růst primární fáze:

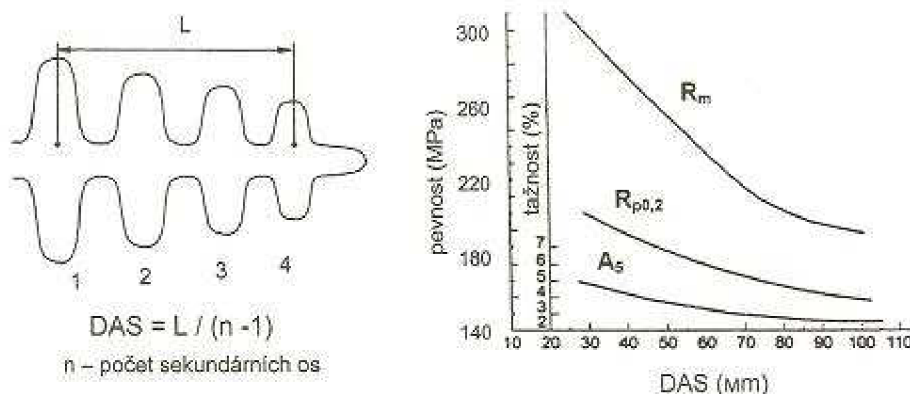
Po nukleaci krystalizačních zárodků dochází k jejich růstu do volné taveniny. Způsob růstu krystalů hliníku je závislý na obsahu přísadového prvku, na vzniku a na velikosti koncentračního přechlazení (obr.14). Tuhnutí odlitků obvykle probíhá v podmínkách, kdy velikost koncentračního přechlazení je poměrně velká. V tomto případě dochází k tuhnutí mechanismem růstu dendritů.



obr. 14 Závislost tuhé fáze a velikosti koncentračního přechlazení [6]

2.2.3 Dendritická struktura

Pro popis dendritické struktury je nejdůležitějším kritériem vzdálenost sekundárních os dendritů, označovaná jako DAS (dendrite arm spacing). Hodnotu DAS zjišťujeme metalograficky na vhodném výbrusu (obr.15) [6].



obr. 15 Metodika měření DAS (vlevo), závislost mechanických vlastností na DAS (vpravo) [6]

Zatímco velikosti primárních zrn $\alpha(\text{Al})$ ve slévárenských slitinách bývají v rozmezí 1 -10mm, hodnoty DAS bývají obvykle v rozmezí 10 – 150 μm . Čím je jemnější struktura (menší hodnota DAS), tím menší jsou segregáční vzdálenosti. Čím menší je hodnota DAS, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti [6].

Hodnota DAS nezávisí na velikosti primárních zrn, nezávisí na stavu krystalizačních zárodků ani na vlivu očkování, nýbrž pouze na rychlosti ochlazování v intervalu tuhnutí – čím kratší doba tuhnutí, tím menší DAS [6].

$$DAS = a \cdot t_f^n$$

a – konstanta, závislá na slitině

n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí 0,3-0,5

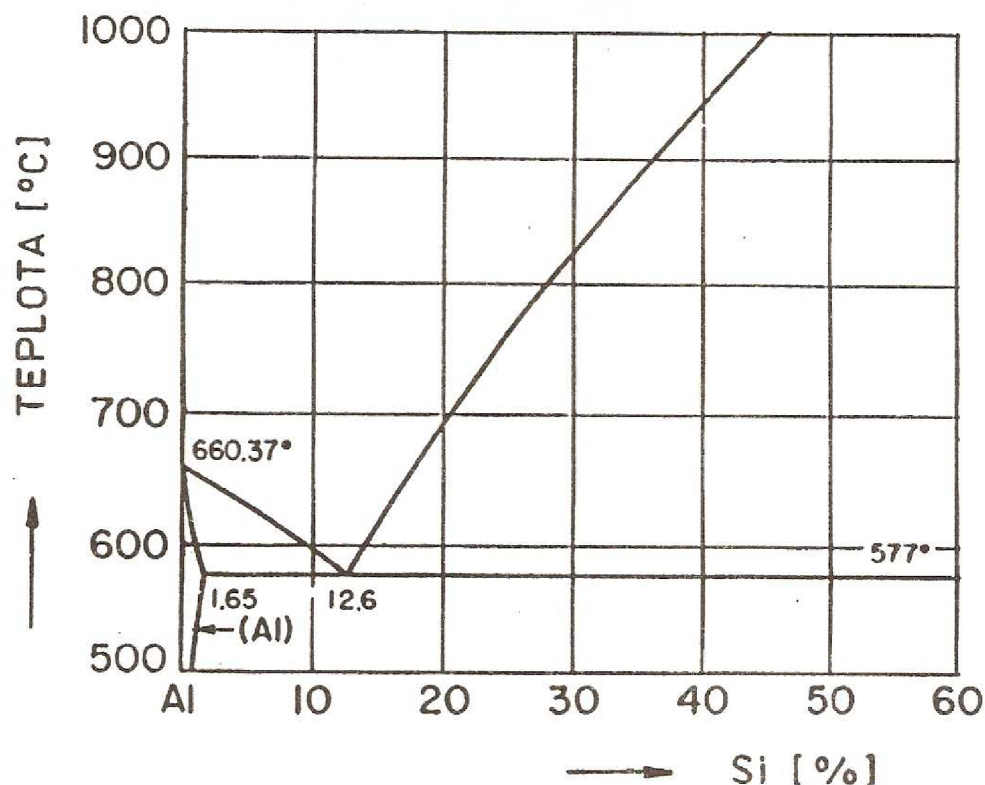
t_f – místní doba tuhnutí

Místní doba tuhnutí je definována jako čas, v němž teplota v daném místě klesne z teploty likvidu na teplotu solidu.

2.2.4 Slitiny Al-Si

Tato práce se bude zabývat výhradně neželeznými kovy, konkrétně slitinami Al-Si. Slitiny Al-Si, běžně nazývané jako siluminy, jsou nejdůležitějším typem slitin hliníku a představují drtivou většinu produkce hliníkových odlitků.[6]

Eutektická koncentrace křemíku je 12,5%Si a eutektická teplota má hodnotu 577 $^{\circ}\text{C}$ (obr. 16).



obr. 16 Rovnovážný diagram Al-Si [6]

Podle obsahu křemíku se siluminy dělí na:

- **Podeutektické** – struktura je tvořena sítí primárních dendritů fáze $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem Si roste i obsah eutektika. Podeutektické siluminy mají obsah vždy více jak 5%Si, obvykle 7 – 11%Si.
- **Eutektické** – struktura je tvořena výhradně eutektikem, někdy (u modifikovaných slitin) se mohou vyskytnout i jednotlivé krystaly fáze $\alpha(\text{Al})$. Obsah Si se pohybuje okolo eutektického bodu, tj. 11,5 – 13%Si.
- **Nadeutektické** – struktura je tvořena částicemi primárního křemíku uložených v eutektické matrici. Obvykle nadeutektické siluminy obsahují 14 – 17 %Si, výjimečně až 25%Si [6].

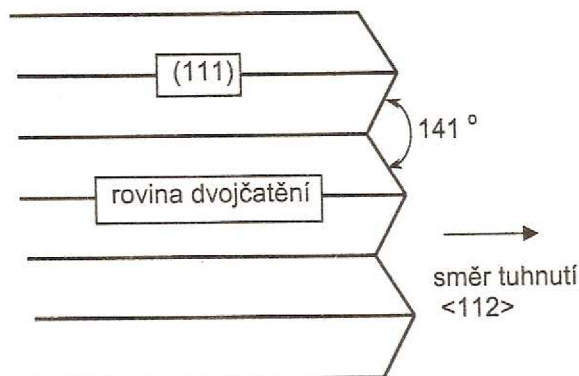
2.2.5 Morfologie eutektika slitin Al-Si

Křemík se prakticky ve slitinách Al-Si vylučuje jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Velikost částí eutektického křemíku bývá 1 μm – 2mm. Druh eutektika souvisí s mechanismem krystalizace eutektického křemíku [6].

V eutektiku se křemík vylučuje ve třech různých podobách:

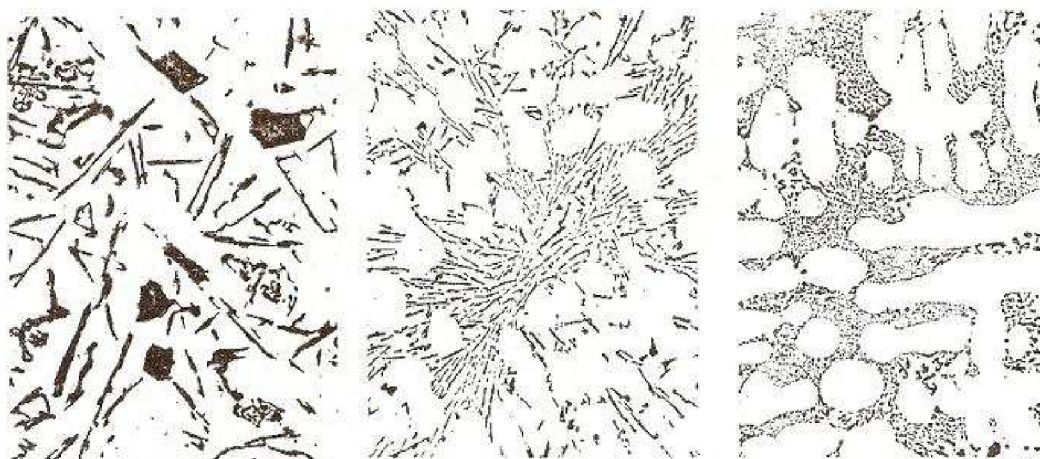
- **Zrnité eutektikum** – vzniká při obsahu P nad 5-10ppm tvorbou krystalizačních zárodků AIP. Eutektický křemík je vyloučen ve tvaru polyedrických zrn či hrubých lamel (obr.18). Částice vyrůstající

z jednoho zárodku tvoří eutektické zrnó. Růst zrna se uskutečňuje především v krystalografickém směru $\langle 112 \rangle$. V krystalu snadno dochází k dvojčatění podle roviny (111) pod úhlem 141° (obr.17). Krystalizace dendritů křemíku se zpožďuje za křemíkem, obě fáze rostou relativně nezávisle na sobě. Krystalizace zrnitého eutektika je energeticky málo náročná a dochází k ní při poměrně malém přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou asi 1-2K.



obr. 17 Růst zrnitého křemíku [6]

- **Lamelární eutektikum** - Je typem eutektika, které vzniká v čistých slitinách s velmi nízkým obsahem sodíku a obsahem fosforu pod 1-2ppm. Mechanismus vzniku je podobný jako u zrnitého eutektika. Podmínky nukleace jsou však méně příznivé (menší obsah fosforu = menší počet zárodků), proto krystalizuje lamelární eutektikum při větším přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou (2-5K). Křemík tvoří jemné lamely, které jsou uspořádané vedle sebe paralelně (obr.18). Lamelární eutektikum se vyskytuje také u slitin modifikovaných např. arsenem, antimonem, kadmíem či selenem.
- **Modifikované eutektikum** – Vzniká za přítomnosti modifikačních prvků, jako jsou sodík a stroncium. Sodík má největší modifikační účinek. Atomy modifikačního prvku blokují růstové stupně na rozhraní krystalů křemíku a taveniny a tím podporují dvojčatění útvarů křemíku. Částice křemíku jsou krystalicky nedokonalé a každá krystalická vada je potenciálním místem pro další větvení. Částice křemíku mají tvar jemných vláken, na metalografickém výbrusu mají tvar teček (obr.18) [6].



zrnité

lamelární

modifikované

obr. 18 Struktura různých druhů eutektika Al-Si slitin [6]

2.2.6 Modifikace slitin Al-Si

Pro modifikaci eutektika slitin Al-Si se používá v praxi výhradně modifikace stronciem a sodíkem. Modifikace slouží ke zvýšení pevnostních vlastností, plastických vlastností, tažnosti a houževnatosti (zvýšení až o 6%).

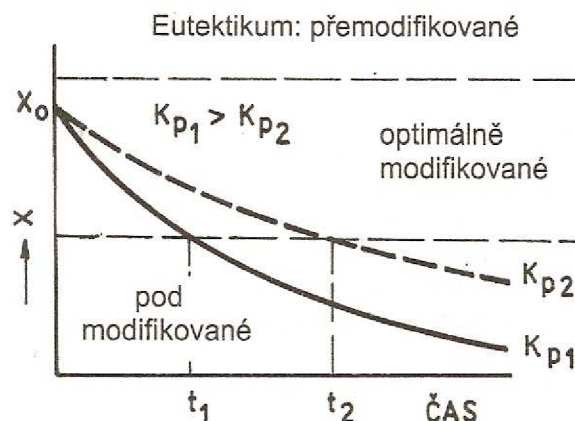
a) Modifikace sodíkem

Sodík je nejsilnějším modifikačním prvkem. Modifikační účinek působí spolehlivě i při pomalém ochlazování. Pro získání plně modifikované struktury musí slitina obsahovat přibližně 50-100ppm sodíku [6].

Jako modifikační prostředky se používají:

- Kovový sodík – jelikož má vysokou reaktivnost, aplikuje se výhradně ve vakuových patronách. Výhodou je rychlé roztavení patron a chemicky nevnáší do taveniny žádné cizí prvky. Dávkování sodíku je obvykle 0,05-0,1%Na.
- Modifikační soli – tyto soli jsou kombinací chloridů a fluoridů (typicky NaCl+KCl+NaF – tzv.sůl T3), které jsou v práškové podobě, nebo jako tablety. Tableta nebo sůl se ponoří zvonem na dno lázně, poté se lázeň zamíchá (produkty reakce vyplavou na hladinu, pečlivě se stáhnou) a po 5-10minutách je tavenina připravena k lití. Dávkování je cca 0,8 – 1% na hmotnost taveniny.
- Exotermické modifikační tablety – u této metody hoří skelet tablety a do taveniny se postupně uvolňuje určitá část (max. 30%) potřebného sodíku ve formě par.

Po ukončení modifikační reakce se sodík vypařuje z hladiny taveniny a jeho obsah v lázni se postupně snižuje. To je příčinou slábnutí modifikačního účinku až jeho zániku. Tomuto jevu se říká odeznívání očkovacího účinku (obr.19). Při modifikaci sodíkem lze obvykle počítat s dobou modifikačního účinku 15 – 20 minut [6].



obr. 19 Odeznívání očkovacího účinku [6]

b) Modifikace stronciem

Stroncium je mnohem méně reaktivní než sodík, ale dává vysoké a stabilní využití. Používá se jako předslitina s hliníkem, s obsahem 3,5 - 10% Sr. Předslitinu tvoří čistý hliník a intermetalická fáze Al_4Sr . Také se používá předslitina Al_2Sr_2Si , která se však rozpouští poloviční rychlostí.

Předslitiny se obvykle dodávají jako tyče o průměru 10mm a délce 0,5m. Dávkování se provádí na základě výpočtu počtu tyčí na hmotnost taveniny. Tyče se ponoří do pohyblivé taveniny, což je z hlediska náběhu modifikačního účinku výhodnější, než kdyby byla tavenina v klidu.

Pro dosažení dobrého modifikačního účinku je nutno dávkovat obvykle u podeutektických slitin 150 – 220 ppm Sr, u eutektických slitin až 400ppm Sr, z důvodu nižšího účinku stroncia.

Odeznívání stroncia je velmi pozvolné (3 – 6 hodin). Ztráty stroncia se dějí zejména oxidací. Vypařováním jsou ztráty velmi malé.

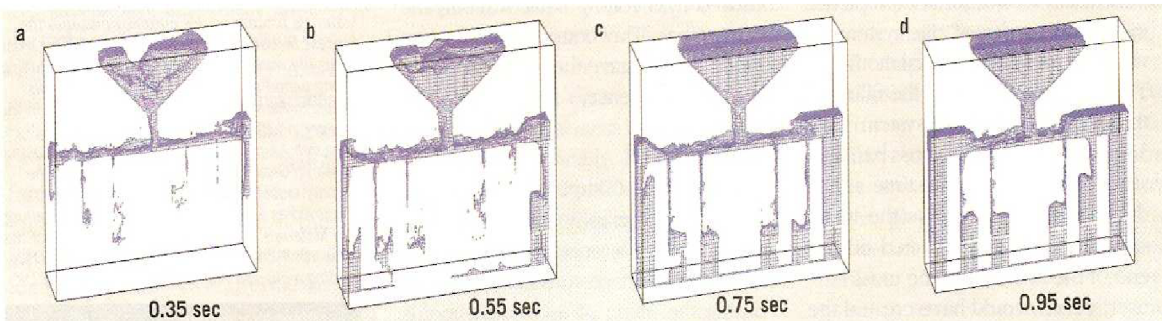
2.3 Způsoby plnění formy

Navzdory silné poptávce po přesných odlitcích má uživatel pochybnosti o spolehlivosti některých odlitků. Při volbě vtokové soustavy pro přesné lití se běžně ignorují některé faktory jako je usnadnění výroby, cena čištění odlitků, kvalita a spolehlivost. Toto může vzniknout, protože informace o účinku jiného tvaru vtokové soustavy chybí [7]. Proto jako informační podklad pro tuto práci slouží experiment uskutečněný v roce 2002 na univerzitě v Birminghamu ve Velké Británii. Experiment zahrnoval odlití zkušebních tyčí pro ohybovou zkoušku pomocí spodního plnění formy. Rozptyly mezních napětí těchto tyčí byly analyzovány Weibullovým statistickým systémem, který byl ustanoven jako platný způsob, hodnotící účinek turbulentního proudění a následného vyplouvání oxidických povlaků na kvalitu odlitku [7].

2.3.1 Horní plnění formy

Ačkoliv je horní plnění neekonomičtější způsob, je tento způsob nejvzdálenější od ideálního stavu. Během plnění procesu nelze kov uvnitř vtokové soustavy významně kontrolovat. Proudová charakteristika zahrnuje

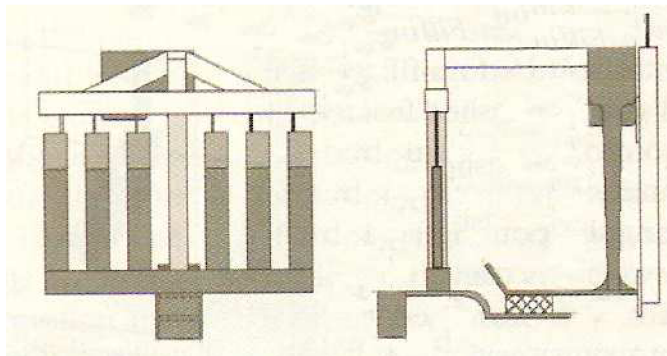
pokles tvarování, odrazy vln mimo stěny formy a klouzání proudů [7]. Pro horní plnění formy je typické valení zpětné vlny na vrcholu struskováku, nepravidelný roztrhik kovu, nerovnoměrné plnění kovem (obr.20). Proto se snažíme najít nový způsob, aby k tomuto nedocházelo.



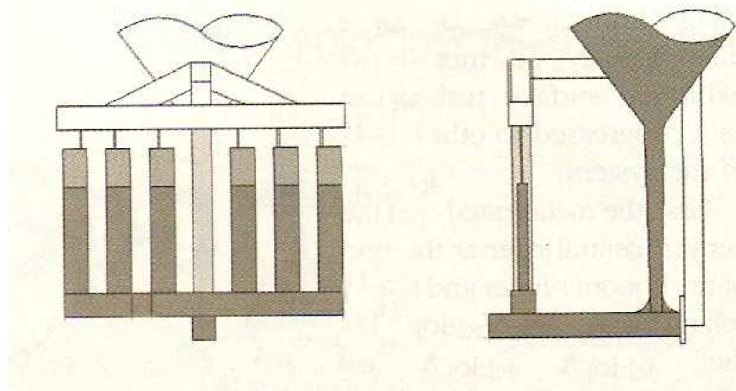
obr. 20 Horní plnění formy, zpětná vlna, nerovnoměrné dosazování tekutého kovu [7]

2.3.2 Spodní plnění formy

Pro lití spodem rozlišujeme plnění řízené a neřízené. Řízený systém plnění je založen na širokém struskováku a filtru (obr.21). Jako neřízený systém se bere struskovák o jiných rozměrech a vtoková soustava bez filtru (obr.22). Cílem zavedení struskováku je vnesení minimální turbulence do dutiny formy. To znamená, že kov musí zůstat v kontaktu se stěnami formy, aby se zabránilo volným hladinám tvořených kovem. V této situaci proud kovu uvnitř tvoří oxidický film na vnějším kontaktu s povrchem formy [7].



obr. 21 Řízený systém plnění [7]



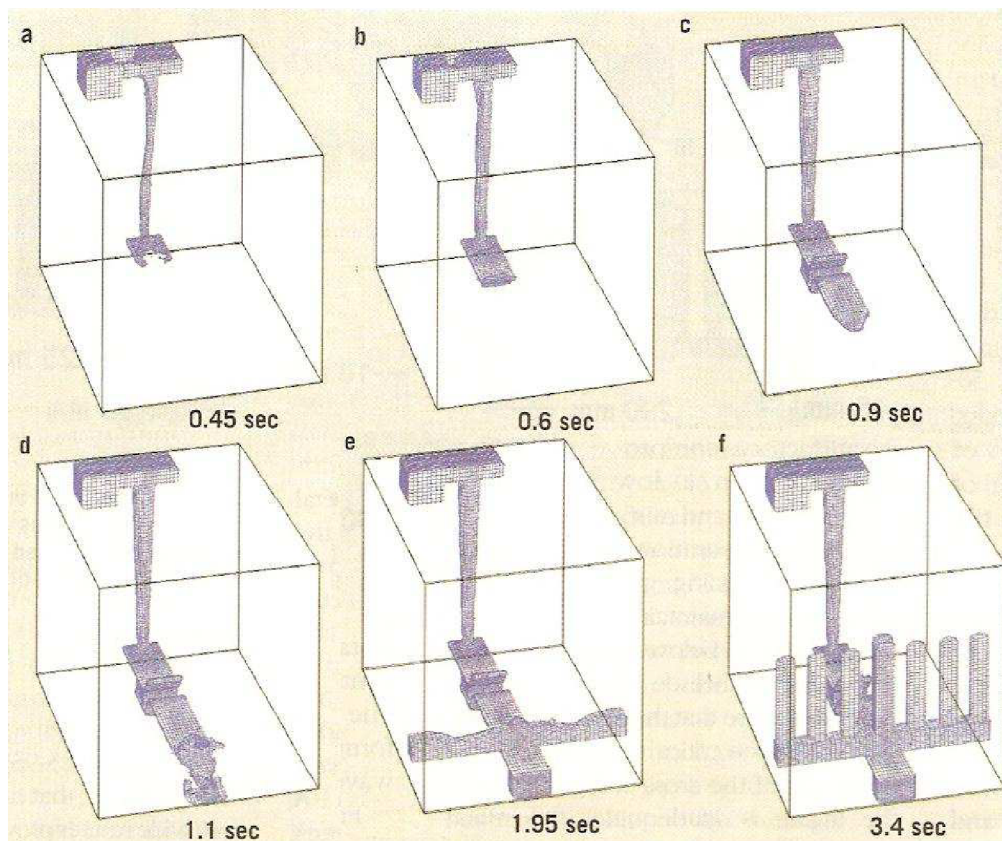
obr. 22 Neřízený systém plnění [7]

U obou případů byl na struskovák napojen křížmo další kanál (rozdávěcí), který dosazuje kov do forem zkušebních tyčí. Křížný kanál slouží při plnění jako náliček a prostřední tyč mezi zkušebními tělesy k udržení metalostatického tlaku.

Nejvíce ničivá povrchová turbulence nastává na začátku plnění, kdy rychlost kovu je nejvyšší a vtoková soustava není zaplněna. Charakteristickým rysem je valící se zpětná vlna, kdy počáteční proud kovu běží podél spodní části struskováku, odráží se zpět od vzdáleného konce a valí se zpět přes vršek přicházejícího kovu. K zabránění vytvoření zpětné vlny by se měla snížit tloušťka struskováku, aby kov protekl podél struskováku. Při konstruování vtokové soustavy, pro udržení přijatelné hodnoty rychlosti kovu (pod 0,5m/s), je důležité zahrnout velké přídavky, které zajistí, že průměrná hodnota je pod kritickou rychlostí v zářezu (0,5m/s). Je-li plocha zářezu špatná, rychlost kovu bude přehnaná. Dokonce, i když je plocha zářezu správná, rychlost kovu ještě nemusí být přijatelná. Závisí to na usměrněném proudění vytvořeném struskovákem [7].

2.3.3 Srovnání horního a spodního plnění formy

Jak bylo uvedeno výše, horní plnění má několik negativních vlastností. Tyto vlastnosti spodní plnění v určitých mezích odstraňuje. Forma se spodním plněním bez filtru reprezentuje střední případ, ve kterém byly zkušební tyče naplněny klidněji než tyče plněné horním plněním. Relativně jednoduché neřízené spodní plnění je tedy určeno pro snadné použití ve slévárnách pro jeho levnost a zvýšení kvality [7].



obr. 23 Řízené plnění formy [7]

Jako lepší varianta spodního plnění se jeví řízené plnění. Licí kanál je rychle zaplněn, ale je tam patrné mírné oddělení proudu kovu v licím kanálu v prvním stupni plnění. Ten zmizí pokud použijeme při plnění filtr. Tok po filtrování se zdá být řízený, je klidný a zkušební tyč je naplněna rovnoměrně. Odlučovač strusky na konci struskováku je používán pro sběr prvního kovu, který by poškodil a ochladil vstup formy. Tato nádrž může být užitečná pro redukci povrchové "neukázněnosti" ve zbytku systému snížením tlaku v kritických momentech. Spodní část rozváděcího kanálu se začíná plnit ve stejné době jako odlučovač strusky. To zabraňuje proudu kovu odrazit se mimo konec struskováku, který by vytvořil tryskání kovu (obr.23).

2.4 Využití simulačního softwaru ve slévárenství

Numerická simulace procesů lití železných i neželezných kovů se stala průmyslovým standardem. Žádná slévárna, která vyrábí vysoce jakostní odlitky, dnes nemůže považovat počítačovou simulaci za zbytečnou. Dnešní dynamický svět vyžaduje rychlou odezvu na požadavky odběratelů a přesný a správný odhad nákladů je základem prosperity slévárny. Simulace může být důležitým faktorem při rozhodování o zadání zakázky. S rychlým vývojem CAD systémů se modelování geometricky složitých dílů stalo velmi jednoduchým a dostupným. Znamená to, že modelování nezabere o moc více času než tvorba výkresové dokumentace – ale přinese mnohem větší užitek v podobě dalších aplikací. Také simulace je aplikací 3D modelování. Odhadem 90 % vad je způsobeno konstrukční chybou a pouhých 10 % je způsobeno problémy ve výrobě. Tedy použití všech metod a nástrojů, které zajistí úspěšný konstrukční a technologický návrh, významně přispěje ke snížení výrobních nákladů. Výpočtová simulace procesu lití je jedním z těchto nástrojů [8].

Programy jsou založeny na aplikaci zákonitostí sdílení tepla (Newtonův a Fourierův zákon), rozpracovávají Fourierovu diferenciální rovnici vedení tepla, zahrnují rovnici kontinuity a Navier-Stokesův zákon. Využívají nejčastěji metodu konečných prvků (FEM – Finite Elements Methode), nebo metodu konečných diferencí (FDM – Finite Differences Method). Každá z metod má své přednosti a nedostatky. Metoda konečných diferencí je jednoduchá a dosti univerzální. Metoda konečných prvků dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti, tj. např. při simulačních výpočtech složitých tenkostěnných odlitků, kdy hustota sítě prvků se přizpůsobuje tvaru odlitku, čímž přispívá k vyšší přesnosti výsledků simulovaného děje [9].

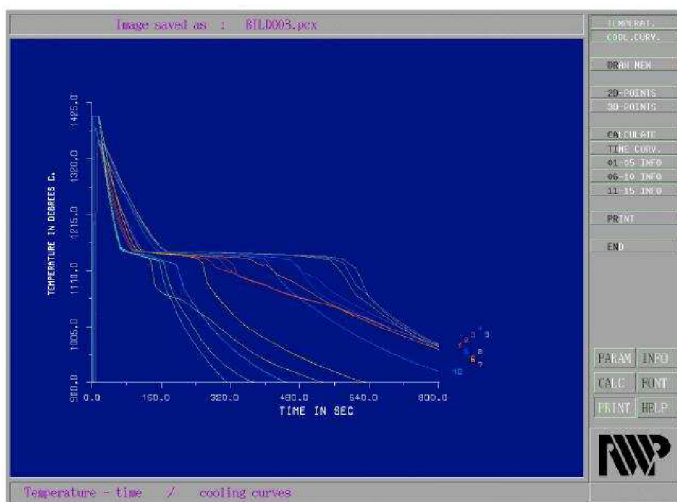
2.4.1 Struktura simulačních programů

Struktura jednotlivých simulačních programů je podobná, v podstatě jde o uspořádání modulů tak, aby mohl proběhnout potřebný simulační výpočet. První modul je určen k vytvoření nebo načtení geometrie tzv. **preprocessing**. Hlavní výpočtový modul, který provádí vlastní simulační výpočet, se označuje **mainprocessing** a na něj je vázán modul zvaný **postprocessing**, který zobrazuje výsledky simulačního výpočtu. Nejdříve je nutno vytvořit model sledovaného objektu, tj. odlitku. Vytváření modelů je časově náročné, především prostorových (3D), popř. plošných (2D). Geometrie odlitku se

zpravidla načítá z interního nebo externího CAD systému, tzv. CAD modeláře. CAD (Computer Aided Design – počítačová podpora konstruování) umožňuje nahradit rutinní práci konstruktéra moderními přístupy při tvorbě geometrie objektů i dalších technologických parametrů [9].

2.4.2 Výsledky simulací

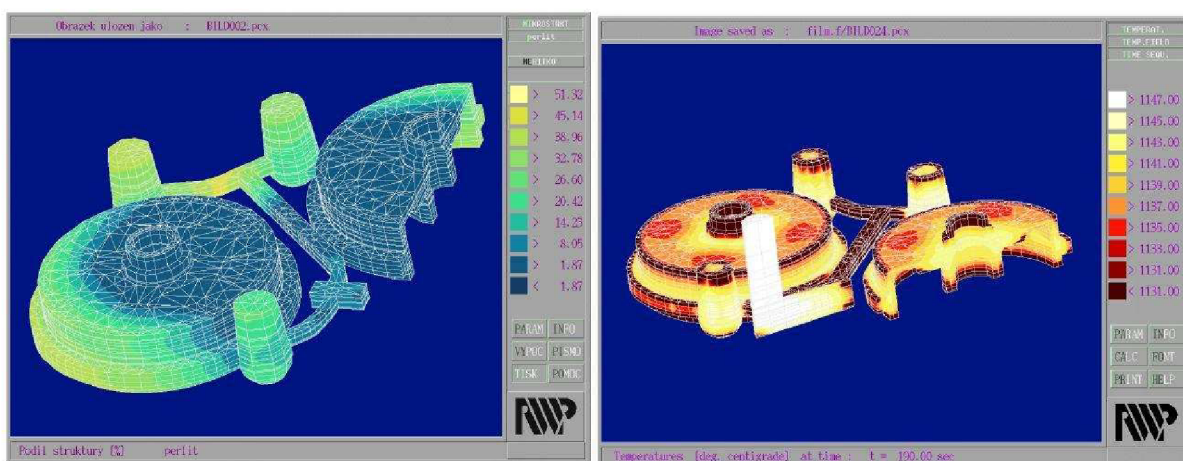
Hlavní krok simulačního výpočtu též záleží na konkrétním softwaru. Jsou programy, které zahrnují simulaci lití, tuhnutí a chladnutí odlitků, simulaci struktury i zbytkových pnutí, nejčastěji v souhrnném balíku simulačních modulů, anebo jsou programy uspořádány v jednotlivých modulech specifického použití, jako je program pro vysokotlaké nebo nízkotlaké lití apod. Zobrazení výsledků je závislé opět na konkrétním výpočtovém programu. Výsledky se zobrazují barevně dle potřeby, nejčastěji ve 3D, pokud se jedná o prostorové rozložení sledovaných veličin. Lze zobrazit izotermy, křivky minimálních a maximálních teplot,



zbytková pnutí atd. [9] (obr.24, 25, 26) **obr. 24 Křivky tuhnutí [9]**



obr. 25 Geometrie, síť CAD a rozmístění součástí ve formě včetně umístění vtokové soustavy bez licí jamky [9]



obr. 26 Podíl strukturních složek (vlevo), rozložení teplot (vpravo) [9]

Ačkoliv vlastní zkušenosti technologa jsou nezastupitelné, simulační software může být v jeho rukou mocným nástrojem, který mu umožní celý proces optimalizovat, zvýšit využití kovu, snížit procento zmetků, a tím zefektivnit výrobu. Navíc simulace technologa vzdělává a učí ho chápat souvislosti procesu, a tím mu dále napomáhá v jeho odborném růstu [8].

2.5 Strukturní analýza vzorků

Pro hodnocení struktury vzorků ze slitin Al-Si využíváme obrazovou analýzu po metalografickém výbrusu. U těchto slitin se vyhodnocuje velikost DAS (dendrit arm spacing) a pórovitost vzorků.




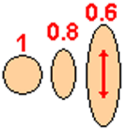
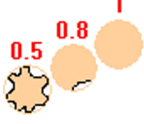
2.5.1 Měření DAS

Hodnota vzdálenosti sekundárních os dendritů označována jako DAS [μm] má významný vliv na budoucí mechanické vlastnosti odlitků. Čím menší je vzdálenost mezi dendritickými osami, tím jemnější bude mikrostruktura a tím se dají očekávat lepší mechanické vlastnosti. Největší vliv na hodnotu DAS má rychlost ochlazování odlitku. Metodika měření DAS je popsána již v kapitole 2.2.3 *Dendritická struktura (obr.15)*.

2.5.2 Měření pórovitosti

Pro hodnocení pórovitosti u slitin Al – Si nehodnotíme procentuální pórovitost celého vzorku, ale pouze velikost a tvary jednotlivých pórů na pořizovaných snímcích (tab.1). Velikost a tvar souvisí s mechanickými vlastnostmi. Charakteristickými veličinami jsou:

- maximální rozměr póru – jde o největší rozměr póru na snímku
- střední rozměr póru – jedná se o průměrnou hodnotu mezi maximálním a minimálním rozměrem póru
- minimální rozměr póru – jde o nejmenší rozměr póru na snímku
- tvárový faktor – čím je hodnota tvarového faktoru blíže 1 (tvar koule), tím menší je vrubový účinek póru.
- ovalita – čím je hodnota blíže 1, tím má pór tvar blížící se tvaru koule

Max. rozměr póru:		Největší rozměr póru
Střední rozměr póru:		Jedná se o průměr maximálního a minimálního póru
Min. rozměr póru:		Nejmenší rozměr póru
Ovalita:		Ovalita (kulatost) póru
Tvarový faktor:		Čím blíže je tvar póru podobný tvaru koule (kof. 1), tím méně vrubových účinků můžeme očekávat

tab. 1 Charakteristiky měřené při vyhodnocení pórovitosti

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíl praktické části

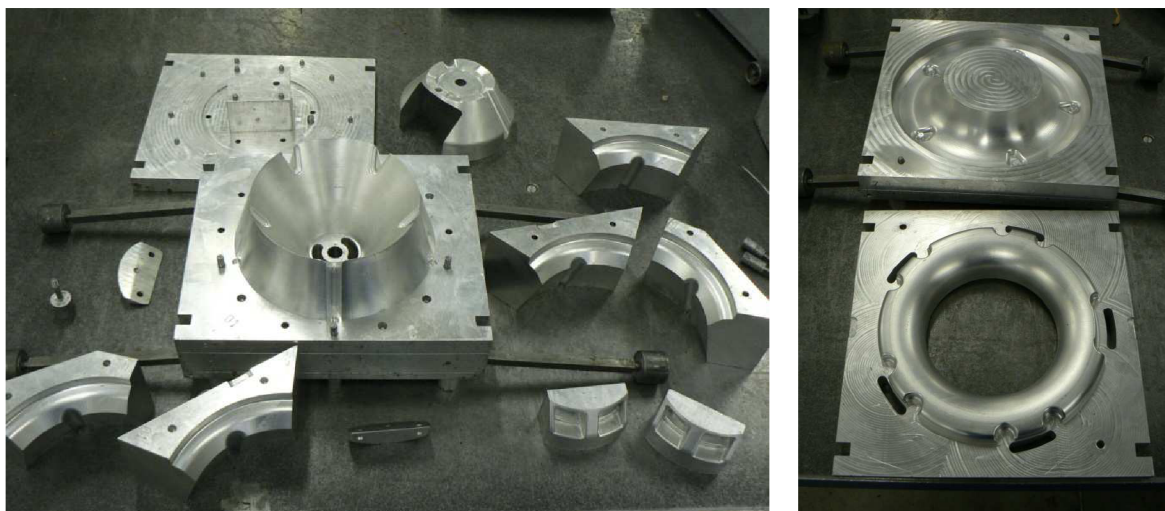
Hlavním cílem praktické části je porovnání a zhodnocení způsobů plnění keramické formy a to pomocí hodnot DAS a hodnot pórovitosti vyrobených odlitků. Při výrobě využít výsledků počítačové simulace jednoho ze způsobů lití a uskutečnit následná opatření při odlévání, která zabrání či omezí vzniku vad, jež simulace odhalí.

3.2 Postup zhotovení zkoumaného odlitku

3.2.1 Výroba voskového modelu

a) Matečná forma

Pro výrobu voskového modelu bylo potřeba použít v tomto případě dvě matečné formy, z nichž byly vyjmuty dva voskové kusy, které byly poté spojeny v jeden voskový model. Pro potřeby tohoto experimentu byly použity matečné formy ve firmě ALUCAST s.r.o. Tyto matečné formy jsou vyrobeny obráběním z hliníku. První forma se skládá cca z 15kusů a druhá forma sestává ze 2 částí (obr.27).



obr. 27 Matečná forma „X“ (vlevo), matečná forma „Y“ (vpravo)

Obě formy musí být před naplněním důkladně pročištěny a řádně namazány, aby se předešlo možným defektům a vadám na voskových modelech.

Díky složitosti kusu „X“ musí být dovnitř matečné formy vloženo pomocné voskové jádro (obr.28), které se po vyjmutí voskového modelu rozpustí pomocí roztoku kyseliny citrónové.



obr. 28 Voskové jádro (vlevo) a jeho umístění ve formě (vpravo)

b) Naplnění formy a vyjmutí voskového modelu

Plnění formy se provádí pomocí plničky vosku (obr.29). Vosk má teplotu okolo 55°C a plní se pod tlakem 0,15 – 0,2 MPa. Vyjmutí musí být díky složitosti tvaru velmi opatrné a nesmí dojít k jakémukoliv porušení modelu.



obr. 29 Plnička vosku (vlevo), naplněná matečná forma „X“ (vpravo)

Doba chladnutí vosku ve formě je u modelu „X“ cca 40 min. a u modelu „Y“ cca 25 min. Po vyjmutí obou částí je nedílnou součástí dokončovací operace výroby voskových modelů. Ta spočívá v odstranění přebytečných vtoků a kontrole, zda je celý model bez výrazných vad či jiných defektů.

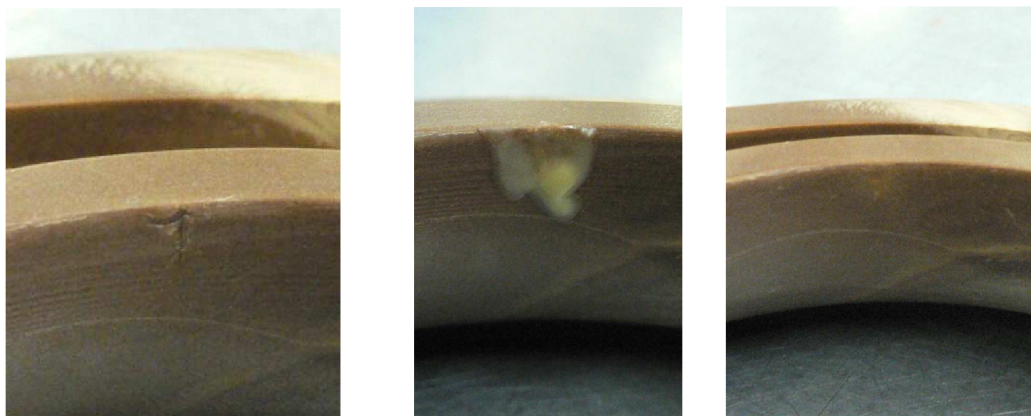


obr. 30 Vyjmutý voskový model „X“ (vlevo), vyjmutý voskový model „Y“ (vpravo)

Pokud je nějaká drobná vada nalezena, pomocí různých praktických nástrojů (obr.31) se provede její odstranění (obr.32).



obr. 31 Praktické pomůcky pro odstranění vad voskového modelu



obr. 32 Postup odstranění drobné vady voskového modelu

Odstranění vady spočívá v nanesení tekutého opravného vosku, jeho následné ztuhnutí a odstranění přebytečného vosku z okolí vady. Tento postup se dělá u každého kusu („X“ i „Y“) a poté se provede jejich spojení.

c) Kompletace voskového modelu

Spojení se provádí místním natavením styčných ploch jednotlivých modelů, přiložením a ztuhnutím. Jelikož při spojování vznikají určité spáry mezi modely, je nutné po jejich spojení opět provést kontrolu kritických míst a opravení.



obr. 33 Hotový voskový model (bez vtokové soustavy)

d) Vtoková soustava

Pro experiment jsou použity dva typy vtokových soustav. Variantou „a“ je vtoková soustava pro horní plnění (obr.34). Sestavení vtokové soustavy musí být, stejně jako vytvoření voskového modelu, věnována velká pozornost. Proto je sestavování vtokové soustavy přenecháno kvalifikovaným pracovníkům firmy ALUCAST s.r.o.



obr. 34 Sestavení vtokové soustavy „a“

Variantou „b“ je vtoková soustava pro spodní plnění. Pro tuto vtokovou soustavu bylo nutné vytvořit speciální kanál, který by nasměroval tekutý kov do spodní části (obr.35).



obr. 35 Speciální kanál (vlevo), sestavení vtokové soustavy „b“ (vpravo)



obr. 36 Hotová vtoková soustava „a“ (vlevo) i „b“ (vpravo)

3.2.2 Výroba keramické skořepiny

Další operací je obalování stromečků jednotlivými vrstvami keramické břechky. Celkový počet obalů je v tomto případě 5. Na první dva obaly je kladen největší důraz z hlediska kvality povrchu odlitku. Třetí až pátý obal slouží zejména jako zpevnění pro další operace.

a) Namáčení a posyp stromečku

Při vytváření prvního obalu jsou namáčeny stromečky do břechky o hustotě 20 ± 3 vteřiny. Hustota břechky je měřena pomocí Fordova kelímku (obr.37). Mírou hustoty je čas, za který břechka z kelímku vyteče. Břechku pro první obal tvoří pojivo PRIMCOTE PLUS a moučka MOLOCHIT 200 se zrnitostí 0 - 0,075 mm. Na druhý obal je použita břechka o hustotě 8 ± 1 vteřina. Je tvořena opět pojivem PRIMCOTE PLUS a moučkou MOLOCHIT 200 se zrnitostí 0 - 0,075mm.

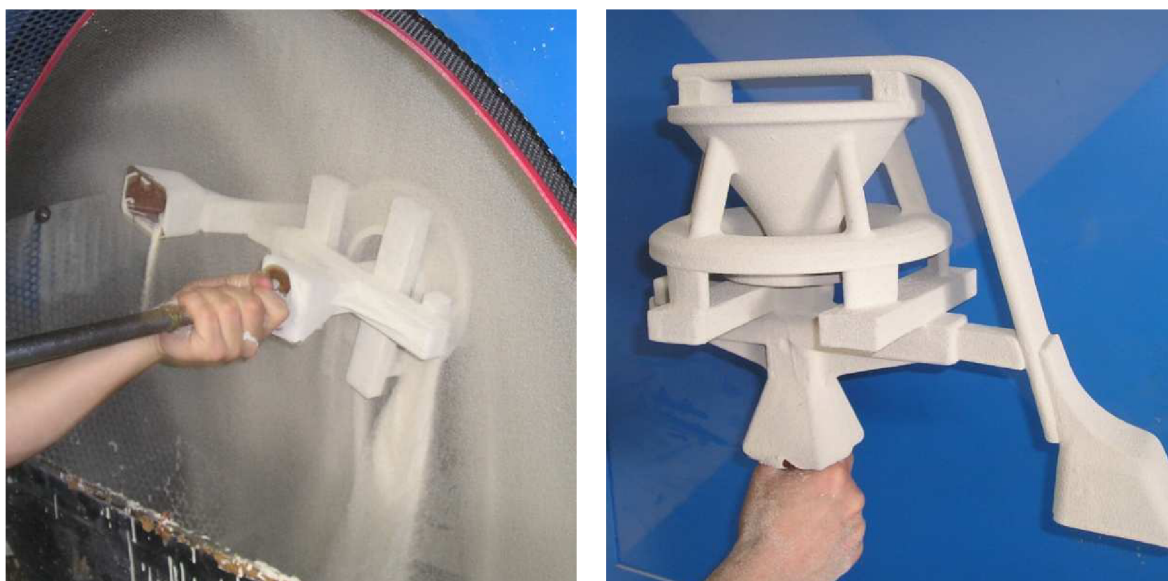
Postup namáčení je znázorněn na obr.38. Snahou je namočit celý stromeček včetně vtokové soustavy. V kritických místech, jako jsou ostré rohy, kde by mohly vznikat např. vzduchové kapsy, je nutné ofouknout stromeček tlakovým vzduchem. Dále je nutné stromeček pokrýt vrstvou břechky rovnoměrně ze všech stran, čehož je docíleno nakláněním a otáčením celého stromečku. S tím souvisí i dokonalé okapání.



obr. 37 Fordův kelímek



obr. 38 Namáčení (vlevo), okapání (vpravo)



obr. 39 Gravitační posyp stromečku (vlevo), hotový první obal (vpravo)

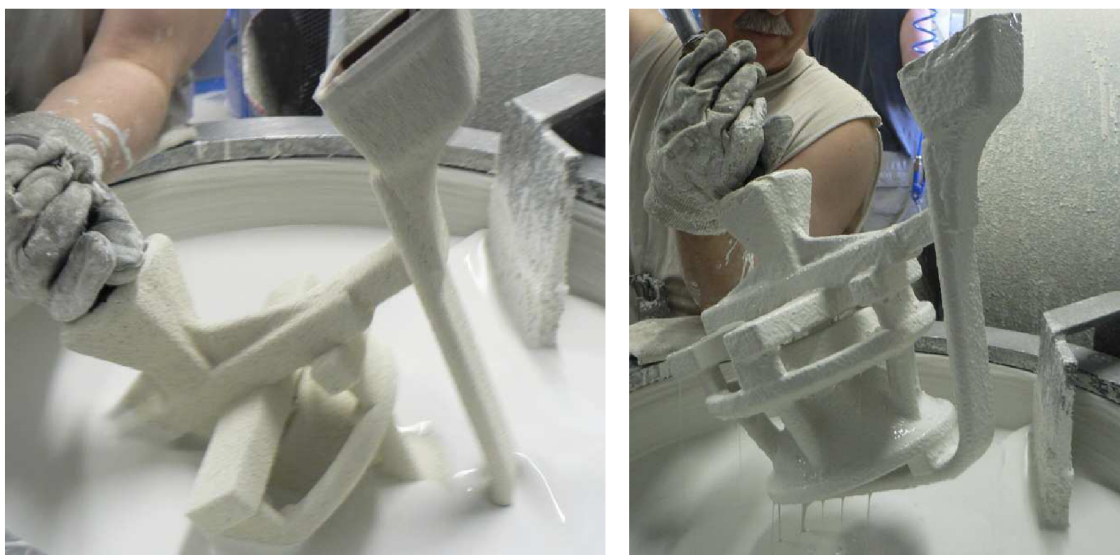
Posyp je prováděn jako gravitační posyp (obr. 39). Pro první a druhý obal je použit MOLOCHIT se zrnitostí 0,18 – 0,3mm.

Pro třetí obal je použita hustota břechky 8 ± 1 vteřina, která je tvořena materiálem CUSTOMCOTE a MOLOCHIT DC. Posypovým materiálem je materiál MONOFRAX se zrnitostí 0,18 – 0,5mm.

Pro čtvrtý a pátý obal je břecha tvořena opět materiálem CUSTOMCOTE a MOLOCHIT DC, ale hustota je tentokrát 15 ± 1 vteřina. Posyp je materiál LUPEK se zrnitostí 0,5 – 1mm. Pro přehlednost jsou všechny hustoty, materiály a zrnitosti pro obalování uvedeny v tab. 2. Postup obalování čtvrtého a pátého obalu je znázorněn na obr. 40, 41.

	1.obal	2.obal	3.obal	4.obal	5.obal
<i>pojivo</i>	PRIMCOTE PLUS	PRIMCOTE PLUS	CUSTOMCOTE	CUSTOMCOTE	CUSTOMCOTE
<i>moučka</i>	MOLOCHIT 200	MOLOCHIT 200	MOLOCHIT DC	MOLOCHIT DC	MOLOCHIT DC
<i>hustota</i>	20±3 vteřiny	8±1 vteřina	8±1 vteřina	15±1 vteřiny	15±1 vteřiny
<i>posyp</i>	MOLOCHIT	MOLOCHIT	MONOFRAX	LUPEK	LUPEK
<i>zrnitost</i>	0,18 - 0,3	0,18 - 0,3	0,18 - 0,5	0,5 - 1	0,5 - 1

tab. 2 Přehled břechek, hustot, zrnitostí, posypů



obr. 40 Namáčení stromečku (vlevo), okapání (vpravo)



obr. 41 Posyp stromečku (vlevo), hotový čtvrtý obal (vpravo)

b) Sušení obalů

Dalším důležitým aspektem při výrobě keramické skořepiny je sušení jednotlivých obalů. Dobu sušení obalů popisuje tab. 3

	1.obal	2.obal	3.obal	4.obal	5.obal
<i>doba sušení</i>	12 - 24 hod.	12 - 48 hod.	20 - 48 hod.	20 - 48 hod.	24 - 48 hod.
<i>vlhkost</i>	min. 45%	min. 45%	30 - 55%	30 - 55%	30 - 55%

tab. 3 Doby sušení obalů a potřebné vlhkosti

Teplota prostředí je podle směrnic společnosti ALUCAST s.r.o. $24 \pm 4^\circ\text{C}$. V tomto experimentu jsou dodržena všechna tato pravidla.

c) Vytavování skořepiny

Společnost ALUCAST s.r.o. disponuje boilerklávkem, pomocí něhož bylo celé vytavování realizováno. Vytavování trvá cca 25 minut při tlaku 4,5 bar a teplotě 152°C .



obr. 42 Boilerkláv

3.2.3 Odlévání

a) Charakteristika odlévané slitiny

Materiál ČSN 424334 je slitina hliníku s křemíkem, hořčíkem a titanem vyznačující se mimořádně vysokými mechanickými vlastnostmi a dobrou odolností proti korozi. Slitina se označuje jako AlSi7MgTi, barevné označení základní: žlutá, vedlejší: bílá. Chemické složení tab.4, mechanické vlastnosti tab.5 a tab.6.

Legující prvky [%]	Si	Mg		Ti
	6,50 – 7,50	0,25 – 0,45		0,10 – 0,20
Doprovodné prvky max. [%]	Cu	Fe	Mn	Ni
	0,10	0,25	0,10	0,05
	Zn	ostatní		
	0,10	jednotlivě	celkem	0,25
		0,05		

tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi7MgTi

	<u>lité do pískové formy</u>
<i>technické dodací předpisy</i>	ČSN 42 1430
<i>číselné označení materiálu</i>	42 4334.70
<i>stav</i>	vytvrzený za tepla

<i>zjištění hodnot mechanických vlastností</i>	na odděleně litých zkušebních tyčích
<i>min. mez kluzu Rp0,2 [MPa]</i>	180
<i>min. pevnost v tahu Rm [MPa]</i>	230
<i>min. tažnost A5 [%]</i>	2
<i>min. tvrdost podle Brinella [HB]</i>	75

tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi7MgTi lité do pískových forem

	<u>lité do kovových forem</u>
<i>technické dodací předpisy</i>	ČSN 42 1430
<i>číselné označení materiálu</i>	42 4334.71
<i>stav</i>	vytvrzený za tepla
<i>zjištění hodnot mechanických vlastností</i>	na odděleně litých zkušebních tyčích
<i>min. mez kluzu Rp0,2 [MPa]</i>	190
<i>min. pevnost v tahu Rm [MPa]</i>	250
<i>min. tažnost A5 [%]</i>	5
<i>min. tvrdost podle Brinella [HB]</i>	80

tab. 6 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi7MgTi lité do kovových forem

b) Úprava taveniny

Tavenina byla připravena v indukční kelímkové peci (100kg, 25kW). Vsází se vratný materiál a housky, přičemž vratného materiálu je maximálně 70%. Po roztavení materiálu se vmíchá do povrchové vrstvy cca 0,1kg soli (PROBAT FLUSS 224 nebo PROBAT FLUSS Al 2126) a stáhne se struska. Na hladinu je vložen hořčík (50g/pec) a pomocí děrovaného zvonu je ponořen na dno a nechá se rozpustit. Může se také modifikovat pomocí modifikační tablety (EUTEKTAL T201). Rozpouštění Mg signalizují žluté plamínky na hladině taveniny. Dále následuje odplynění. Odplynění je prováděno pomocí odplyňovací jednotky FDU (obr. 43), kde dmýcháme plynný dusík cca 5 minut.

Následně se může opět vyčistit hladina, stáhnout struska a nechává se cca 10 minut odstát (uklidnit hladinu).

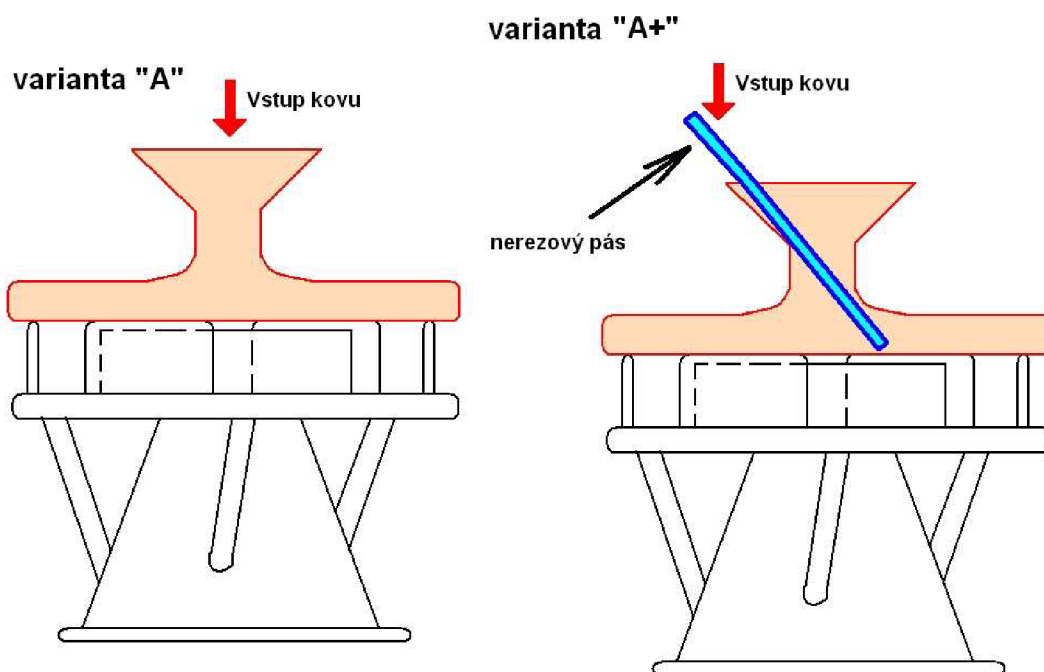


obr. 43 Odplyňovací jednotka FDU

c) Postup lití

Protože je jedním s cílů této práce srovnání konvenční metody horního lití a lití spodem, máme hned několik variant jak daný odlitek odlít. Celkem byly vytvořeny 4 varianty. 2 základní a každá z nich je určitým způsobem „vylepšena“.

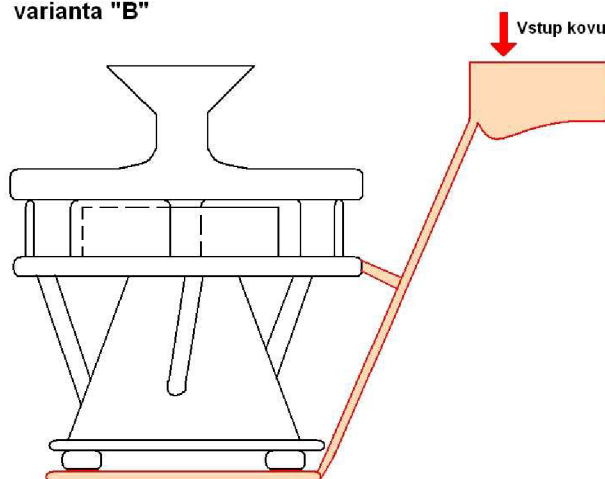
Varianta „A“ je základní variantou, tedy horní plnění (obr. 44 vlevo). Varianta „A+“ je vytvořena sloučením varianty „A“ a praktických zkušeností ze slévárny ALUCAST s.r.o. Zde je do vtoku přidán nerezový pás, po kterém tekutý kov klidně proudí do skořepiny (obr. 44 vpravo).



obr. 44 Varianta „A“ (vlevo), varianta „A+“ (vpravo)

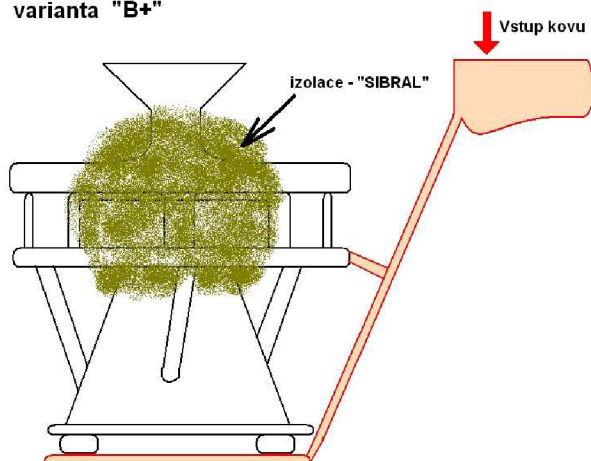
Varianta „B“ je představitelem spodního plnění, kde je zachován vtok pro horní plnění, ten slouží jako náliček a také pro doplňování tekutého kovu během odlévání (obr. 45). Také byl ponechán z praktických důvodů, pro samotnou výrobu skořepiny. Tato varianta byla podrobena počítačové simulaci (viz kapitola 3.3 *Výsledky počítačové simulace*).

varianta "B"



obr. 45 Varianta „B“

varianta "B+"



obr. 46 Varianta „B+“

A nakonec varianta „B+“, která byla opatřena izolací (SIBRAL), která se jeví jako dobré vylepšení varianty „B“ (obr. 46). Tato varianta je jakýmsi opatřením proti vzniku vad, které odhalila počítačová simulace (viz. kapitola 3.3 *Výsledky počítačové simulace*).

Samotné lití se provádí pomocí ruční pánve (obr. 47 vlevo) a trvá několik sekund. Během tuhnutí odlitku byl každý kus ochlazován pomocí ofukování skořepiny (obr. 47 vpravo).



obr. 47 Ruční pánve (vlevo), systém ofukování (vpravo)

Před samotným litím musí být skořepina vyžíhaná na teplotu cca 600 °C. Vyžívání se provádí v žíhací peci (obr. 48). Teplota tekutého kovu vstupujícího do skořepiny je okolo 730 °C. Toto platí u všech našich variant. Doby lití a ochlazování jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 7. Po ochlazení na licím roštu jsou odlitky přeneseny na dochlazení na vzduchu. Doba ochlazení je tedy pouze doba, kdy jsme odlitek ofukovali vzduchem.

	A	A+	B	B+
<i>doba lití</i>	16,5 s	18 s	26 s	26 s
<i>ochlazování</i>	4,5 min	4,5 min	5 min	7 min

tab. 7 Doby lití a ochlazování odlitku



obr. 48 Žíhací pec



obr. 49 Odlévání varianty „A“ (vlevo) a „A+“ (vpravo)



obr. 50 Odlévání varianty „B“ (vlevo) a „B+“ (vpravo)

3.2.4 Dokončovací operace

Po odlití a zchladnutí odlitku následují dokončovací operace. Jedná se o rozbití skořepiny, v tomto případě jde o ruční rozbíjení pomocí kladiva. Poté přichází na řadu odřezání vtokové soustavy a další operací je hrubé otryskání. To bylo provedeno na otryskávací jednotce firmy OTECO (obr. 51). Po hrubém otryskání následuje odstranění zbytku skořepiny v ručním tryskači. Jelikož je hliníková slitina relativně měkký materiál, je tryskacím médiem pouze křemičitý písek.



obr. 51 Pásová pila na odřezání vtoků (vlevo), tryskací jednotka OTECO (vpravo)

Po konečném otryskání je možné ještě zabrousit vtoky a máme hotový odlitek (obr. 52).



obr. 52 Hotový odlitek

3.3 Výsledky počítačové simulace

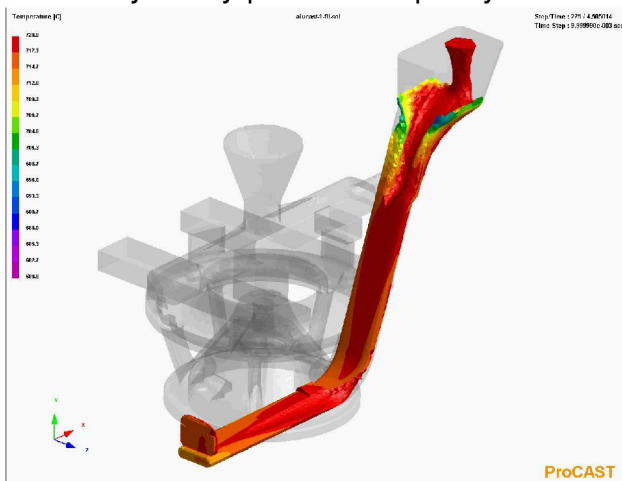
Ve spolupráci s firmou MECAS ESI s.r.o. byla vytvořena počítačová simulace odlévání a tuhnutí varianty „B“ tohoto experimentu.

Po načtení již vytvořené geometrie modelu včetně vtokové soustavy byl proveden hlavní výpočet a získány výsledky této simulace.

3.3.1 Plnění formy

Jedním z důležitých výsledků, o které bylo usilováno, bylo plnění formy. Jelikož je forma vytvořena z keramické skořepiny, není možné nijak sledovat proudění tekutého kovu uvnitř dutiny. Tím pádem není důkaz o tom, zda byla správně navržena vtoková soustava i samotná geometrie formy, která byla zvolena pouze díky zkušenostem z předchozích výrobků.

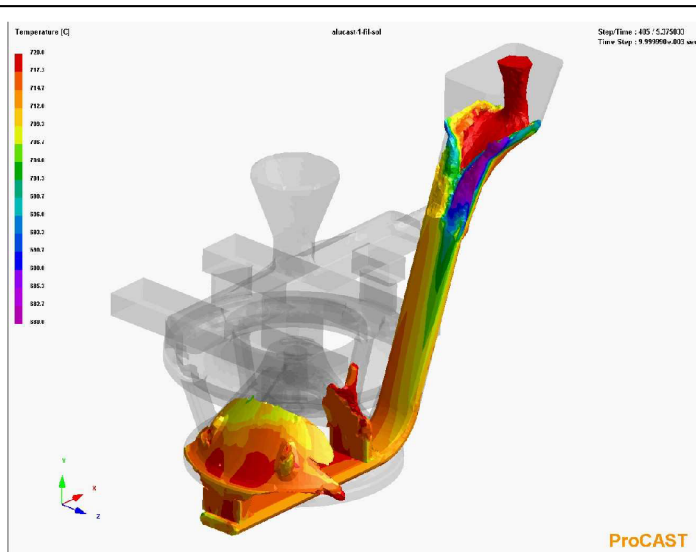
Výsledky plnění také poskytnou informace o správnosti rozhodnutí využít spodní plnění formy či nikoliv.



obr. 53 Snímek 1p

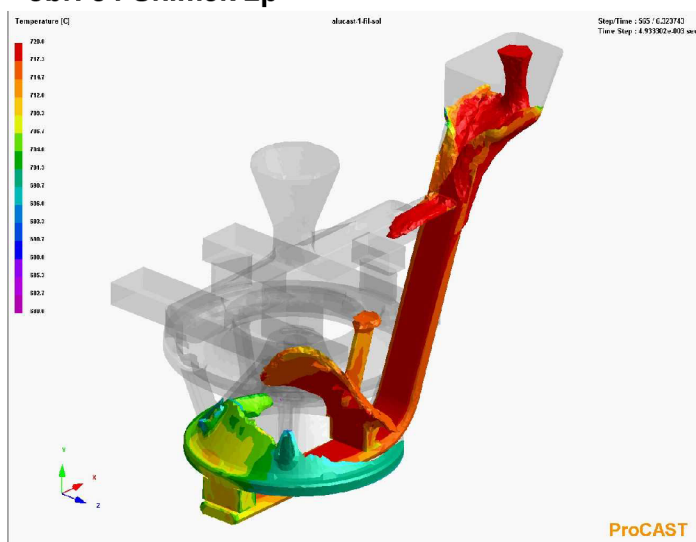
Výsledky:

Na snímku 1p (obr.53) je patrný začátek plnění skořepiny. Na levé straně je stupnice teplot proudícího kovu (červená barva odpovídá teplotě 720°C a fialová odpovídá teplotě 680°C). Kov vstupuje do formy při teplotě odpovídající teplotě lití dané slitiny.



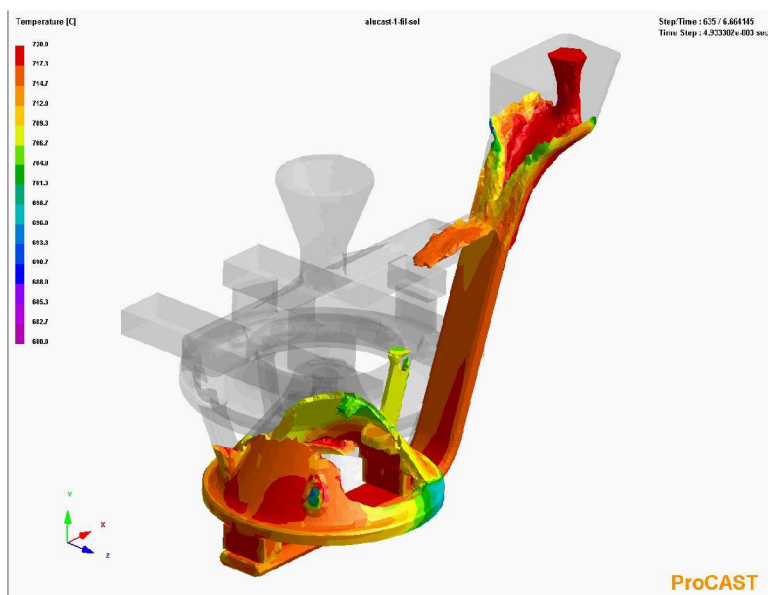
obr. 54 Snímek 2p

Snímek 2p (obr. 54) – plnění pokračuje, tekutý kov nejprve proudil zadním zářezem a poté proudí i přes zářez přední. To může ovlivnit klidné plnění a s tím související vady.



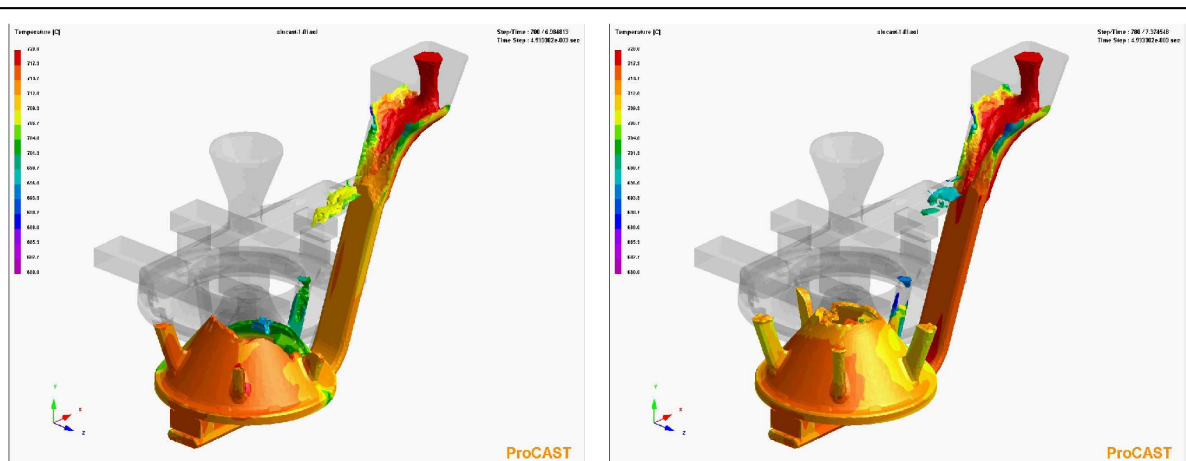
obr. 55 Snímek 3p

Snímek 3p (obr. 55) – předním zářezem proudí větší množství kovu než zadním, dochází ke kolísání hladiny.



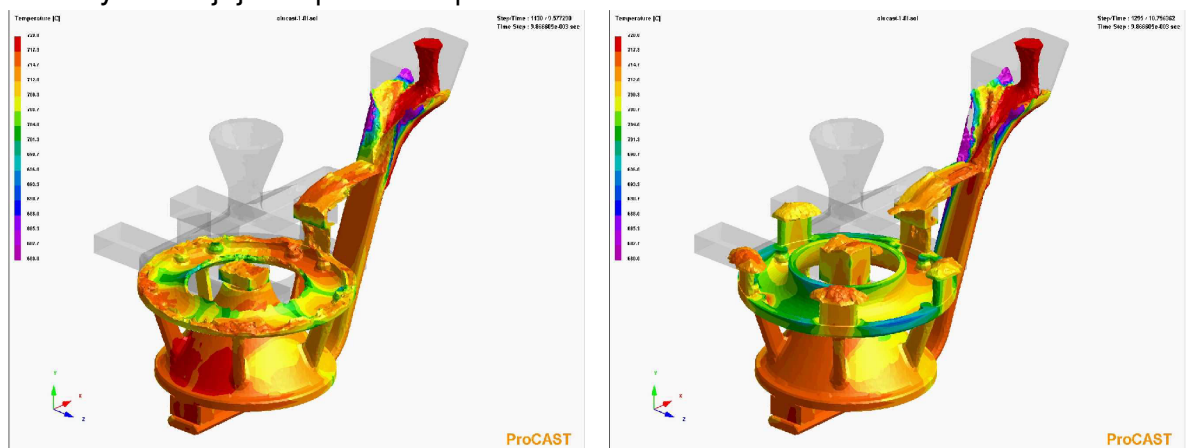
obr. 56 Snímek 4p

Snímek 4p, 5p, 6p (obr. 56, 57) – kolísání hladin se pomalu ustálilo a dochází ke klidnému plnění. Tekutý kov proudí oběma zářezy stejně o relativně stejné teplotě.

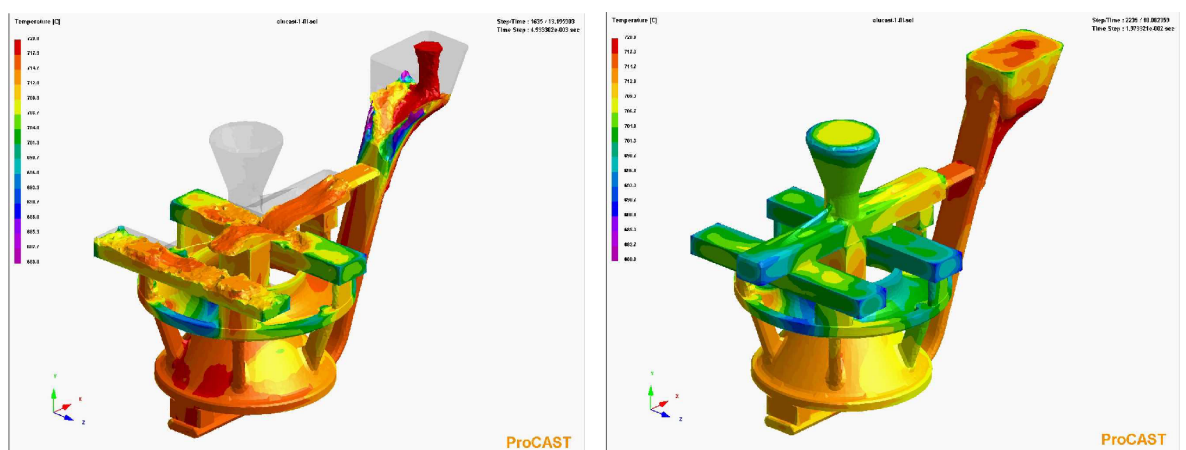


obr. 57 Snímek 5p (vlevo), snímek 6p (vpravo)

Další *snímky 7p – 10p* (obr. 58, 59) ukazují, jak se klidně plní zbytek formy až do jejího úplného zaplnění.



obr. 58 Snímek 7p (vlevo), snímek 8p (vpravo)



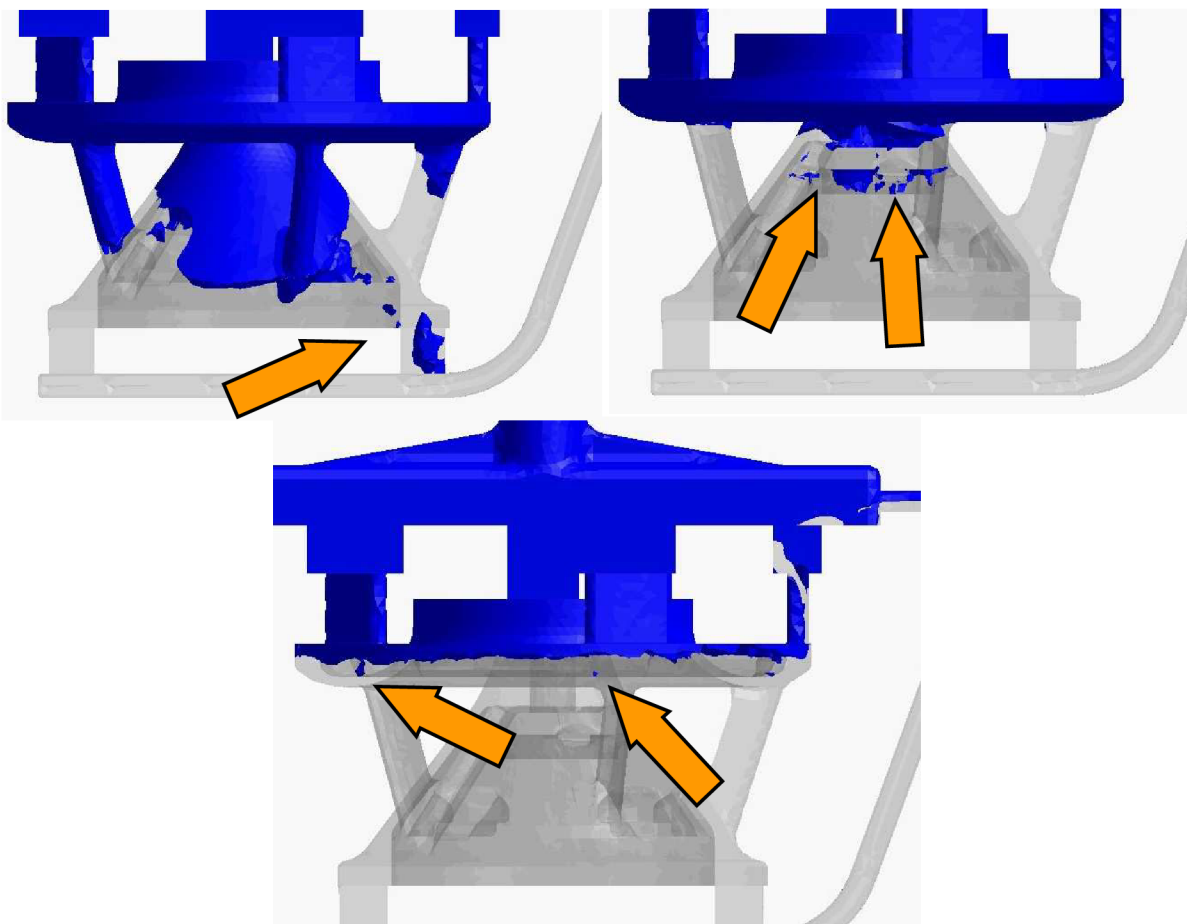
obr. 59 Snímek 9p (vlevo), snímek 10p (vpravo)

Analyza možných problémů při plnění a jejich náprava:

Určité problémy by mohlo činit na začátku lití nerovnoměrné plnění formy. Nejprve se forma plní zadním a poté předním zářezem. To by mohlo

vést ke vzniku bublin v důsledku víření kovu. Až po cca 7 sekundách dojde k uklidnění hladiny a klidnému plnění oběma zářezy rovnoměrně. Tento nedostatek by se dal odstranit např. použitím odstupňovaného (schodovitého) struskováku, který by tekutý kov dopravil k zářezům.

Na obr. 60 je patrný možný výskyt bublin při plnění. Modrá barva znázorňuje vzduch ve formě, transparentně je vyznačena část, kde je již alespoň 75% tekutého kovu. Je patrné, že v určitých místech kov uzavře vzduch a v těchto částech může dojít k výskytu bublin.

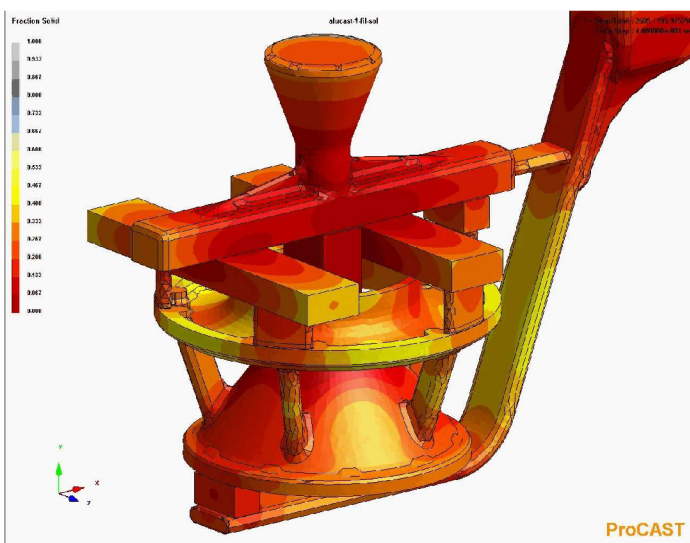


obr. 60 Uzavřené vzduchové bubliny v tekutém kovu

3.3.2 Tuhnutí odlitku

Dalším výsledkem simulací, který byl neméně důležitý, bylo tuhnutí odlitku po odlití. Tato část simulací ukázala, jak postupovalo ochlazování odlitku a s tím spojený výskyt vad, především staženin a pórovitosti.

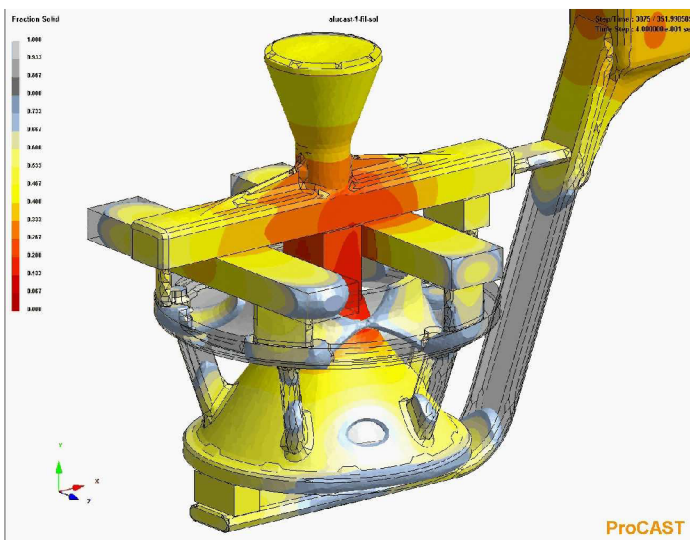
Díky této části simulace bylo možné učinit následná opatření a vytvořit variantu lití „B+“, která se zvolila jako lepší řešení varianty „B“. Na následujících obrázcích je popsáno tuhnutí odlitku ve formě po odlití.



obr. 61 Snímek 1t

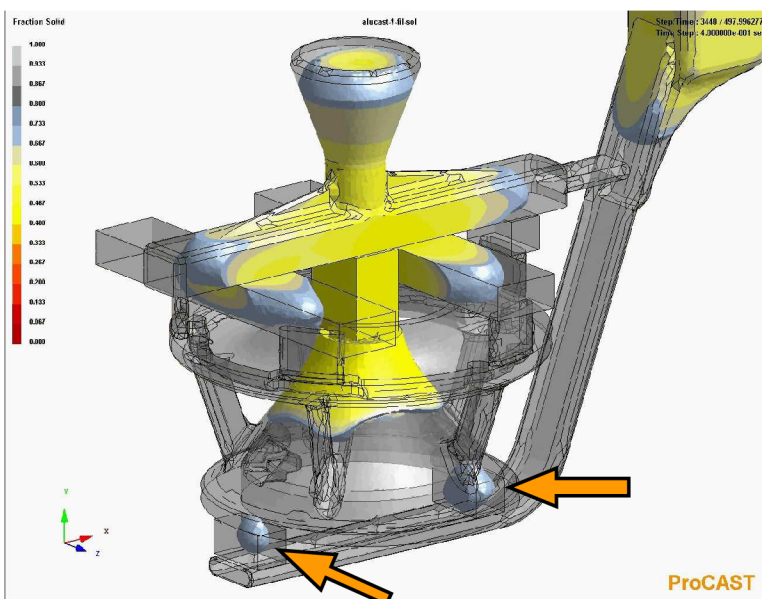
Výsledky:

Snímek 1t (obr. 61) – Odlitek ve formě pomalu tuhne. Je patrné, že nejdříve ztuhne vtokový kanál a kraje kotouče.



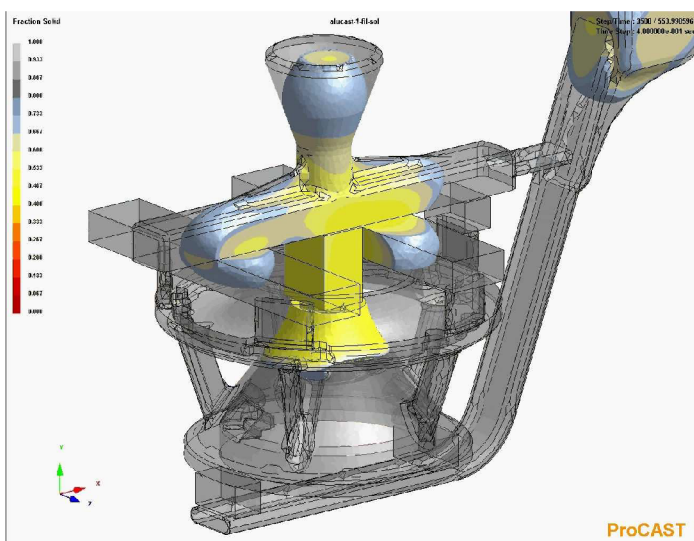
obr. 62 Snímek 2t

Snímek 2t (obr. 62) – Odlitek tuhne dál, tuhnutí jde od stěn formy a postupuje do středu.



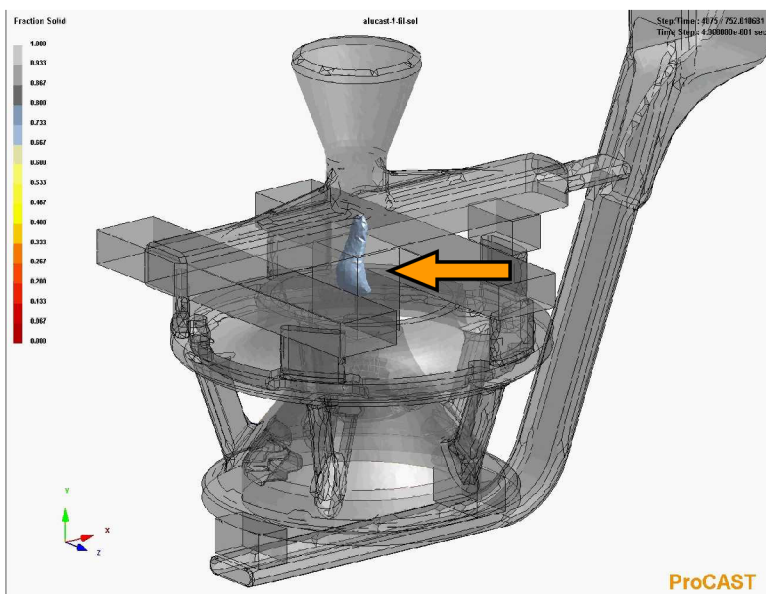
obr. 63 Snímek 3t

Snímek 3t (obr. 63) – Vznikají kritická místa nad zářezy (v dolní části obrázku – jak ukazují šipky). Později by se tento jev mohl projevit výskytem bublin, či pórovitostí v daném místě.



obr. 64 Snímek 4t

Snímek 4t (obr. 64) – Odlitek tuhne směrem do středu. Kritickým místem nejspíše bude spodní část nálitku nebo horní část součásti.



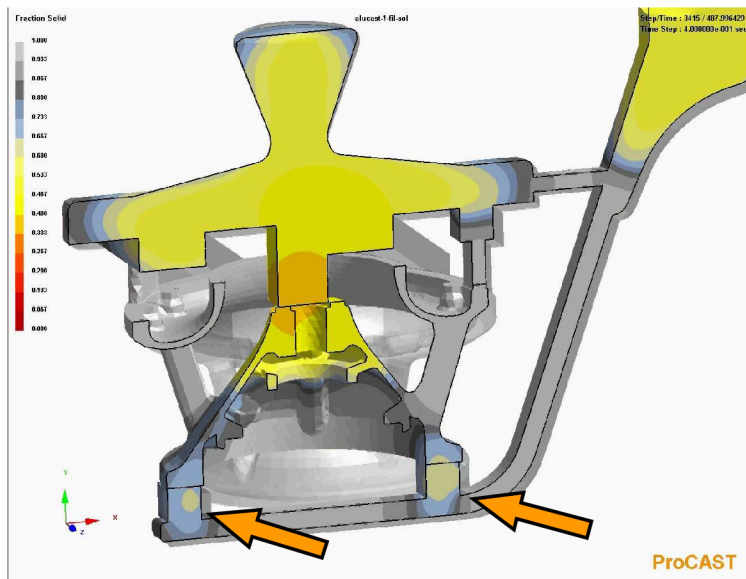
obr. 65 Snímek 5t

Snímek 5t (obr. 65) - Předěšlá domněnka se potvrdila, kritickým místem je dokonce přechod mezi součástí a nálitkem.

Analýza možných problémů při tuhnutí a jejich odstranění:

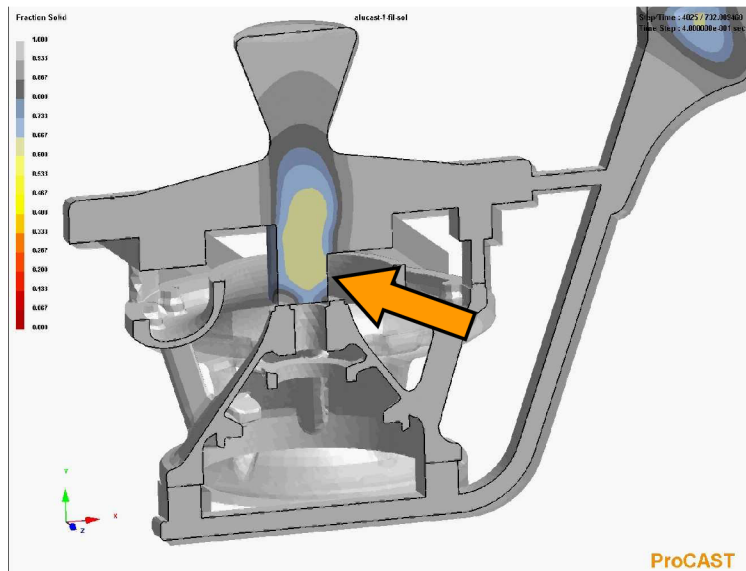
Na následujících obrázcích je řez odlitkem, kde jsou znázorněna kritická místa. Tato kritická místa by mohla vyvolat vyšší pórovitost či dokonce bubliny. Pokud by se po naplnění doplňoval tekutý kov přes nálitku, mohl by se vzniklý tepelný uzel posunout nahoru, čímž by se odstranily vady v odlitku a přesunuly by se do nálitku, kde jsou již neškodné.

Další variantou, jak odstranit nebo posunout tepelný uzel ve středu odlitku, by mohlo být zaizolování nálitku, který by tak posunul tepelný uzel do nálitku. Podle tohoto předpokladu byla konstruována varianta „B+“ (viz kapitola 3.2.3 Odlévání; c) Postup lití).



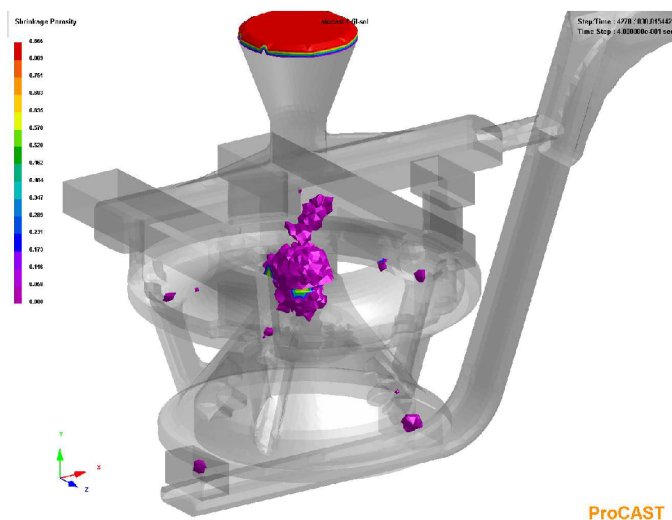
obr. 66 Snímek 1r

Snímek 1r (obr. 66) – v dolní části jsou patrné zbytky tepelných uzlů, které mohou být místem výskytu pórovitosti či bublin. V horní části je již v této fázi vidět velký tepelný uzel přímo ve středu odlitku.



obr. 67 Snímek 2r

Snímek 2r (obr. 67) – ve středu odlitku je největší tepelný uzel, který může být kritickým místem pro vznik vad.



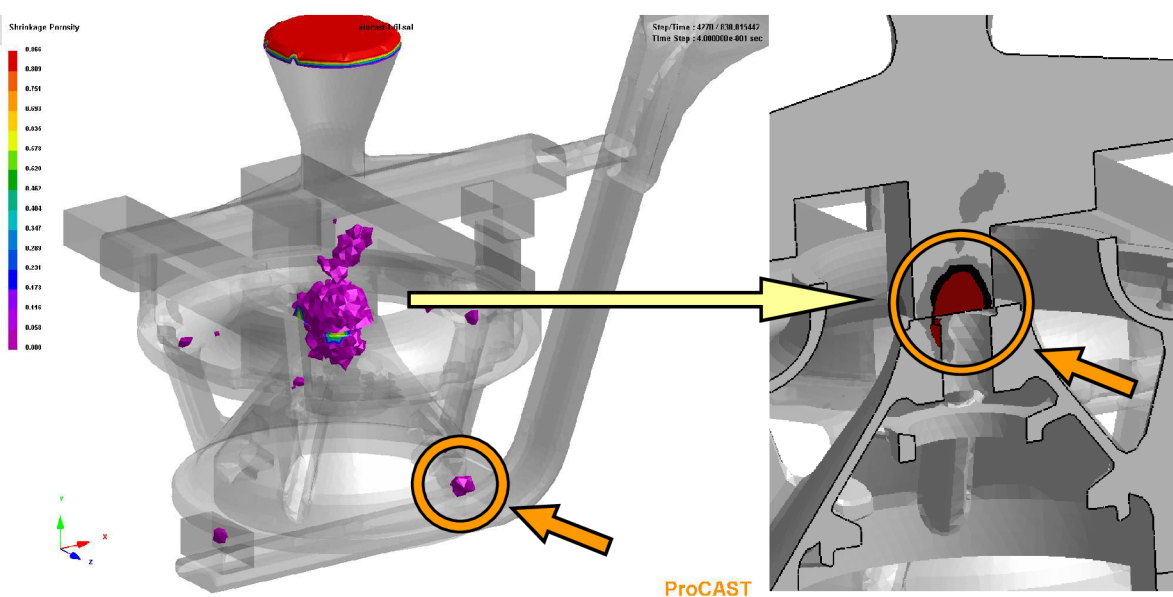
obr. 68 Možný výskyt vad v odlitku podle počítačové simulace

3.4 Laboratorní hodnocení

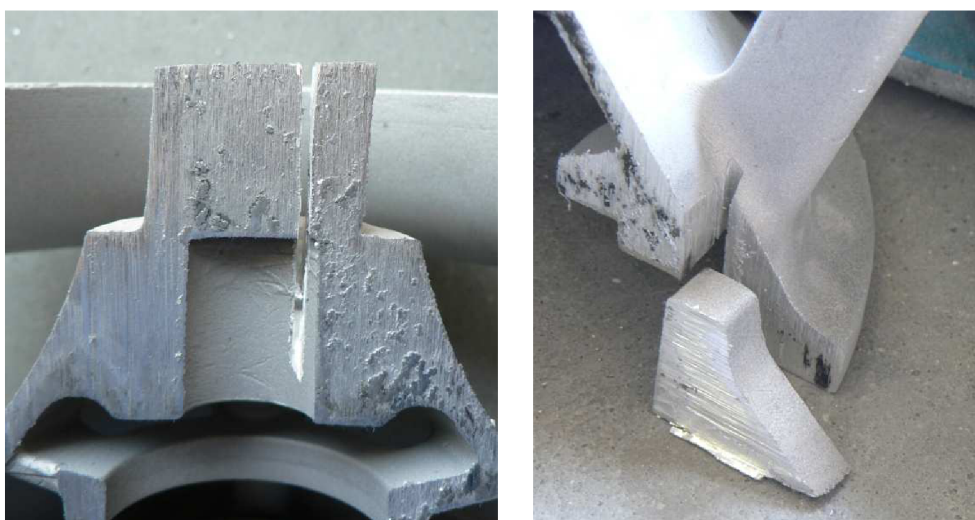
Před samotným hodnocením jsme museli provést odběr a úpravu vzorku. Poté jsme pořídili snímky povrchů (Příloha 1) daných vzorků pomocí mikroskopu, připojeného Fotoaparátu OLYMPUS E510 a potřebného softwaru. Laboratorní hodnocení jsme prováděli pomocí softwaru OLYMPUS ANALYSIS 5 na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně.

3.4.1 Odběr a úprava vzorků

Hotový odlitek jsme rozřezali na dvě poloviny a z vytipovaných míst (obr. 69) odebrali vzorky pro výbrus a následné hodnocení. Pro rozřezání odlitku i odběr vzorků (obr. 70) jsme použili pásovou pilu (obr. 51 vlevo).



obr. 69 Kritická místa v odlitku, místa pro odběr vzorků



obr. 70 Odběr vzorku z kritických míst

Úprava vzorku spočívá v zalití do dentacrylu a metalografickém výbrusu. Zalití bylo prováděno na zařízení LaboPress-3 firmy STRUERS (obr. 71). Zatěžovací síla byla stanovena na hodnotu 20kN při teplotě 180°C po dobu cca 7minut a poté 3 minuty chladíme. Pro zalití byla použita metylmetakrylátová pryskyřice známá jako DENTACRYL.



obr. 71 LaboPress-3 firmy STRUERS (vlevo), zalité vzorky (vpravo)

Výbrus a leštění bylo prováděno na zařízení DAP-7 firmy STRUERS (obr. 72). Brusné papíry byly použity v pořadí zrnitosti 240, 400, 600, 1200, 2800, 4000. Poté bylo provedeno leštění na leštících kotoučích a pomocí diamantové pasty o zrnitosti 3 μ m a 1 μ m (obr. 72). Po vybroušení a vyleštění byly vzorky opatrně očistili lihem.

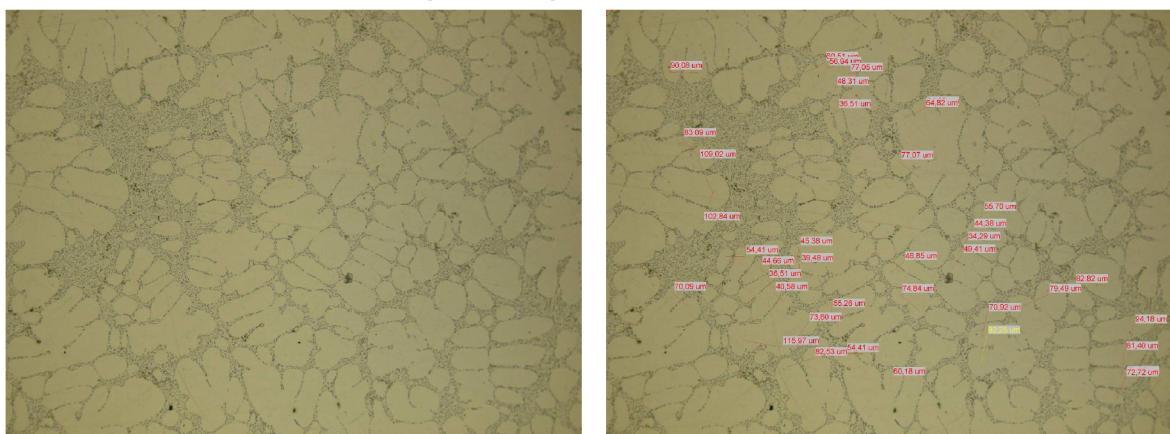


obr. 72 Vybroušení, zařízení DAP – 7 firmy STRUERS (vlevo), leštění s diamantovou pastou (vpravo)

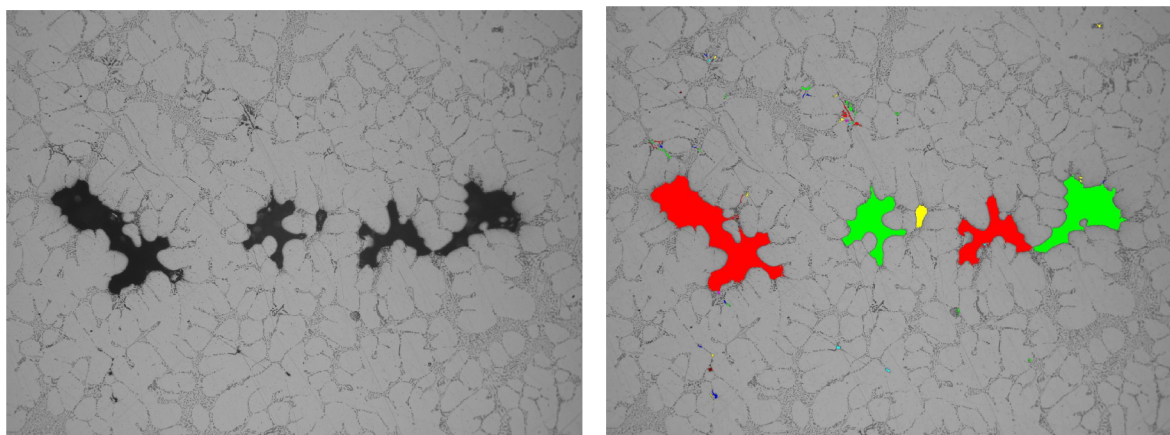
Na každém vzorku bylo vyfoceno 10 snímků pro hodnocení velikosti DAS (obr.74) a 10 snímků pro hodnocení pórovitosti (obr.75). Pro fotografování byl použit mikroskop s fotoaparátem OLYMPUS E 510 a potřebným softwarem (obr. 73).



obr. 73 Mikroskop a fotoaparát OLYMPUS E 510



obr. 74 Snímek pro hodnocení DAS (vlevo), vyhodnocený snímek (vpravo)



obr. 75 Snímek pro hodnocení pórovitosti (vlevo), vyhodnocený snímek (vpravo)

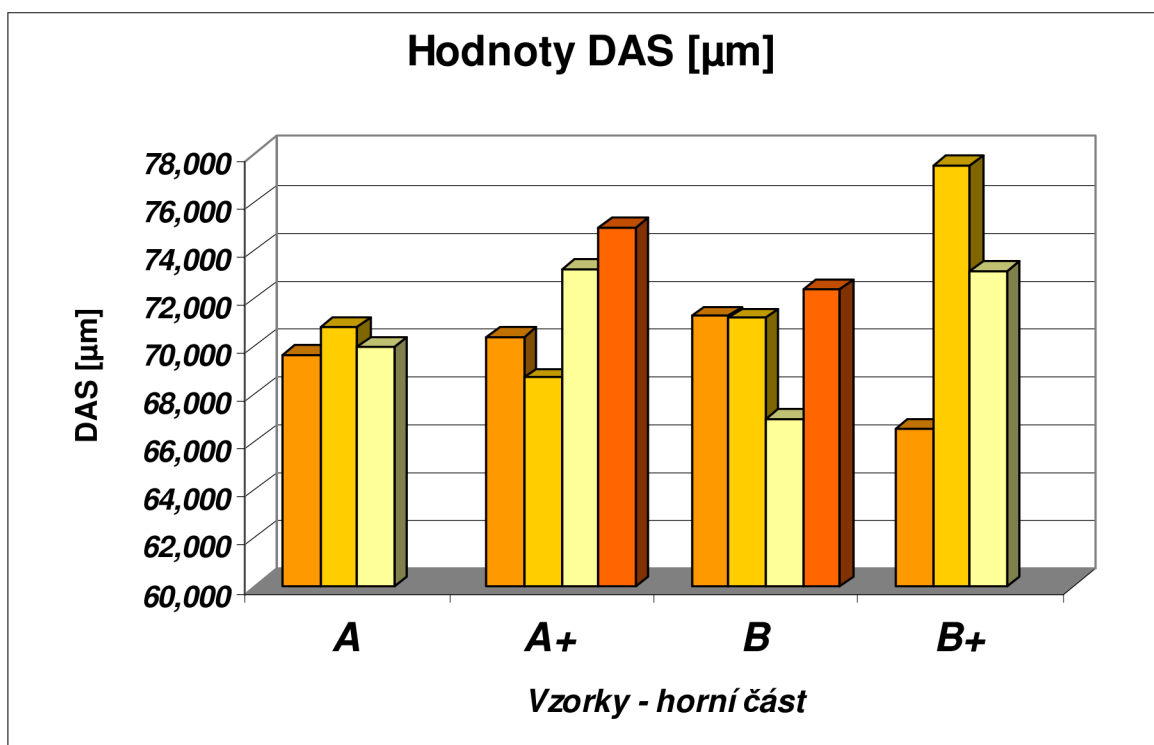
3.4.2 Výsledky hodnocení DAS

Po nasnímání 10 snímků z každého vzorku, byly provedeny za pomoci softwaru OLYMPUS ANALYSIS 5 vyhodnoceny velikosti DAS. Shrnutí všech naměřených hodnot viz Příloha 1. Konečné výsledky jsou v tabulce 8.

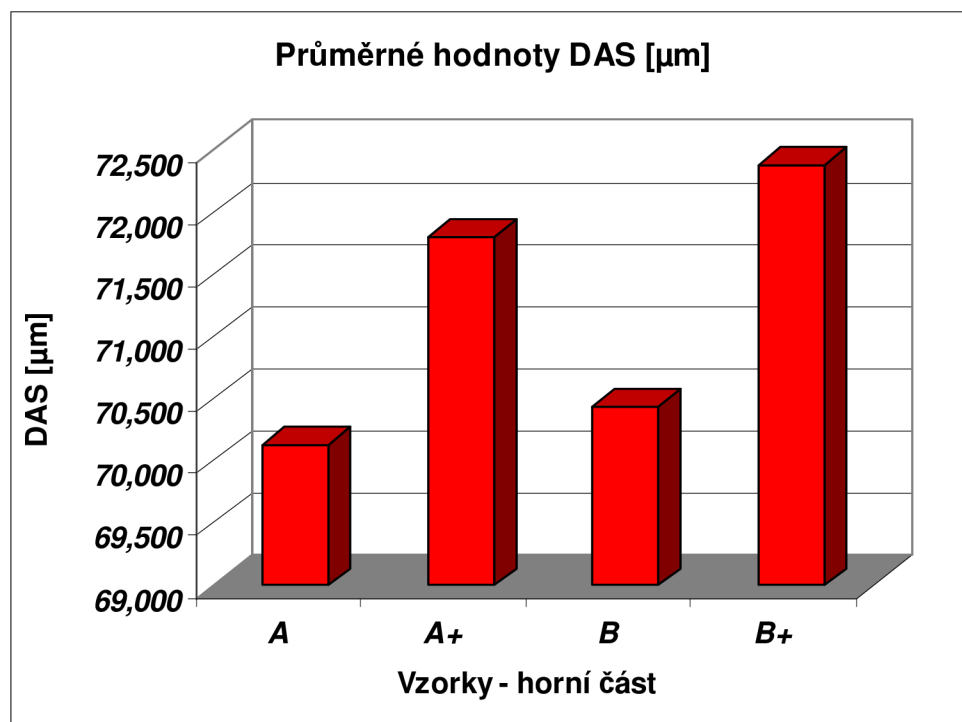
vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	69,615	70,403	71,234	66,526
	70,803	68,663	71,153	77,51
	69,987	73,184	66,975	73,113
		74,959	72,369	
průměrná hodnota	70,135	71,802	70,433	72,383

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	61,798	59,346	55,354	60,273

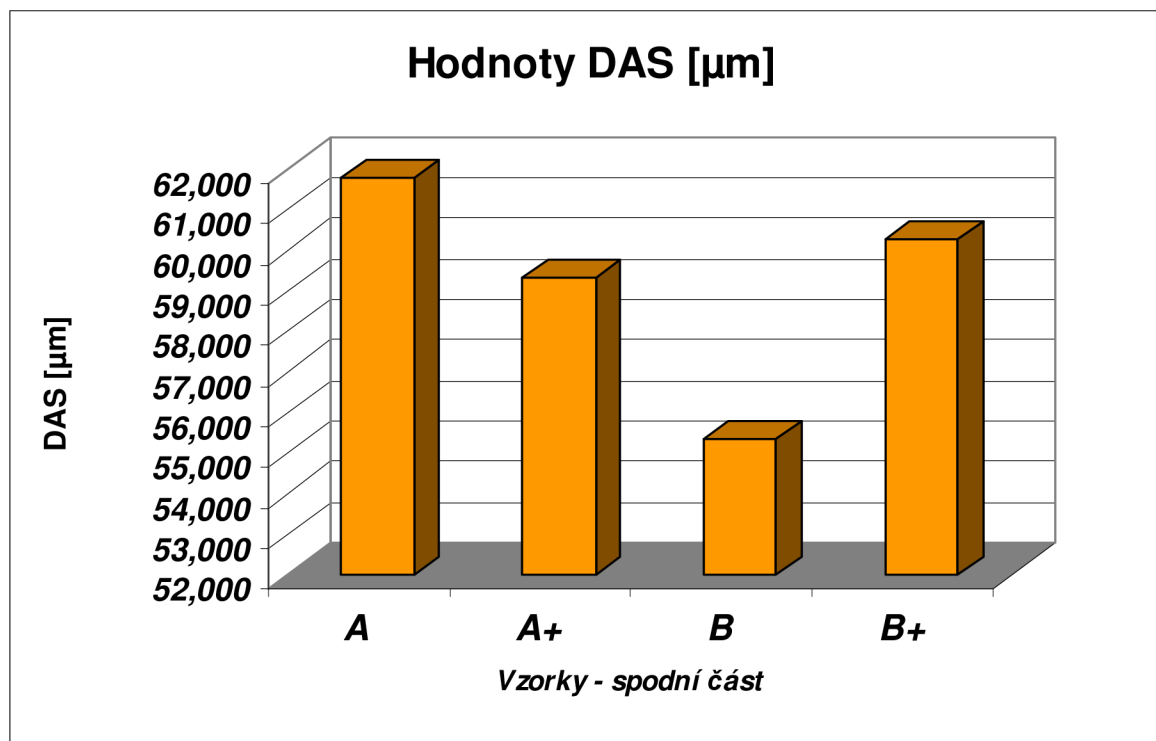
tab. 8 Konečné výsledky měření velikosti DAS našich vzorků



graf 1: Hodnoty DAS u vzorků z horní části



graf 2: Průměrné hodnoty DAS u vzorků z horní části



graf 3: Hodnoty DAS u vzorků ze spodní části

3.4.3 Výsledky hodnocení pórovitosti

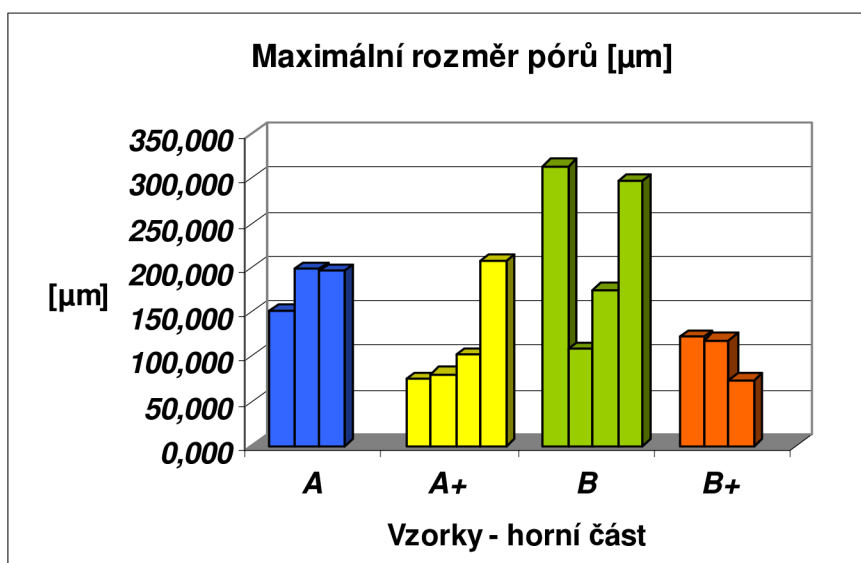
Po pořízení 10 snímků na každém vzorku byly pomocí softwaru OLYMPUS ANALYSIS 5 vyhodnocovány charakteristické hodnoty pórovitosti. Příloha 2 obsahuje veškeré výsledky měření.

Maximální rozměr pórů (diameter max) [μm]:

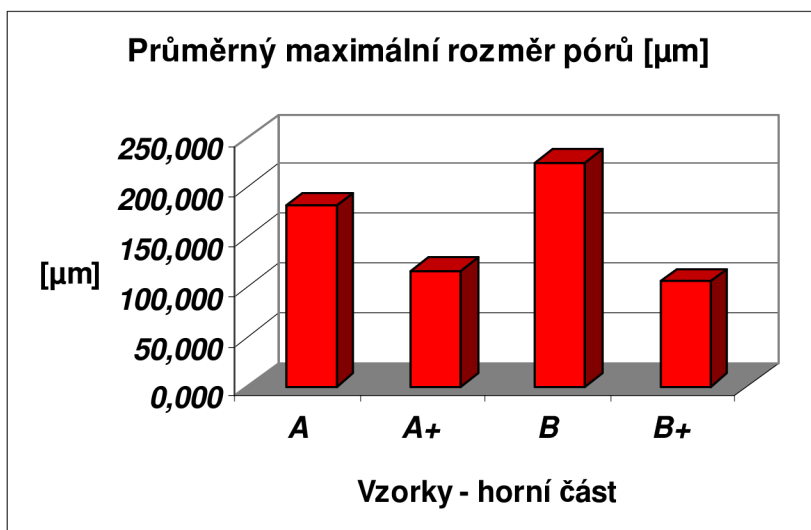
vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	150,667	75,388	314,237	121,47
	197,966	80,7587	108,014	118,984
	195,631	102,421	174,869	74,0733
		206,895	297,846	
průměrná hodnota	181,42	116,37	223,74	104,84

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	539,998	357,097	493,501	433,537

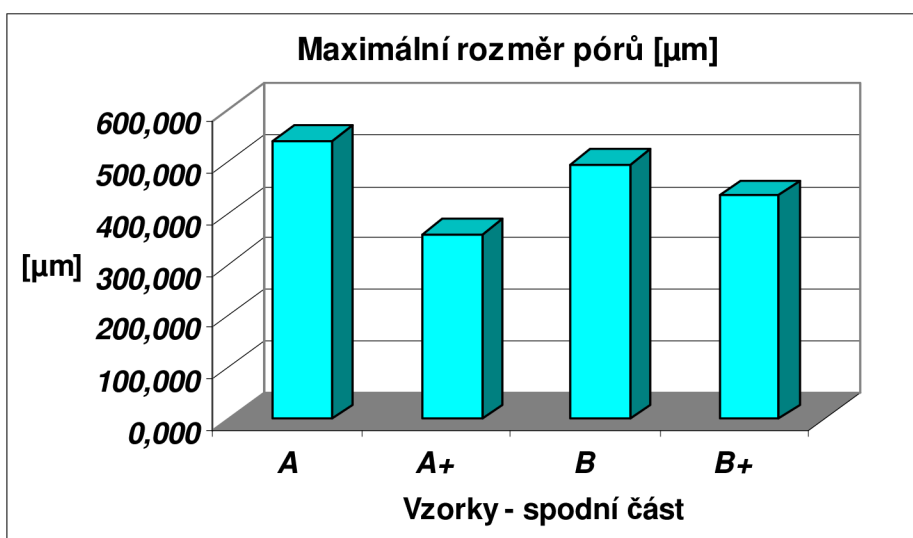
tab. 9 Souhrn výsledků při měření maximálních rozměrů pórů



graf 4:
Maximální
rozměr pórů



graf 5:
Průměrný maximální
rozměr pórů



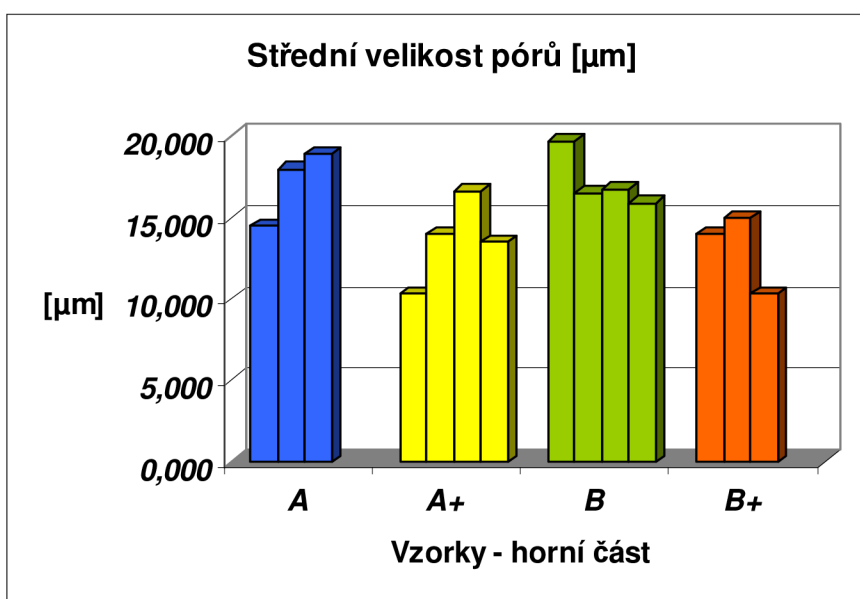
graf 6:
Maximální
rozměr pórů

Střední rozměr pórů (diameter mean) [μm]:

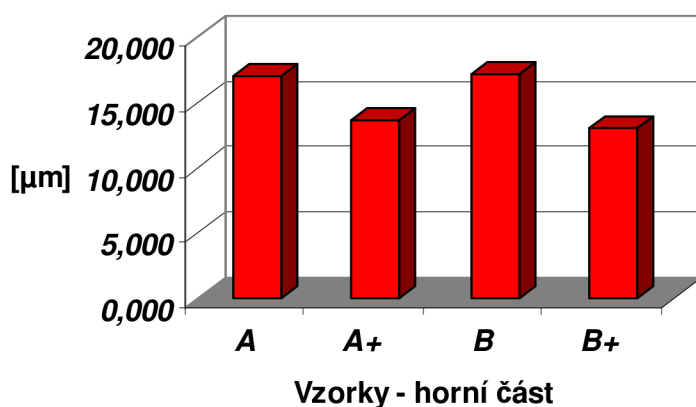
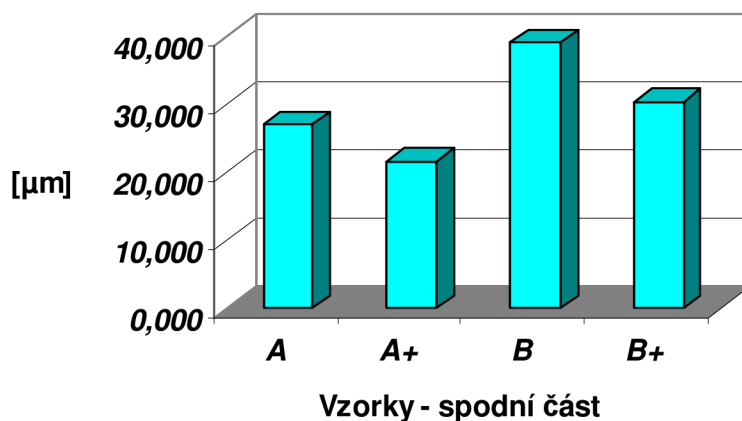
vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	14,4419	10,3128	19,6995	14,0095
	17,9482	14,0093	16,5209	14,9647
	18,8533	16,6361	16,7203	10,3128
		13,5145	15,8966	
průměrná hodnota	17,081	13,618	17,209	13,096

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	27,066	21,639	39,050	30,386

tab. 10 Souhrn výsledků při měření střední velikosti pórů

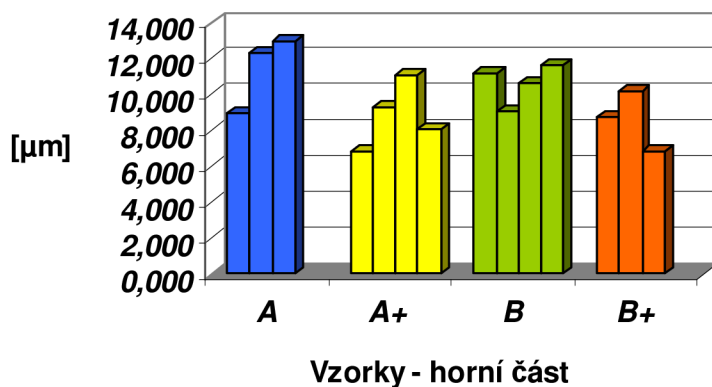
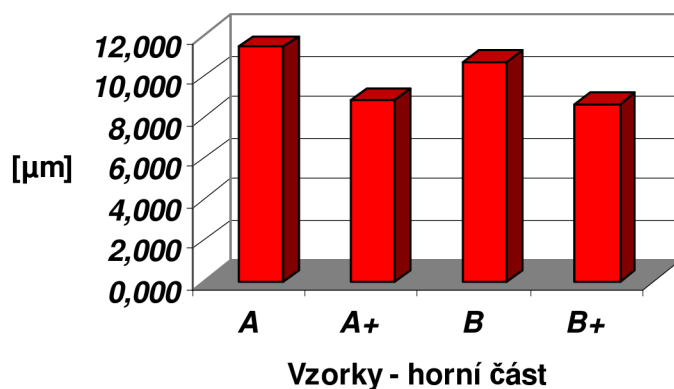
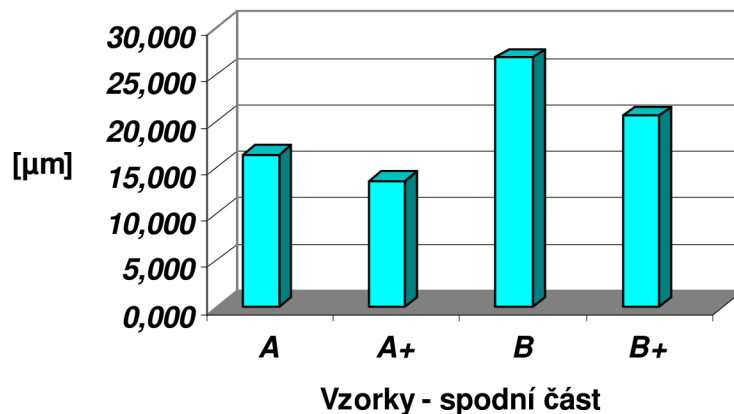


graf 7:
Střední
velikost pórů

Průměrná střední velikost pórů [μm]graf 8:
Průměrná střední
velikost pórůStřední velikost pórů [μm]graf 9:
Střední velikost pórů**Minimální rozměr pórů (diameter min) [μm]:**

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	8,90961	6,8761	11,1737	8,72926
	12,259	9,2349	9,10697	10,1721
	13,0051	11,0574	10,6415	6,8761
		8,10045	11,6353	
průměrná hodnota	11,391	8,8172	10,639	8,5925
vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	16,4306	13,616	26,8627	20,601

tab. 11 Souhrn výsledků měření minimálního rozměru pórů

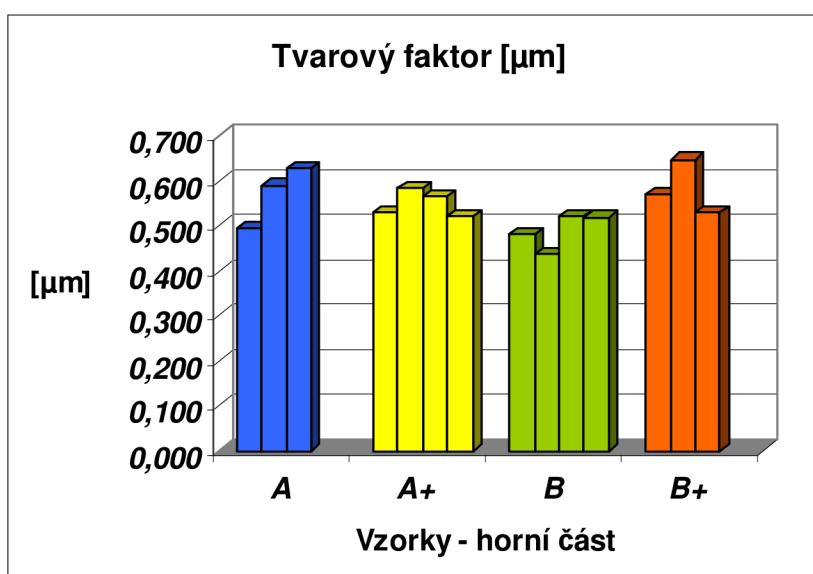
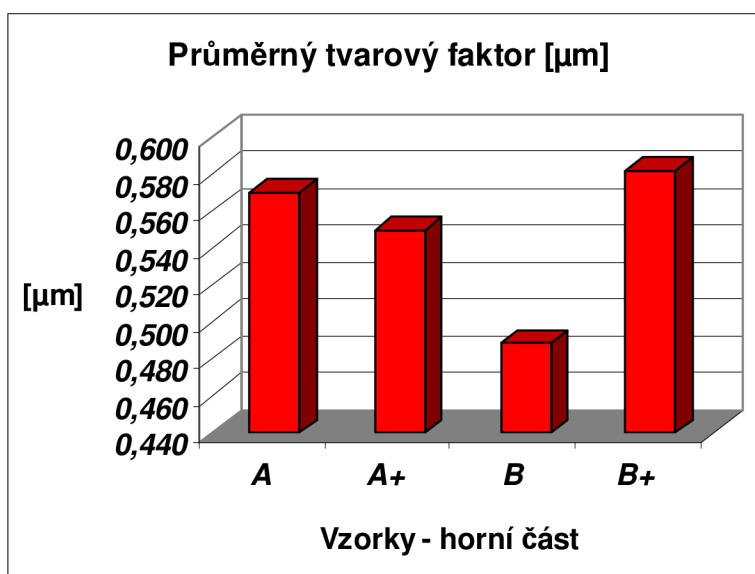
Minimální velikost pórů [μm]graf 10:
Minimální velikost pórůPrůměrná minimální velikost pórů [μm]graf 11:
Průměrná minimální velikost pórůMinimální velikost pórů [μm]graf 12:
Minimální velikost pórů

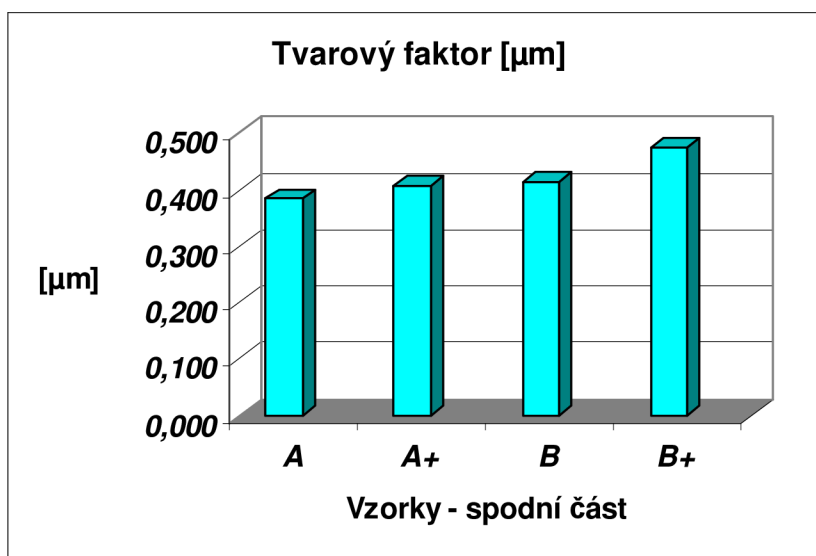
Tvarový faktor (shape factor) [μm]:

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	0,49408	0,53092	0,47983	0,56882
	0,58959	0,58347	0,4363	0,64667
	0,62731	0,56383	0,52039	0,53092
		0,5217	0,51823	
průměrná hodnota	0,570	0,550	0,489	0,582

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	0,38426	0,40643	0,41501	0,47539

tab. 12 Shrnutí výsledků při měření tvarového faktoru

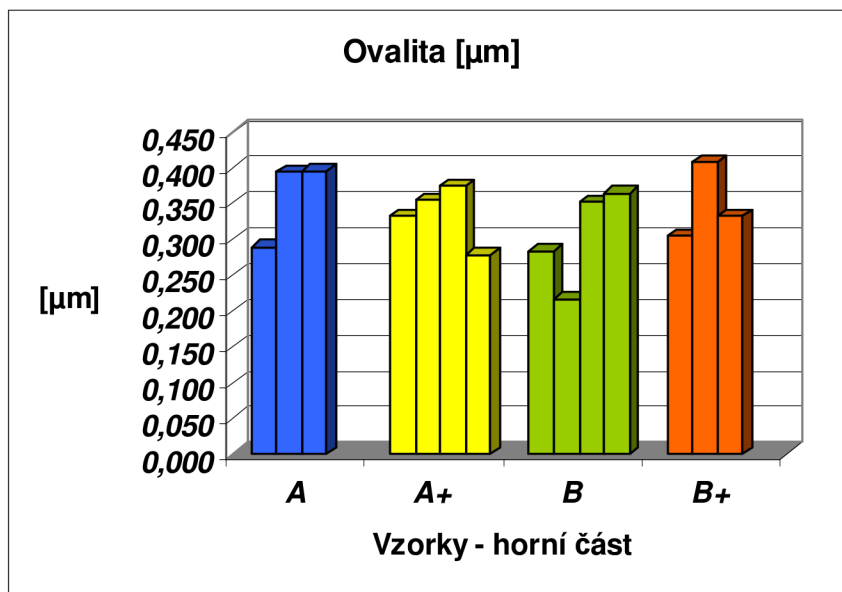
graf 13:
Tvarový faktorgraf 14:
Průměrný tvarový faktor

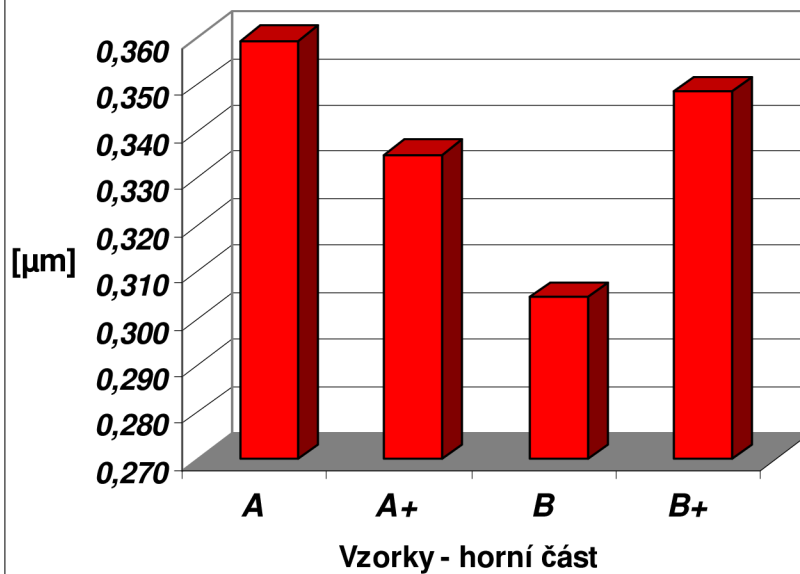
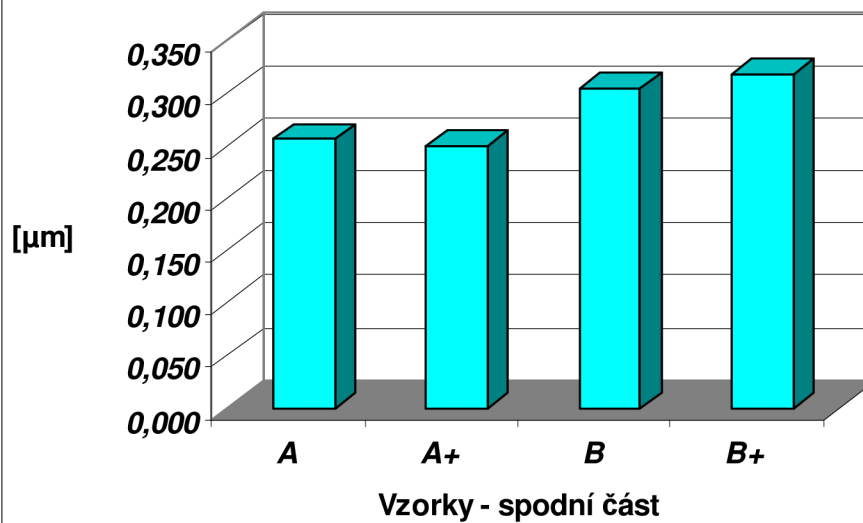
graf 15:
Tvarový faktor

Ovalita (sphericity) [μm]:

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
	0,28907	0,33297	0,28382	0,30425
	0,39334	0,35432	0,21639	0,40801
	0,39559	0,37503	0,35277	0,33297
		0,27807	0,36511	
průměrná hodnota	0,3593	0,3351	0,3045	0,3484
vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
	0,25627	0,24996	0,30479	0,31747

tab. 13 Souhrn výsledků při měření ovality

graf 16:
Ovalita

Průměrná ovalita [μm]graf 17:
Průměrná ovalitaOvalita [μm]graf 18:
Ovalita

4 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo získání lepších strukturních vlastností a odstranění typických vad u vytipovaného odlitku ze slitiny AlSi7MgTi (ČSN 424334). Těchto výsledků se mělo dosáhnout využitím spodního plnění keramické skořepiny vyrobené metodou vytavitelného modelu ve slévárně ALUCAST s.r.o. Důvodem je neustále rostoucí tlak zákazníka na přesnější a preciznější odlitky a také silný konkurenční boj jednotlivých sléváren.

V průběhu experimentu byly vytvořeny celkem 4 varianty odlévání označené jako „A“, „A+“, „B“, „B+“. Tyto varianty byly po odlití tepelně zpracovány, dle směrnic slévárny ALUCAST s.r.o. Varianta „A“ představovala klasickou konvenční metodu odlévání daného odlitku ve společnosti ALUCAST s.r.o. Také byla provedena počítačová simulace postupu „B“, z jejíž výsledků byla poté vytvořena právě varianta „B+“. S variantou „A“ se budou všechny ostatní varianty srovnávat.

Graf 2 a tab. 8 ukazuje průměrné hodnoty DAS u vzorků z horní části. Zde je patrné, že varianta „A“ je z hlediska velikosti DAS nejlepší variantou, ale pokud se podíváme na hodnoty ostatních variant, je zřejmé, že jsou jen nepatrně vyšší (tab. 14), což nemusí mít v konečném důsledku patrný vliv na změnu mechanických vlastností. Podle tab.7 Doby lití a ochlazování odlitku je zřejmé, že varianta lití „A“ má nejkratší čas lití a ochlazování, tedy i hodnota DAS by měla být nejmenší, což se potvrdilo. Varianta „B+“ má naopak nejdelší čas lití a tuhnutí a tudíž má největší hodnotu DAS.

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
průměrná hodnota DAS	70,135	71,802	70,433	72,383
rozdíl od A v %		+2,38	+0,42	+3,21

tab. 14 Porovnání varianty „A“ s ostatními variantami

Co se týče hodnot DAS u vzorků ze spodní části odlitku, zde jsou výsledky poněkud výraznější a odlišnější od předchozích (tab. 15). Zde je hodnota DAS u varianty „A“ nejvyšší a varianta „B“ má hodnotu DAS nejnižší. Je patrné, že u spodních vzorků pomohlo zavedení různých opatření, zejména u varianty „B“ došlo ke snížení hodnoty DAS o cca 10%.

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
hodnota DAS [μm]	61,798	59,346	55,354	60,273
rozdíl od A v %		-3,97	-10,43	-2,47

tab. 15 Porovnání varianty „A“ s ostatními variantami

Pokud se jedná o objektivní zhodnocení, zda metoda spodního lití přispěla ke snížení velikosti DAS a tím ke zlepšení mechanických vlastností, bylo by třeba provést rozsáhlejší analýzu. Je zřejmé, že v určitých místech odlitku tato metoda vyvolala jisté změny, které by si zasloužily větší pozornost.

Graf 5 a tab. 9 dokumentuje průměrné naměřené hodnoty maximálních velikostí pórů na vzorcích. Varianta „B+“ se jeví z hlediska velikosti největších

pórů jako varianta s nejnižší hodnotou této veličiny, zato varianta „B“ jako nejméně příznivá. Tab. 16 ukazuje procentuální rozdíly mezi jednotlivými variantami z hlediska maximální velikosti pórů u vzorků z horní části odlitku.

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
průměrná hodnota	181,42	116,37	223,74	104,84
rozdíl od A v %		-35,86	+23,33	-42,21

tab. 16 Procentuální rozdíly jednotlivých variant z hlediska maximálních pórů u vzorků z horní části odlitku

Tab. 17 ukazuje procentuální rozdíly mezi jednotlivými variantami z hlediska maximální velikosti pórů u vzorků ze spodní části odlitku. Zde je vidět, že nejpříznivější variantou je varianta „A+“ a hned po ní varianta „B+“.

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
max. velikost pórů	540,00	357,10	493,50	433,54
rozdíl od A v %		-33,87	-8,61	-19,71

tab. 17 Procentuální rozdíly jednotlivých variant z hlediska maximálních pórů u vzorků ze spodní části odlitku

U střední velikosti pórů je situace následující, což ukazují tab. 18 a tab. 19. Zde je u horních vzorků nejpříznivější varianta „B+“ stejně jako u hodnot maximálních pórů a nejméně příznivou je opět varianta „B“.

vzorek - horní část	A	A+	B	B+
střední velikost pórů	17,081	13,618	17,209	13,096
rozdíl od A v %		-20,27	+0,75	-23,33

tab. 18 Procentuální rozdíly jednotlivých variant z hlediska střední velikosti pórů u vzorků z horní části odlitku

U spodních vzorků je nejlepší variantou „A+“ stejně jako u hodnot maximálních pórů, nejhorší je varianta „B“.

vzorek - spodní část	A	A+	B	B+
střední velikost pórů	27,066	21,6392	39,050	30,3864
rozdíl od A v %		-20,05	+44,28	+12,27

tab. 19 Procentuální rozdíly jednotlivých variant z hlediska střední velikosti pórů u vzorků ze spodní části odlitku

Z těchto výsledků je patrné, že varianty „A+“ a „B+“ měly svoje opodstatnění a přinesli jisté zlepšení strukturních vlastností. Souhrn vlivu ostatních variant na pórovitost vzhledem k variantě „A“ viz tab. 20. U horního vzorku se jeví jako nejlepší varianta „B+“, jak pro maximální rozměr póru, tak

pro střední velikost pórů. U spodního vzorku je z těchto dvou hledisek nejlepší varianta „A+“. Je tedy patrné, že není zcela možné jednoznačně určit, která z variant lití z hlediska pórovitosti je nejlepší pro praktické použití. Pokud se však zamyslíme nad významem varianty spodního lití, z hlediska pórovitosti, je zřejmé, že má význam se touto problematikou v budoucnu hlouběji zabývat.

horní vzorek	pořadí variant vzhledem k variantě A		
Max. rozměr póru	B+	A+	B
hodnota v %	-42,21	-35,86	+23,33
Střední rozměr póru	B+	A+	B
hodnota v %	-23,33	-20,27	+0,75
spodní vzorek	pořadí variant vzhledem k variantě A		
Max. rozměr póru	A+	B+	B
hodnota v %	-33,87	-19,71	-8,61
Střední rozměr póru	A+	B+	B
hodnota v %	-20,05	+12,27	+44,28

tab. 20 Souhrn vlivu ostatních variant na pórovitost vzhledem k variantě „A“

Pro způsob lití „B“ byla vytvořena ve spolupráci s firmou MECAS ESI s.r.o. počítačová simulace, která měla ukázat, jak se bude chovat tekutý kov ve skořepině. Také měla odhalit možné nedostatky při plnění a tuhnutí odlitku. Po konzultaci s pracovníky této firmy byla provedena technologická opatření, která měla nedostatkům zabránit, či je v určité míře eliminovat.

Počítačová simulace ukázala ve spodní části a hlavně v horní části odlitku možný výskyt pórovitosti (obr. 68). To se po provedení metalografického výbrusu a vyhodnocení pórovitosti částečně potvrdilo. Nešlo však o pórovitost okem rozlišitelnou, ale spíše o mikroporozitu. Následná opatření spočívala v obalení nálitku tepelnou izolací a v podstatě i v obalení části odlitku. Po provedení těchto opatření je z grafů 4 – 12 patrné zlepšení pórovitosti, jak u vzorků v horní i ve spodní části odlitku. V grafech 13 – 18 je patrné také určité zlepšení charakteristických hodnot pórovitosti u vzorků z horní části i ze spodní části odlitku.

Za pomoci počítačové simulace a zkušeností slévačů bylo tedy možné provést taková opatření, která vedla ke zlepšení charakteristických hodnot pórovitosti. Je tedy možné konstatovat, že je přínosné pomocí počítačového softwaru simulovat plnění keramické skořepiny různými způsoby. Výsledky simulací dávají relativně dobrý výsledek, který se v určitých aspektech shoduje s reálnými výsledky.

Dalším postupem ve vývoji technologie vytavitelného modelu by měly být pokusy se začleněním filtru do vtokové soustavy a zjištění jeho vlivu na strukturní vlastnosti odlitku. Před vlastním praktickým experimentem by bylo vhodné tuto variantu opět simulovat, aby se předešlo ekonomickým ztrátám, jelikož simulace dá pro tento konkrétní odlitek relativně objektivní výsledky. Tato problematika má rozhodně své kouzlo a bylo by dobré se jí i dále v budoucnu věnovat. Je však tak rozsáhlá, že není možné ji obsáhnout do této práce. Druhou stranou mince je ekonomická stránka věci, na kterou je třeba brát také velký ohled, zejména v našem slévárenském prostředí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a		konstanta závislá na slitině
„a“		označení vtokové soustavy
„b“		označení vtokové soustavy
„A“		způsob lití
„A+“		způsob lití
„B“		způsob lití
„B+“		způsob lití
DAS	[μm]	vzdálenost sekundárních os dendritů
FDU		odplyňovací jednotka
n		konstanta (0,3 – 0,5)
t_f	[s]	místní doby tuhnutí
USD		americký dolar
X		označení matečné formy a voskového modelu
Y		označení matečné formy a voskového modelu
$\alpha(\text{Al})$		homogenní tuhý roztok hliníku

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] John, B.: Pět tisíc let přesného lití, Slévárství, 1997, č. 10, str. 362-364
- [2] Horáček, M.: Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu, Slévárství, 2001, č. 10, str. 564-570
- [3] Horáček, M.: Technologie vytavitelného modelu – technologie pro nové tisíciletí, Slévárství, 2001, č. 10, str. 570-580
- [4] Herman, A.: Přesné lití na vytavitelný model, <http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>. - 15.4.2008
- [5] Horáček, M., Cileček, J.: accurate and complex NET – SHAPE casting for challenging markets, 67.SSK Harrogate, 2006, č.73, přednáška 73
- [6] Roučka, J.: Metalurgie neželezných slitin, Akademické nakladatelství CERM Brno, 2004, ISBN 80-214-2790-6
- [7] Jolly, M., Cox, M. a kolektiv: Quiescent filling applied to investment casting, Modern casting, 2002, č. 12, str. 36-38
- [8] Kábová H.: Počítačová simulace jako prostředek k urychlení předvýrobních etap, Slévárství, 2002, č. 8-9, str. 328-331
- [9] Nová, I.: Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků jako účinný nástroj jakostních odlitků, Slévárství, 2002, č. 8-9, str. 322-325
- [10] Cileček, J.: Přesné lití na prahu třetího tisíciletí, Slévárství, 2001, č.10
- [11] Williams, R., Horáček, M., Hirst, R.: Přehled světové výroby odlitků litých na vytavitelný model, Slévárství, 2005, č. 1
- [12] http://www.efunda.com/processes/metal_processing/invest_casting.cfm
- [13] http://users.lmi.net/drewid/Lost_Wax_Casting.html
- [14] <http://www.investmentcastingindia.com/facts.htm>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Naměřené hodnoty DAS

Příloha 2 - Naměřené charakteristické hodnoty pórovitosti

Příloha 1

vzorek	1	2	3	4	5	6	7
ID1 DAS [μm]	66,56	63,01	61,88	63,65	63,99	71,13	72,71
ID2 DAS [μm]	69,44	64,67	61,02	65,44	64,41	81,47	71,76
ID3 DAS [μm]	65,74	69,05	66,68	63,24	63,51	68,41	68,61
ID4 DAS [μm]	66,87	57,87	60,14	60,46	64,64	88,83	67,83
ID5 DAS [μm]	65,32	64,51	58,04	65,88	64,02	78,68	68,92
ID6 DAS [μm]	61,78	62,64	72,52	63,03	63,92	82,04	80,92
ID7 DAS [μm]	69,32	58,16	58,44	64,44	68,81	69,93	83,18
ID8 DAS [μm]	68,77	67,22	61,38	65,81	71,45	77,07	71,41
ID9 DAS [μm]	67,17	62,79	63,58	70,66	71,66	74,82	72,46
ID10 DAS [μm]	64,29	66,91	65,81	64,24	70,67	82,72	73,33
ID11 DAS [μm]					64,84		
ID12 DAS [μm]							
ID13 DAS [μm]							
průměrná DAS [μm]	66,526	63,683	62,949	64,685	66,538	77,510	73,113
	B+	B	B	B	B	B+	B+

vzorek	8	9	10	11	12	13	14
ID1 DAS [μm]	68,43	73,48	79,5	64,63	67,44	70,36	72,83
ID2 DAS [μm]	64,91	67,74	67,01	70,06	86,26	86,91	76,83
ID3 DAS [μm]	66,38	72,49	66,75	65,78	67,82	79,28	71,76
ID4 DAS [μm]	75,67	71,46	72,43	70,77	71,26	78,13	73,65
ID5 DAS [μm]	61,49	66,5	67,98	66,12	74,63	76	76,38
ID6 DAS [μm]	67,85	67	66,75	78,06	64,16	73,13	76,32
ID7 DAS [μm]	68,83	76,77	67,48	67,72	68,8	70,69	80,19
ID8 DAS [μm]	66,99	69,66	73,19	68,98	64,43	66,79	78,58
ID9 DAS [μm]	72,74	68,3	59,6	73,55	65,54	65,42	70,28
ID10 DAS [μm]	74,48	70,63	65,94	72,33	69,53	65,13	72,77
ID11 DAS [μm]	71,98			80,83			
ID12 DAS [μm]	68,9						
ID13 DAS [μm]	76,34						
průměrná DAS [μm]	69,615	70,403	68,663	70,803	69,987	73,184	74,959
	A	A+	A+	A	A	A+	A+

vzorek	3"	7"	8"	10"
ID1 DAS [μm]	53,61	55,71	60,63	58,36
ID2 DAS [μm]	54,96	59,73	61,21	57,51
ID3 DAS [μm]	56,87	52,32	61,92	65,68
ID4 DAS [μm]	48,21	65,3	65,1	60,94
ID5 DAS [μm]	53,81	75,45	59,91	57,3
ID6 DAS [μm]	56,17	58,75	64,85	60,05
ID7 DAS [μm]	60,49	61,16	62,9	60,05
ID8 DAS [μm]	55,24	59,27	57,33	58,56
ID9 DAS [μm]	60,6	53,9	61,64	58,04
ID10 DAS [μm]	53,58	61,14	62,49	56,97
průměrná DAS [μm]	55,354	60,273	61,798	59,346
	B	B+	A	A+

Příloha 2

VZOREK 1	B+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0029</i>	39,928	12,621	8,281	0,619	0,346
<i>P0030</i>	36,887	14,042	9,498	0,471	0,352
<i>P0031</i>	38,614	13,585	7,827	0,499	0,288
<i>P0032</i>	62,059	14,425	8,905	0,506	0,283
<i>P0033</i>	32,019	12,931	7,378	0,519	0,230
<i>P0034</i>	121,470	16,847	10,997	0,537	0,324
<i>P0035</i>	43,403	14,574	10,004	0,634	0,396
<i>P0036</i>	58,044	12,548	7,363	0,603	0,286
	121,470	13,947	8,782	0,549	0,313

VZOREK 2	B				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0147</i>	106,639	15,391	7,747	0,429	0,182
<i>P0148</i>	246,624	28,706	15,871	0,452	0,219
<i>P0149</i>	56,705	18,672	9,284	0,431	0,303
<i>P0150</i>	100,537	18,314	10,411	0,418	0,299
<i>P0151</i>	134,888	20,894	11,535	0,653	0,408
<i>P0152</i>	89,082	16,128	9,579	0,470	0,302
<i>P0153</i>	35,858	13,774	8,345	0,445	0,257
<i>P0154</i>	314,237	25,716	16,617	0,539	0,301
	314,237	19,699	11,174	0,480	0,284

VZOREK 3	B				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0090</i>	95,739	20,926	11,043	0,437	0,223
<i>P0091</i>	46,588	14,739	8,500	0,423	0,248
<i>P0092</i>	34,679	13,411	6,969	0,467	0,207
<i>P0093</i>	29,295	14,328	7,580	0,415	0,172
<i>P0094</i>	37,093	14,305	7,776	0,435	0,206
<i>P0095</i>	96,396	19,609	10,751	0,477	0,236
<i>P0096</i>	40,187	14,762	8,372	0,419	0,211
<i>P0097</i>	108,014	22,186	13,136	0,417	0,221
<i>P0098</i>	63,405	14,422	7,836	0,439	0,223
	108,014	16,521	9,107	0,436	0,216

VZOREK 3"	B				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0152</i>	481,486	35,408	23,257	0,341	0,218
<i>P0153</i>	282,892	25,192	16,794	0,465	0,360
<i>P0154</i>	439,649	36,270	25,248	0,465	0,398
<i>P0155</i>	366,668	38,133	25,429	0,334	0,239
<i>P0156</i>	339,931	30,265	20,592	0,378	0,220
<i>P0157</i>	490,145	57,546	43,401	0,451	0,316
<i>P0158</i>	493,501	49,291	33,514	0,375	0,278
<i>P0159</i>	437,630	40,214	28,445	0,458	0,404
<i>P0160</i>	386,662	39,131	25,084	0,470	0,310
	493,501	39,050	26,863	0,415	0,305

VZOREK 4	B				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0047</i>	36,712	14,168	10,793	0,673	0,509
<i>P0048</i>	61,017	15,134	10,783	0,624	0,496
<i>P0049</i>	64,210	17,721	12,218	0,644	0,432
<i>P0050</i>	49,985	18,088	11,243	0,427	0,284
<i>P0051</i>	48,405	12,603	7,372	0,458	0,262
<i>P0052</i>	82,647	17,755	10,897	0,339	0,259
<i>P0053</i>	174,869	15,470	8,881	0,479	0,271
<i>P0054</i>	42,719	14,808	8,834	0,413	0,251
<i>P0055</i>	87,358	16,035	11,884	0,571	0,407
<i>P0056</i>	130,593	17,086	11,051	0,508	0,307
<i>P0057</i>	168,269	25,056	13,101	0,588	0,403
	174,869	16,720	10,641	0,520	0,353

VZOREK 5	B				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0128</i>	31,857	10,816	6,762	0,597	0,342
<i>P0129</i>	65,278	16,435	10,190	0,522	0,312
<i>P0130</i>	64,334	16,348	10,446	0,523	0,299
<i>P0131</i>	127,059	20,737	12,494	0,535	0,286
<i>P0132</i>	141,754	14,307	8,078	0,470	0,246
<i>P0133</i>	68,800	13,914	8,898	0,516	0,311
<i>P0134</i>	42,413	14,429	24,385	0,497	0,912
<i>P0135</i>	181,402	16,531	10,776	0,467	0,255
<i>P0136</i>	297,846	19,552	12,688	0,536	0,323
	297,846	15,897	11,635	0,518	0,365

VZOREK 6	B+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0068</i>	58,866	16,157	11,317	0,551	0,342
<i>P0069</i>	78,279	16,377	9,899	0,534	0,281
<i>P0070</i>	118,984	15,090	8,836	0,625	0,307
<i>P0071</i>	110,229	12,163	7,520	0,573	0,293
<i>P0072</i>	81,504	12,621	7,807	0,563	0,292
<i>P0073</i>	44,566	12,989	7,941	0,547	0,316
<i>P0074</i>	44,626	12,719	7,747	0,514	0,255
<i>P0075</i>	86,977	13,960	8,767	0,644	0,348
	118,984	14,009	8,729	0,569	0,304

VZOREK 7	B+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0086</i>	43,318	17,570	11,551	0,544	0,356
<i>P0087</i>	54,888	14,399	9,631	0,586	0,378
<i>P0088</i>	24,606	11,980	8,982	0,698	0,464
<i>P0089</i>	44,372	15,425	10,492	0,627	0,381
<i>P0090</i>	61,477	16,531	11,479	0,623	0,397
<i>P0091</i>	28,465	13,273	9,410	0,645	0,409
<i>P0092</i>	44,929	13,287	9,563	0,722	0,501
<i>P0093</i>	74,073	17,252	10,269	0,729	0,379
	74,073	14,965	10,172	0,647	0,408

VZOREK 7"	B+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0122</i>	169,040	27,585	17,461	0,403	0,246
<i>P0123</i>	167,482	35,375	24,125	0,422	0,288
<i>P0124</i>	114,765	25,427	17,815	0,535	0,347
<i>P0125</i>	315,368	37,662	27,611	0,508	0,374
<i>P0126</i>	280,827	26,151	16,962	0,483	0,320
<i>P0127</i>	178,805	26,675	17,978	0,482	0,274
<i>P0128</i>	216,149	29,100	18,244	0,470	0,355
<i>P0129</i>	197,358	31,337	21,691	0,519	0,358
<i>P0130</i>	433,537	34,165	23,522	0,457	0,296
	433,537	30,386	20,601	0,475	0,317

VZOREK 8	A				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0034</i>	101,635	15,407	10,003	0,480	0,284
<i>P0035</i>	77,210	14,670	8,534	0,520	0,310
<i>P0036</i>	26,193	11,615	8,122	0,531	0,362
<i>P0037</i>	55,556	13,781	9,062	0,509	0,348
<i>P0038</i>	58,739	14,520	8,227	0,427	0,231
<i>P0039</i>	52,177	13,343	7,713	0,493	0,218
<i>P0040</i>	44,224	15,221	9,486	0,500	0,321
<i>P0041</i>	150,667	17,510	10,923	0,541	0,293
<i>P0042</i>	34,602	13,910	8,115	0,446	0,234
	150,667	14,442	8,910	0,494	0,289

VZOREK 8"	A				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0165</i>	172,192	24,168	15,733	0,314	0,333
<i>P0166</i>	153,206	24,630	14,832	0,434	0,241
<i>P0167</i>	165,642	25,325	15,585	0,450	0,238
<i>P0168</i>	215,059	35,828	19,147	0,313	0,185
<i>P0169</i>	247,373	17,368	11,098	0,368	0,247
<i>P0170</i>	132,487	19,308	10,996	0,405	0,288
<i>P0171</i>	197,105	21,629	12,460	0,400	0,235
<i>P0172</i>	539,998	44,794	30,094	0,408	0,325
<i>P0173</i>	338,337	30,545	17,930	0,368	0,215
	539,998	27,066	16,431	0,384	0,256

VZOREK 9	A+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0054</i>	36,086	9,757	5,681	0,523	0,260
<i>P0055</i>	45,266	9,241	5,927	0,529	0,284
<i>P0056</i>	48,488	10,680	7,360	0,679	0,499
<i>P0057</i>	75,388	16,090	12,894	0,526	0,395
<i>P0058</i>	17,726	9,177	6,068	0,462	0,323
<i>P0059</i>	32,047	8,719	5,526	0,522	0,315
<i>P0060</i>	31,579	8,345	5,539	0,560	0,355
<i>P0061</i>	31,688	10,493	6,014	0,447	0,233
	75,388	10,313	6,876	0,531	0,333

VZOREK 10	A+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0072</i>	56,975	16,275	9,150	0,683	0,393
<i>P0073</i>	24,119	11,607	8,382	0,645	0,444
<i>P0074</i>	35,677	13,145	8,345	0,516	0,299
<i>P0075</i>	65,449	14,179	10,041	0,525	0,350
<i>P0076</i>	52,905	14,084	9,879	0,611	0,387
<i>P0077</i>	35,976	13,762	8,682	0,483	0,309
<i>P0078</i>	80,759	13,661	8,791	0,584	0,290
<i>P0079</i>	39,423	15,361	10,610	0,621	0,362
	80,759	14,009	9,235	0,583	0,354

VZOREK 10"	A+				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0184</i>	295,934	19,593	12,914	0,402	0,244
<i>P0185</i>	156,287	17,805	11,209	0,415	0,222
<i>P0186</i>	146,012	18,131	11,072	0,415	0,250
<i>P0187</i>	137,705	18,865	11,804	0,422	0,250
<i>P0188</i>	220,879	25,212	14,665	0,401	0,274
<i>P0189</i>	293,988	21,569	13,276	0,389	0,261
<i>P0190</i>	341,470	29,403	18,944	0,378	0,204
<i>P0191</i>	357,097	28,104	18,665	0,404	0,270
<i>P0192</i>	88,236	16,070	9,994	0,431	0,274
	357,097	21,639	13,616	0,406	0,250

VZOREK 11	A				
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0012</i>	157,187	21,082	16,918	0,635	0,469
<i>P0013</i>	44,662	13,210	8,810	0,535	0,326
<i>P0014</i>	53,224	15,168	9,331	0,525	0,334
<i>P0015</i>	158,640	19,970	14,555	0,525	0,398
<i>P0016</i>	72,293	17,105	12,770	0,615	0,481
<i>P0017</i>	197,966	24,963	14,614	0,602	0,336
<i>P0018</i>	37,043	14,006	9,496	0,633	0,358
<i>P0019</i>	91,096	18,362	12,395	0,593	0,428
<i>P0020</i>	121,997	17,668	11,444	0,643	0,411
	197,966	17,948	12,259	0,590	0,393

VZOREK 12		A			
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0012</i>	150,771	24,611	19,823	0,665	0,428
<i>P0013</i>	25,561	11,532	8,351	0,757	0,403
<i>P0014</i>	52,062	15,836	10,231	0,640	0,410
<i>P0015</i>	157,266	23,922	17,051	0,524	0,359
<i>P0016</i>	71,130	18,915	14,241	0,675	0,515
<i>P0017</i>	195,631	25,459	14,791	0,574	0,312
<i>P0018</i>	36,633	15,339	10,031	0,582	0,304
<i>P0019</i>	90,798	16,999	11,419	0,612	0,403
<i>P0020</i>	121,245	17,066	11,108	0,617	0,426
	195,631	18,853	13,005	0,627	0,396

VZOREK 13		A+			
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0103</i>	36,241	14,557	10,286	0,531	0,431
<i>P0104</i>	102,421	16,864	9,783	0,604	0,376
<i>P0105</i>	36,241	14,816	10,719	0,586	0,450
<i>P0106</i>	46,581	14,612	8,531	0,510	0,323
<i>P0107</i>	40,561	21,063	12,505	0,530	0,336
<i>P0108</i>	35,157	12,718	10,305	0,696	0,493
<i>P0109</i>	54,391	16,640	10,080	0,650	0,296
<i>P0110</i>	90,386	22,602	16,596	0,392	0,325
<i>P0111</i>	40,629	15,852	10,712	0,574	0,344
	102,421	16,636	11,057	0,564	0,375

VZOREK 14		A+			
	Diameter Max [μm]	Diameter Mean [μm]	Diameter Min [μm]	Shape Factor [μm]	Sphericity [μm]
<i>P0011</i>	71,234	12,743	7,681	0,550	0,272
<i>P0012</i>	27,088	12,178	7,080	0,502	0,299
<i>P0013</i>	52,931	14,030	8,164	0,498	0,247
<i>P0014</i>	176,585	14,791	8,892	0,534	0,260
<i>P0015</i>	43,847	13,014	7,970	0,512	0,307
<i>P0016</i>	40,875	12,137	7,476	0,511	0,271
<i>P0017</i>	66,966	12,562	8,583	0,604	0,331
<i>P0018</i>	206,895	16,661	8,958	0,462	0,237
	206,895	13,514	8,100	0,522	0,278