ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh Slitiny mědi na odlitky hudebních nástrojů

Autor: **David Bricín**

Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2013/2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 23. 5. 2014 **. . . . . .**

podpis autora

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá a řeší problematiku výroby drobných odlitků používaných pro výrobu hudebních nástrojů ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Hlavním cílem této práce je návrh řešení, které umožní vyrábět odlitky o nižší vnější a vnitřní poréznosti, která má za následek praskání těchto odlitků. V prvé části této práce- rešeršní je čtenář seznámen s technologií výroby, kterou tato společnost pro výrobu odlitků využívá. Dále je v krátkosti seznámen s dalšími možnými technologiemi, které jsou pro výrobu součástek pro hudební průmysl používány. Po základním seznámení s používanými technologiemi, je čtenář dále seznámen s používanými slitinami a vlastnostmi roztaveného kovu především jeho zabíhavostí. Na tyto dvě kapitoly navazuje kapitola, která se zabývá vadami, které během procesu odlévání vznikají a možnostmi jejich detekce. V navazujících dvou kapitolách je čtenář seznámen se základními výpočty, které se vztahují k návrhu odlitku a procesu odlévání a také je seznámen s prostředím programu PROCAST, který slouží k návrhu procesu odlévání pomocí a pomocí kterého byly provedeny výpočty pro experimentální část této práce.

V druhé experimentální části je řešena vlastní problematika výroby drobných odlitků. V prvé kapitole je čtenář seznámen s dodanými vzorky od společnosti AMATI DEMAK s.r.o. a jejich vyhodnocením. Po této kapitole je dále seznámen s návrhem řešení nalezené problematiky a výsledky simulačního výpočtu pro jednotlivé varianty, které byly získány za použití výše zmíněného programu PROCAST. Za touto kapitolou práce pokračuje vyhodnocením druhé skupiny vzorků, které byly vyrobeny- odlity ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. na základě výsledků simulačního výpočtu. Touto kapitolou se tato diplomová práce dostává do svého závěru, v kterém je provedena vlastní diskuse nad výsledky získanými během jejího zpracování. V úplném závěru práce je uvedeno její celkové zhodnocení a doporučení pro další postup při výrobě- odlévání drobných součástek pro hudební průmysl ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o.

Klíčová slova

Odlévání, odlitek, zabíhavost, poréznost, simulace, PROCAST

Abstract
This thesis deals with and addresses the issue of production of small castings used for making musical instruments at AMATI DEMAK s. r. o. The main objective of this work is to design a solution that will allow the manufacture of castings with lower external and internal porosity which results in cracking of the casting. In the first part of this work - research , the reader learns about the technology which the company uses for castings. (S)he is briefly acquainted with other kinds of technologies that are used to make components for the music industry. After a basic introduction to the technology used , the reader is familiarized with the applicable alloys and molten metal properties especially its fluidity. These two chapters are followed by a chapter dealing with the defects that arise during the casting process and the possibilities of their detection. In the next two chapters the reader gets familiar with the basic calculations that relate to the draft casting and casting process and with the environment of Procast , which is used to design the casting process through and through which the calculations for the experimental part of this work were performed.
The second experimental part deals with the problems of small castings production . In the first chapter the reader gets familiar with supplied samples from AMATI DEMAK Ltd and their evaluation. After this chapter they also learn about configuration of the issues found and the results of the simulation calculation for individual variants that were obtained using the above mentioned program Procast . In the next chapter, the work evaluates the second group of samples that have been made - cast at AMATI DEMAK Ltd based on the results of the simulation calculation . The following chapter of this thesis incorporates a conclusion that is performed in a private discussion of the results obtained during its processing. The last part of the thesis includes the overall assessment and recommendations for next steps in producing, i.e. the casting of small parts for the music industry at AMATI DEMAK Ltd.

Keywords
Cast , casting, fluidity , porosity , simulation, Procast

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posíleni spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavy a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji -

CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů diplomové práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

Tato práce byla řešena v rámci projektu ESF OPVK „Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství – integrity povrchu“, reg.č. CZ.1.07/2.3..00/20.0037.

Tato práce vznikla na základě řešení voucheru Karlovarského kraje, který financoval řešení projektu „Zpracování vývoje výroby speciálních odlitků“.

Dále bych chtěl poděkovat Petru Kvasníkovi ze společnosti AMATI DEMAK s.r.o., panu Františku Hirschovi ze společnosti MECAS ESI GROUP s.r.o., společnosti GAMALUX s.r.o. Ing. Ivanu Vorlovi a dalším, kteří mi s řešením této diplomové práce velmi pomohli.

Obsah

1 Úvod ... 1
2 Rešeršní část diplomové práce ... 2
3 Používané technologie a materiály ... 2
3.1 Charakteristika technologie výroby hudebních dílů ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. 2
3.2 Charakteristika technologie výroby hudebních dílu u konkurenčních firem ... 8
3.2.1 Výroba součástí hudebních nástrojů tvářením ... 8
3.2.2 Výroba součástí hudebních nástrojů litím ... 9
3.3 Závěr: porovnání výrobních technologií ... 12
3.4 Materiály používané ve společnosti AMATI s.r.o. a u konkurenčních firem ... 14
3.5 Porovnání používaných materiálů ... 16
4 Vlastnosti odlévaného kovu a vady způsobené použitou výrobní technologií ... 18
4.1 Vlastnosti odlévaného kovu ... 18
4.1.1 Vady odlitků ... 21
5 Možnosti detekce vad ... 25
6 Predikce vad ... 27
6.1 Základní typy výpočtů procesu odlévání ... 27
6.2 Simulační výpočet procesu odlévání ... 30
6.3 Výhody a nevýhody výpočtu pomocí simulačního softwaru ... 36
7 Experimentální část diplomové práce ... 37
8 Zhodnocení dodaných vzorků- rozdělení do skupin ... 38
8.1 Nalezené vady ... 39
8.1.1 Slitina CuNi12Zn24 ... 39
8.1.2 Slitina s typovým označením N31 ... 42
8.1.3 Slitina CuZn30 ... 46
8.2 Závěrečné zhodnocení dodaných vzorků ... 48
9 Možnosti řešení, Návrh na snížení vad ... 49
9.1 Změna rozložení odlitků na licím kůlu a změna rozložení zářezů na odlitku ... 50
9.2 Použití jiných materiálů a jiných licích teplot ... 56
9.2.1 Navrhované materiály ... 57
9.2.2 Navrhované materiály slitiny- porovnání ... 59
9.2.3 Navrhované materiály způsob výběru ... 62
9.2.4 Navrhovaní kandidáti- praktické potvrzení správnosti volby ... 64

10 Diskuse výsledků 67
11 Závěr 70
12 Seznam grafů, obrázků a tabulek 72
13 Citovaná literatura: 74

1 Úvod

Výroba hudebních nástrojů má v českých zemích dlouholetou tradici. Nadarmo se neříká: „Co Čech, to muzikant“. Avšak každá výroba i ta hudebních nástrojů je spojena s problémy a to na straně lidských zdrojů (kvalifikace pracovníků, jejich zkušenosti apod.), ale i na straně technické nebo technologické (použití správných materiálů, nástrojů, výrobních zařízeních, postupů apod.). Tato diplomová práce se zabývá a řeší problémy technologického charakteru a to problematiku výroby drobných součástek hudebních nástrojů vyráběných ze slitin neželezných kovů ve společnosti AMATI- DEMAK KRASLICE s.r.o. V této firmě jsou tyto díly vyráběny jedním z nejdéle používaných způsobů odlévání a to pomocí lití na vytavitelný model. Samozřejmě i tento způsob výroby prošel inovacemi, v současné době se ve velké míře používá ve spojení s technologií vakuování. U výše uvedené firmy řeší problém s praskáním těchto drobných odlitků. To je spojeno s vysokou povrchovou a podpovrchovou porézností vyráběných dílů. Tato poréznost má za následek vysokou zmetkovitost během výroby dílu např. klapky na klarinet.

Z výše uvedeného plyne cíl této práce, kterým je navržení vhodné varianty výroby, ale i použitých materiálů, pomocí kterých budou finální výrobky buď zcela bez výše uvedených vad, případně se jejich výskyt omezí do míst, v kterých nebudou bránit funkci výrobku.

Vlastní diplomová práce je rozdělena do dvou částí a to části teoretické a části praktické. Teoretická část nebo-li část rešeršní, popisuje technologii výroby drobných součástek hudebních nástrojů ve výše uvedené společnosti a tuto technologii poté porovnává s technologiemi, které používají jiní výrobci hudebních nástrojů. O těchto dalších technologií pojednává v krátkosti jedna z kapitol rešeršní části práce. Po kapitole, která se zabývá porovnáním používaných technologií, následuje kapitola, která se zabývá materiály, používanými při výrobě součástek hudebních nástrojů a tyto materiály mezi sebou porovnává. Dále následuje kapitola, zabývající se vlastnostmi odlévaného kovu a část, která se zabývá popisem vad, jež vznikají při lití a možnostmi detekce těchto vad. Poslední kapitolou této části práce je část, zabývající se vlastními možnostmi predikce vad o to pomocí klasického výpočtu a výpočtu simulačního. V závěru jsou tyto dva výpočty mezi sebou porovnány.

Na rešeršní část navazuje část praktická neboli experimentální. V této části práce je řešena vlastní problematika odlévání drobných součástek ve výše zmíněné společnosti. Úvodní kapitola experimentální části práce seznamuje čtenáře se stavem odlitých vzorků slitin, které jsou ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. používány. Po seznámení se stavem dodaných vzorků, tedy po detekci vad a porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou, následuje část zabývající se vlastním návrhem řešení této problematiky a to za pomoci simulačního výpočtu procesu lití, kde, je navrženo několik způsobů, jak omezit nebo zcela znemožnit vzniku vad ve vyráběné součástce. Po provedení simulačních výpočtů, bylo u některých postupů provedeno jejich praktické ověření, jehož výsledky se zabývá další část této práce.

Touto podkapitolou se tato diplomová práce dostává ke svému závěru, v kterém probíhá vlastní diskuse nad výsledky experimentální části práce a její celé zhodnocení.

2 Rešeršní část diplomové práce

Tato část diplomové práce se zabývá teorií vtaženou k řešené problematice. Tou se zabývá druhá část práce. V této první části je čtenář seznámen s technologií výroby drobných dílů ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. a dále s technologiemi, které používají jiní výrobci hudebních nástrojů. Poté se zabývá používanými materiály, vlastnostmi odlévaného kovu, vadami, které vznikají během odlévání, jejich detekcí a možnostmi predikce vad.

3 Používané technologie a materiály

První část této kapitoly se zabývá technologií výroby drobných dílů pro hudební nástroje ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Na tuto kapitolu navazuje část zabývající se technologiemi, které používají konkurenční společnosti. Po krátkém srovnání výše zmíněných technologií je uvedena podkapitola zabývající se používanými materiály a jejich vzájemným porovnáním.

3.1 Charakteristika technologie výroby hudebních dílů ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o.

Společnost AMATI DEMAK s.r.o. používá pro výrobu drobných součástek hudebních nástrojů, jako jsou klarinetové klapky technologii lití pomocí vytavitelného modelu. O této technologii blíže pojednává níže uvedený text.

Před vlastním odléváním výrobku je potřeba vyrobit jeho model z tzv. vytavitelného materiálu vosku. K tomu se používají formy na model, viz Obrázek níže.

Obrázek 1:Forma používaná k výrobě vytavitelného modelu- materiál formy silikonový kaučuk[vlastní zdroje].

Materiál formy se volí dle její požadované životnosti a přesnosti výroby modelu. Pro méně přesnou výrobu kusovou, se používají formy sádrové, které mají nízkou životnost. Z tohoto

důvodu se používají hlavně jako formy sloužící k ověření správnosti zvolené technologie výroby. Pro sériovější výrobu se používají formy z nízko tavitelných kovových slitin. Tyto formy mají vyšší životnost, a odolnost proti opotřebení. Pro výrobu tvarově nejsložitějších modelů se používají formy vyrobené z kaučukové hmoty.

Mezi další způsoby výroby forem patří obrábění, které se používá při výrobě forem pro velkosériovou výrobu. Dalšími možnostmi výroby forem jsou výroba metalizováním popřípadě galvanoplasticky.

Před vlastní výrobou modelu je forma složena. Do složené formy je následně buď gravitačně, nebo vstřikováním vpraven vosk, který vyplní modelový prostor formy.

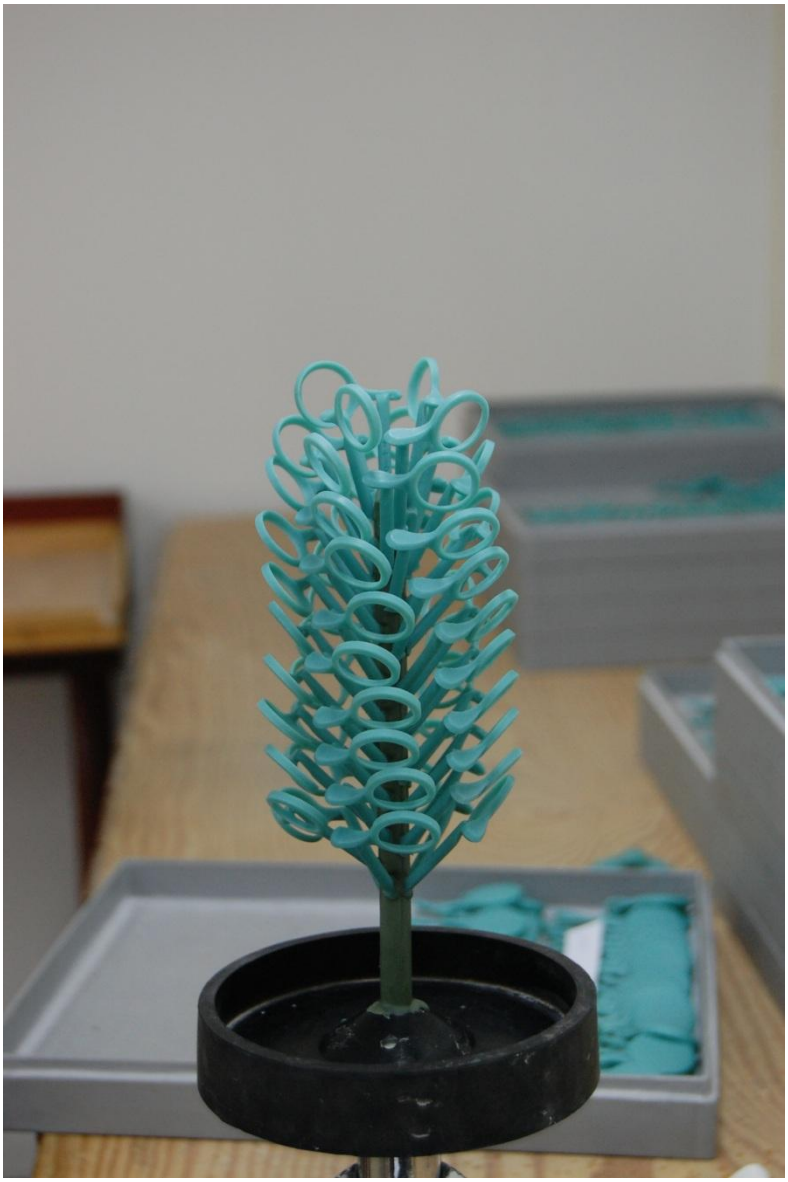
V současné době se v převážné míře používá druhý způsob a to vstřikování plastické hmoty.

Obrázek 2: Vstřikovací stroj sloužící k výrobě modelu [vlastní zdroje].

Výše uvedený obrázek zobrazuje přístroj, v kterém nejprve dojde k roztavení plastické hmoty a ta je poté pod určitým tlakem, daným velikostí formy, za určité teploty, dané použitým typem plastické hmoty, vstřikována v prostředí vakua do připravené formy modelu. Po ztuhnutí je model vyjmut a přechází na další pracoviště, kde dojde k jeho spojení s vtokovým kanálem (vytvoření tzv. stromečku), který se vyrábí obdobným způsobem jako model vyráběné součásti.

Ke spojení modelu a vtokového kanálu se používá buď technologie lepení popřípadě pájení. Vtokový kanál se umístí do vršku formy a na jeho obvod jsou v určitých místech připájeny vlastní modely pro výrobu odlitků.

Níže uvedený obrázek , zobrazuje již vytvořený (spájený) model stromečku.



Obrázek 3: Voskový model stromečku upevněný v horní části formy[vlastní zdroje].

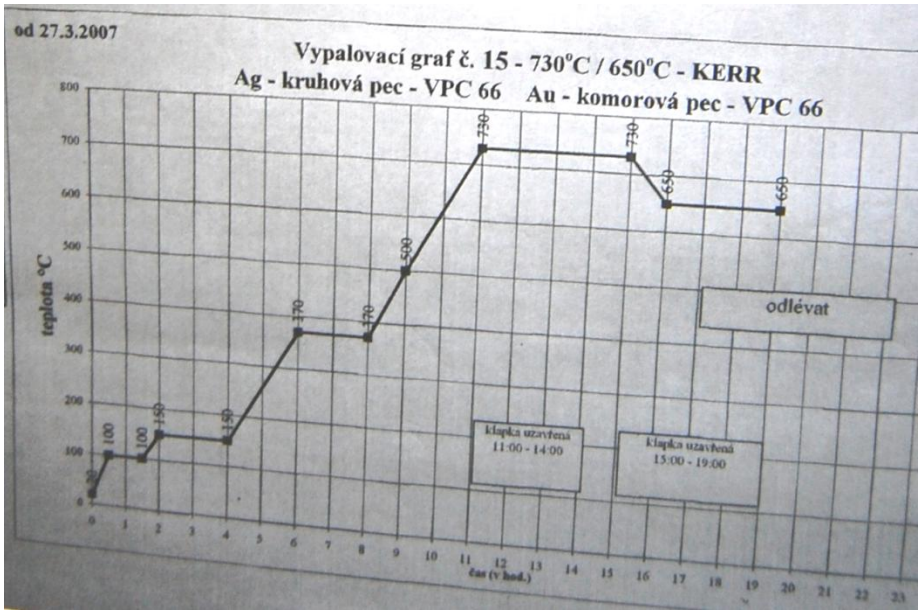
Takto připravený model je následně otočen o 180^0 a je umístěn do kyvety, spodní části formy. V této podobě je na dalším pracovišti vytvořena kolem modelu skořepina v tomto případě ze sádrové hmoty. V jiných případech se používají hmoty keramické.

Níže uvedený obrázek zobrazuje pracoviště, na kterém dochází k vytvoření sádrové skořepiny kolem voskového modelu.

Obrázek 4: Přístroj používaný k vytvoření sádrové skořepiny kolem voskového modelu [vlastní zdroje].

Vytvořená skořepina se dále umisťuje do pece, kde dojde k odstranění vytavení voskového modelu, jejímu vysušení a předehřátí na požadovanou teplotu před vlastním odléváním. Níže uvedený obrázek zobrazuje vypalovací pec, kde je teplota vnitřního prostředí řízena pomocí vaček. Obr. č. 6 zobrazuje průběh vypalovací křivky.

Obrázek 5:Komorová vypalovací pec, kde je průběh teploty řízen pomocí vačkového mechanismu[vlastní zdroje].



Obrázek 6:Graf zobrazující možný průběh vypalovací teploty [vlastní zdroje].

Poté co teplota kyvety dosáhne požadovaného bodu určeného k odlévání, je z pece vyjmuta a přesunuta do odlévacího boxu v peci určené k natavení vsázkového materiálu. Tuto operaci zobrazuje níže uvedený obrázek.

Obrázek 7: Pec určená k natavení vsázkového materiálu s vakuově uzavřeným prostorem určeným pro vlastní lití odlitku [vlastní zdroje].

Po odlití se kyveta ochladí na vzduchu na určitou teplotu, po jejímž dosažení je přemístěna do vodní lázně, v které dojde k rozmočení formy a vyjmutí vlastního odlitku. Získaný odlitek je následně dočištěn tlakovým vzduchem (kapalinou). Níže uvedený obrázek č. 8 zobrazuje výsledný vzhled odlitku stromečku po jeho očištění.

Obrázek 8: Výsledný odlitek po odstranění zbytků usazenin formovacího materiálu [vlastní zdroje].

Poté, co jsou odlitky očištěny, následuje jejich oddělení od vtokového kanálu v tomto případě stříháním. Po ostřižení odlitků následuje jejich vizuální kontrola, během které se zjistí první vady zjistitelné pouhým okem a to nezaběhnutí kovu, vysoká povrchová pórovitost apod. Výrobky, které této kontrole vyhoví, jsou dále zpracovány omíláním, po kterém následuje další vizuální kontrola a vyřazení nevyhovujících odlitků. Odlitky jsou dále leštěny a sestavovány do sestav. Po sestavení následuje stříbření popřípadě jiná povrchová úprava součásti, která dále zlepšuje její vzhled a zvyšuje protikorozní ochranu povrchové vrstvy výrobku. Takto vytvořený finální výrobek je připevněn k tělu hudebního nástroje viz. Níže uvedený obrázek. [1], [2], [3]

Obrázek 9: Odlité díly jsou následně spojeny s ostatními díly do finálního výrobku, v tomto případě klarinetu [vlastní zdroje].

3.2 Charakteristika technologie výroby hudebních dílu u konkurenčních firem

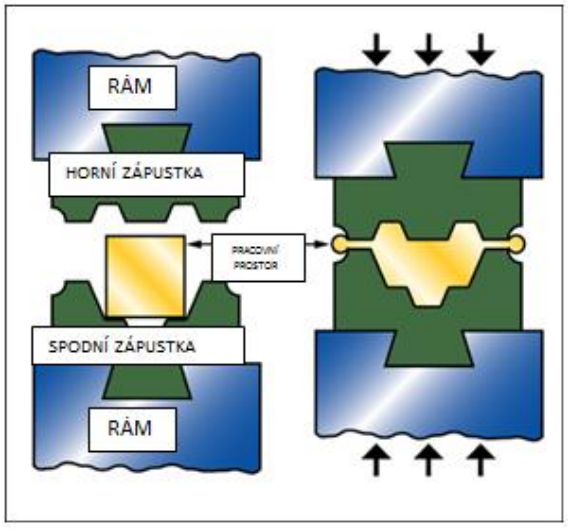
Tato část se zabývá a porovnává různé technologie výroby částí hudebních nástrojů vyráběných z kovových materiálů (klapky na klarinet apod.). V prvé části této kapitoly bude pojednáno o technologiích, které používá konkurence společnosti AMATI DEMAK s.r.o. V druhé části jsou tyto technologie porovnány s technologií používanou ve výše uvedené společnosti. Mezi konkurenční firmy, které se specializují na výrobu hudebních nástrojů, patří společnosti BUFFET GROUP [W. SCHRAIBER], YAMAHA, SCHONDELMAIER a další. Používané výrobní technologie se u těchto společností dají rozdělit do dvou skupin a to tvářecí technologie a technologie lití.

3.2.1 Výroba součástí hudebních nástrojů tvářením

Jako výchozí polotovar se při tomto způsobu výroby hudebních součástek (klapek), používá plechový pás o různé tloušťce, dle velikosti vyráběné součástky- klapky. Z tohoto plechu je buď vyfrézován, případně vystřižen výchozí polotovar budoucí „klapky“. Tento polotovar je následně přesunut na další pracoviště, kde dojde k jeho tváření a to pomocí technologie zápustkového kování.

Technologie zápustkového kování

Technologie zápustkového kování, je technologií, u které dochází k přeměně výchozího polotovaru v konečný tvar součásti pomocí postupné deformace v kovových formách-zápustkách, které dle způsobu zápustkového kování mají konečný tvar součásti (jedno dutinové zápustky), případně nejprve dojde k přemístění materiálu polotovaru do výhodnější polohy a zní, následně dojde v další zápustce vnesením nové deformace do polotovaru k vytvoření finálního tvaru součástky (dvou a více dutinové zápustky). Více dutinové zápustky jsou používány u složitějších tvarů součástek, kde by na jeden zdvih pracovního nástroje nedošlo k vytvoření požadovaného tvaru (příliš velká pracovní síla apod.). Při výrobě součástí na hudební nástroje se používají většinou jedno dutinové zápustky, v některých případech více dutinové.



Obrázek 10: Schéma technologie zápustkového kování [4]

Součásti, které projdou procesem tváření, jsou následně broušeny a to například kvůli odstranění výronku. Výronek vzniká ve výronkové drážce v krajní části formy- zápustky. Jeho funkcí je odvedení přebytečného kovu z prostoru zápustky a vytvoření protitlaku- dokonalé vyplnění zápustky kovem. Po broušení je nutno takto vytvořené součásti spojit dohromady do sestav. To se děje pomocí technologie pájení, která je při vytváření sestav používána i u jiných způsobů výroby. Další postup je shodný s postupem výroby součástí uvedeným v předchozí kapitole.

Při použití technologie lití, lze součásti na hudební nástroje získat více způsoby. Jedním z nich je způsob, který využívá technologii lití na vytavitelný model, jak bylo uvedeno výše, jedná se o způsob používaný ve firmě AMATI DEMAK s.r.o. Další možností je využití technologie tlakového lití. [5]

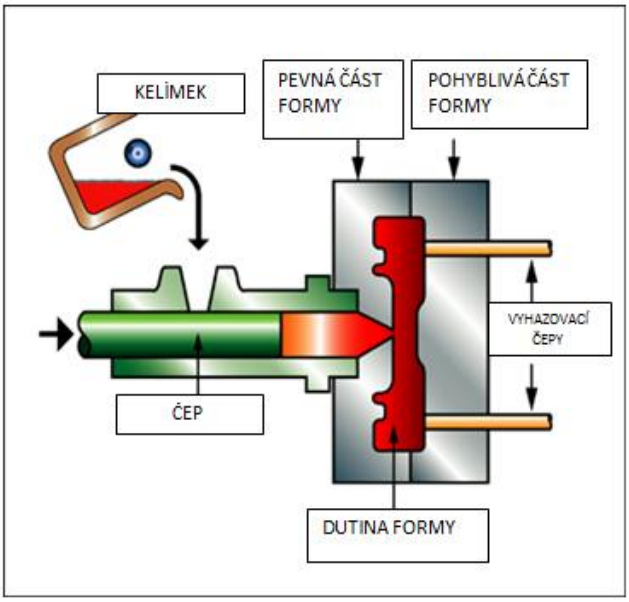
3.2.2 Výroba součástí hudebních nástrojů litím

Technologie tlakového lití

U této technologie je rozlišováno, zdali jsou odlitky odlévány vysokotlakým či nízkotlakým způsobem. U vysokotlakého lití je rozlišováno lití se studenou plnící komorou a s teplou plnící komorou. Při výrobě odlitků z neželezných slitin se uplatňuje především nízkotlaké lití.

Vysokotlaké lití

U tohoto způsobu odlévání je forma zaplněna za použití vysokých tlaků a to až 60-100 MPa. Doba plnění formy je velmi krátká, vyvozený tlak působí, dokud nedojde ke ztuhnutí odlitku. Výhodou vysokotlakého lití je možnost výroby i tvarově složitých tenkostěnných odlitků, přičemž je zachována jejich vysoká rozměrová přesnost. Další výhodou, je vysoká kvalita povrchu, vysoké využití kovu a dobré mechanické vlastnosti odlitku.

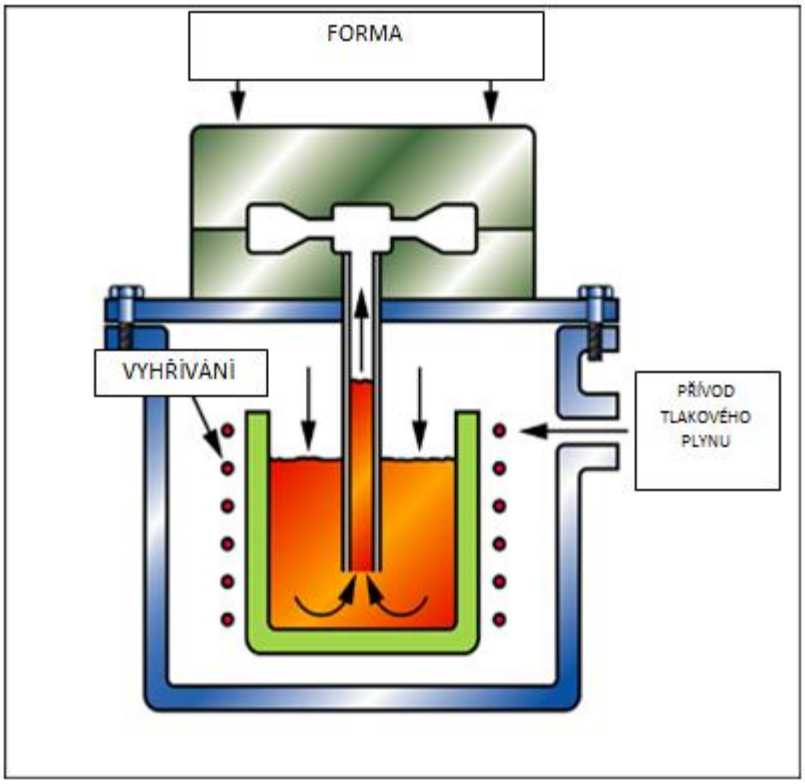


Obrázek 11: Schéma technologie vysokotlakého lití [4].

Nízkotlaké lití

Výhodou tohoto způsobu odlévání je vysoké využití kovu a to až 90-95%. Další výhodou je vysoká kvalita odlitků, odlitky neobsahují vnitřní vady, jako jsou vměstky a bubliny, to díky tomu, že během plnění a tuhnutí nedojde ke kontaktu mezi odlévaným kovem a okolní atmosférou. Zajímavostí u tohoto způsobu odlévání výrobků, je to, že tuhnutí probíhá od shora dolů- tedy obráceně než je tomu u gravitačního způsobu odlévání.

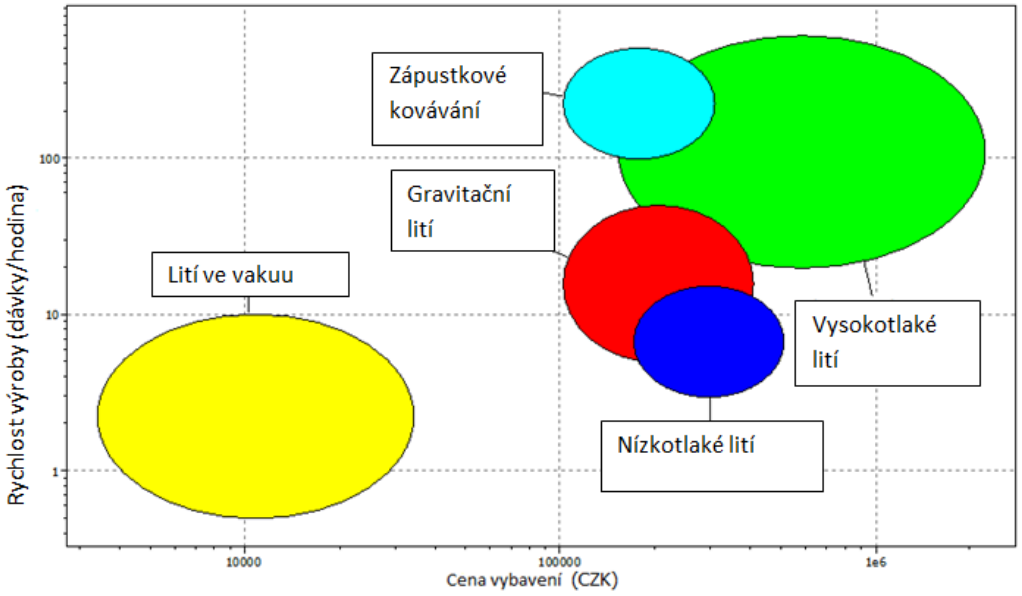
U tohoto způsobu odlévání je odlévací pec umístěna pod formou odlitku. Na hladinu roztaveného kovu působí tlak plynu, jehož vlivem kov začne stoupat plnící trubicí do formy odlitku. Plyn působí tlakem na taveninu v peci do té doby, dokud nedojde ke ztuhnutí kovu ve formě. Plyn působí tlakem 0,03-0,04 MPa. [4], [6]



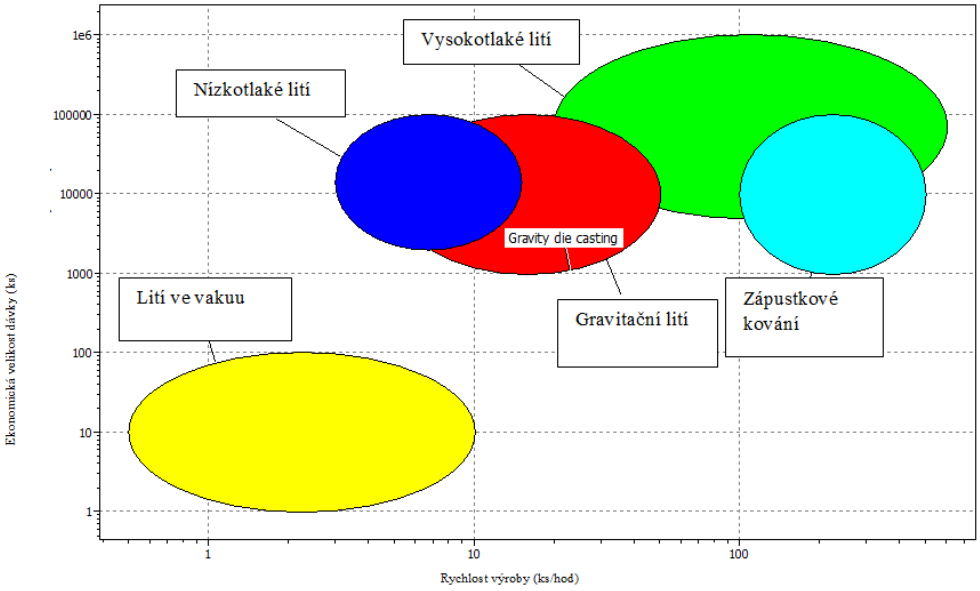
Obrázek 12: Schéma technologie nízkotlakého lití [4]

3.3 Závěr: porovnání výrobních technologií

Výše uvedené technologie byly porovnány a to za použití databáze CES EDUPACK 2011. Používané technologie byly porovnány na základě třech parametrů a to na výši investičních nákladů potřebných na získání konkrétní technologie, na množství výrobků, které je možno zvolenou technologií vyrobit za určitý čas a na velikosti dávky (počtu vyrobených kusů) potřebných pro zaplacení dané technologie. Zjištěné hodnoty byly následně přeneseny do níže uvedených grafů.



Graf 1: Porovnání používaných technologií [4]



Graf 2: Porovnání technologií v závislosti na velikosti výrobní dávky a rychlosti výroby [4]

Z výše uvedených grafů, které porovnávají technologie výroby drobných součástek hudebních nástrojů, je patrné, že technologií lití ve vakuu se nedá dosáhnout výrobnosti srovnatelné s technologií tváření a však tato nevýhoda je vykompenzována nižší pořizovací cenou a menší potřebou velkých výrobních dávek, které jsou nutné pro zajištění návratnosti nákladů na pořízení nákladnějších technologií, jako jsou technologie lití pod tlakem a tváření v zápustkách.

Výše uvedené grafy poukazují pouze na některé faktory, které ovlivňují konečnou volbu používané technologie. Volba technologie, je dále závislá na ekonomické situaci podniku, kvalifikaci zaměstnanců, požadovaném množství vyráběných výrobků atd. Těchto faktorů, které volbu technologie ovlivňují, je celá řada. Zde byly uvedeny tři základní. Hlavním úkolem výše uvedených grafů, bylo upozornit na to, že volbu vhodné technologie výroby ovlivňuje velké množství faktorů a společnost se při volbě vhodné technologie výroby nesmí spoléhat jen na jeden faktor, ale musí brát v potaz více faktorů se zaměřením na ty faktory, které jsou pro firmu nejdůležitější.

Firma AMATI DEMAK s.r.o. je firma, která se zaměřuje převážně na exportní činnost. Její výrobky jsou k dostání po celém světě. Avšak na trhu s hudebními nástroji panuje velká konkurence, která možné množství prodaných výrobků snižuje. Díky tomu a dalším faktorům jako je cena výrobku apod., se firma AMATI DEMAK s.r.o. rozhodla využívat pro výrobu drobných součástek pro hudební nástroje technologii odlévání na vytavitelný model ve vakuu a to i přesto, že tato technologie, nezaručí výrobu výrobků bez vnitřních a vnějších vad (řediny, staženiny, nezaběhnutí apod.), ale i přesto se společnosti vyplatí tuto technologii využívat, protože množství dodávaných součástek, je tak velké, že se tato technologie pro pokrytí potřeb trhu stále vyplácí. [4]

3.4 Materiály používané ve společnosti AMATI s.r.o. a u konkurenčních firem

Materiály, používané k výrobě drobných částí hudebních nástrojů, jako jsou klarinetové klapky, nelze rozdělit přesně mezi konkrétní výrobce. Sortiment používaných materiálů se neustále mění. Z toho důvodu je v této části práce pojednáno o pěti často používaných materiálech. První tři jsou materiály, které jsou v současné době používány ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. a týká se jich experimentální část této práce. Druhé dva jsou materiály, které byly u této společnosti nebo u její konkurence k výrobě drobných odlitků používány.

Tyto materiály se v první řadě dají rozdělit do dvou skupin a to na skupinu mosazí a bronzů.

Skupinu mosazí tvoří slitiny CuZn30, CuZn40, N31 a slitina CuNi12Zn24. Mosazi jsou obecně slitinami mědi, u kterých je hlavním legujícím prvkem zinek. Tyto slitiny mají dobrou zabíhavost a to kvůli malému intervalu mezi teplotou solidu a likvidu.[1] Tento rozdíl je možno ovlivnit dalšími legujícími prvky např. niklem. Jejich nevýhodou je smrštění, které dosahuje přibližně hodnoty 1,5%. Mezi časté legující prvky patří nikl, který zvyšuje houževnatost a odolnost slitin proti korozi, mangan, který zvyšuje pevnost a korozní odolnost slitiny a např. železo, které se podílí na zjemnění zrna a na zpevnění její matrice.

Slitiny mosazí se kromě výše zmíněných drobných součástek pro hudební průmysl používají například pro armatury, ventily, ložiska apod.

Skupinu bronzů zde zastupuje slitina CuSn10, která spadá do skupiny cínových bronzů, tedy do slitin, u kterých je hlavním legujícím prvkem cín. Tato slitina se kromě výše uvedeného používá pro výrobu součástí, které jsou velmi namáhány a to např. na součástky kompresorů nebo turbín. Mechanické vlastnosti cínových bronzů se mění v závislosti na obsahu cínu ve slitině.[2] Při vzrůstajícím obsahu cínu vzrůstá pevnost slitiny, avšak klesá tažnost a elektrické vlastnosti slitiny. Mezi legující prvky cínových bronzů patří železo, které zjemňuje strukturu a zvyšuje jejich pevnost, olovo, které zlepšuje jejich obrobitelnost a například fosfor, který zvyšuje pevnost slitiny, ale zapříčiňuje u ní pokles plastičnosti.

Níže uvedená tabulka porovnává mezi sebou základní mechanické vlastnosti výše uvedených slitin. První tři slitiny jsou slitiny, které jak bylo uvedeno výše, jsou používány ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Jedná se o slitiny CuZn30, CuNi12Zn24 a slitinu N31. Druhé dva materiály jsou slitinami, které byly používány u této firmy a u konkurenčních firem v minulosti. [7], [4]

[1] *Interval teplot mezi likvidem a solidem slitin typu Cu-Zn, pro různá chemická složení je dobře patrný*

[2] Jakým způsobem ovlivňuje obsah cínu slitiny typu Cu-Sn například rozdíl mezi teplotami solidu a likvidu, je dobře patrné z rovnovážného diagamu slitiny. Ten je dostupný například v *publikaci: Baker, Hugh; ASM HANDBOOK VOL. 3: Alloy Phase Diagrams, vydavatel ASM INTERNATIONAL, dostupné například v univerzitní knihovně Západočeské univerzity v Plzni*

Tabulka 1: Vlastnosti nejčastěji používaných slitin[3]

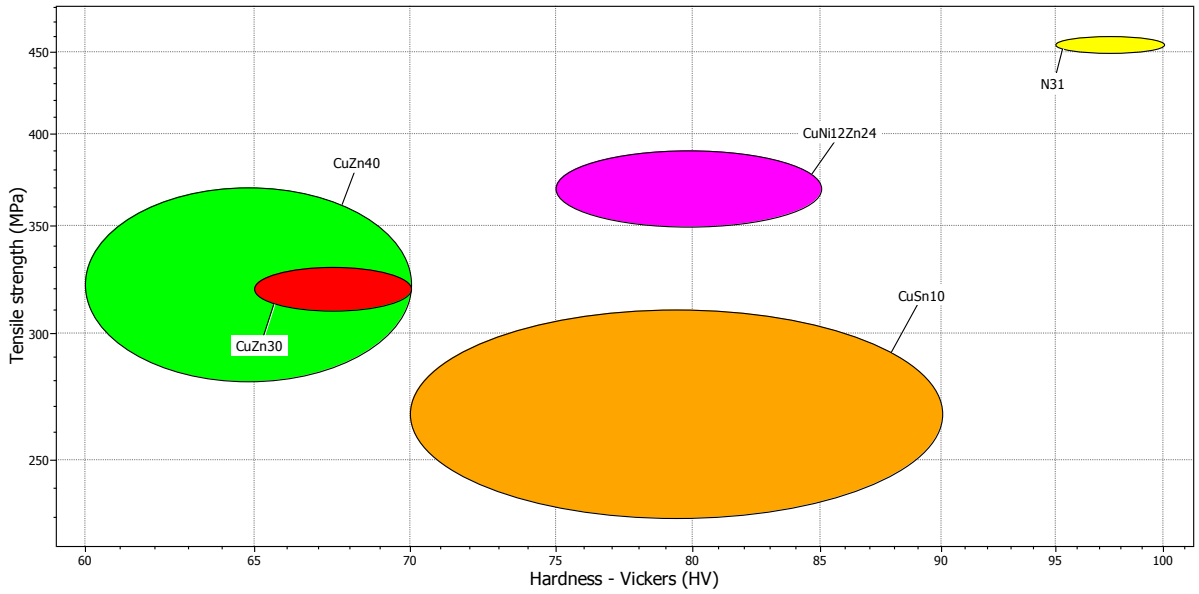
Materiál CuZn30:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
915	955					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRB):					
303-896	55-93					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Zn:			
8,53		70	30			
Materiál N31:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
548	895					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRB):					
470-740	130-200					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Zn:	Ni:	Pb:	Mn:
8,1		49	39	7	3	2
Materiál CuNi12Zn24:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
872	1059					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRB):					
365-634	60-90					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Zn:	Ni:	-	
8,7		64	24	12	-	
Materiál CuSn10:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
712	997					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRB):					
455-1013	55-103					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Sn:	-	-	-
8,78		90	10	-	-	-
Materiál CuZn40:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
900	905					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
360-495	45-90					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Zn:	-	-	-
8,39		60	40	-	-	-

[3] *Data uvedená ve výše uvedené tabulce byla získána pomocí simulačního výpočtu v programu PROCAST a výsledek byl ověřen publikací ASM HANDBOOK VOL. 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose materials; vydavatel ASM INTERNATIONAL, dostupné například v univerzitní knihovně Západočeské univerzity v Plzni*

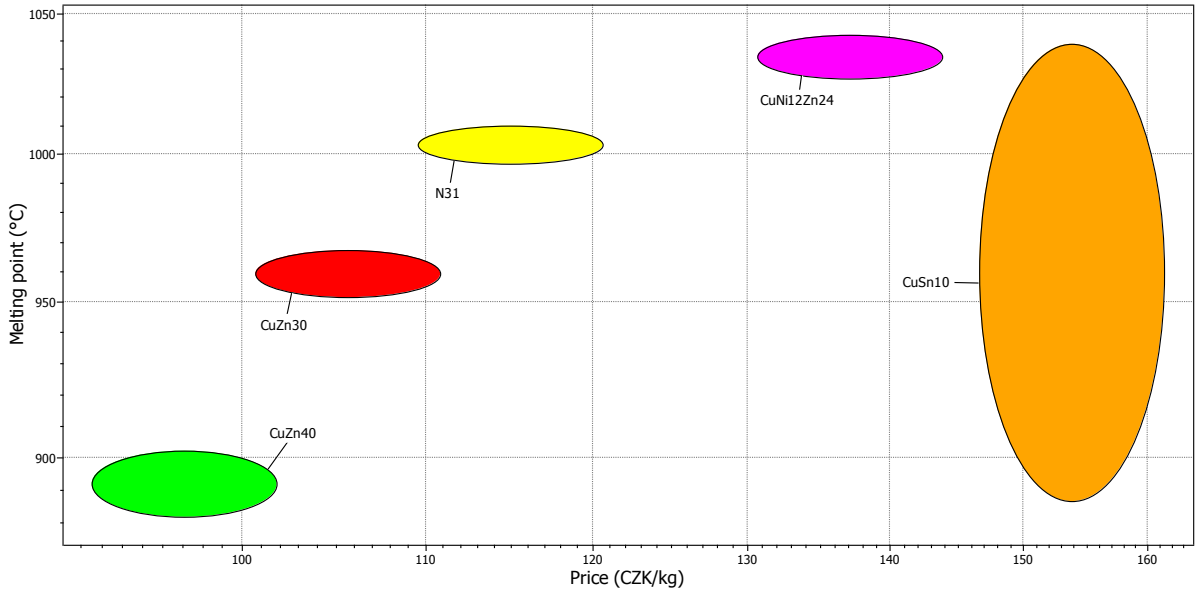
3.5 Porovnání používaných materiálů

Výše uvedené slitiny, byly následně mezi sebou porovnány. Porovnání bylo provedeno na základě mechanických vlastností a to tvrdosti a pevnosti v tahu a dále na základě pořizovací ceny jednoho kilogramu dané slitiny a rozmezí teplot mezi solidem a likvidem.

Níže uvedený graf zobrazuje srovnání vybraných slitin a to v závislosti na pevnosti v tahu a na dosahované tvrdosti.



Graf 3:Porovnání používaných materiálů v závislosti na jejich pevnosti v tahu a tvrdosti [4]



Graf 4: Porovnání používaných materiálů v závislosti na ceně a rozmezí teploty tavení [4]

Z výše uvedených grafů, které srovnávají vybrané vlastnosti slitin používaných k výrobě drobných částí hudebních nástrojů je patrné, že slitinami s nejvyšší pevností jsou slitiny na bázi mědi a zinku, které obsahují jako další legující prvek nikl. Díky niklu, u těchto slitin ovšem roste cena a také stoupá teplota odlévání . Teplota lití má vliv na rychlost opotřebovávání výrobního tavícího zařízení pece. Oproti tomu jsou používány také slitiny s nižší pořizovací cenou. U těchto slitin je ovšem nutné počítat s horšími mechanickými vlastnostmi oproti výše uvedeným komplexnějším slitinám. Výhodou těchto slitin, je dále nižší teplota lití, s čímž je spojeno nižší opotřebení výrobního zařízení.

Výše uvedené grafy samozřejmě neobsahují všechny faktory, které ovlivňují volbu materiálu. Jejich hlavním úkolem je upozornit na to, že volbu vhodného materiálu, pro výrobu součástek ovlivňuje velké množství faktorů. Mezi další důležité faktory patří např. tažnost slitiny, chemické složení a vnitřní čistota, neboli poréznost vytvořené součástky, která závisí jednak na použité technologii odlévání, ale dále i na vlastnostech odlévaného kovu a vlastnostech slévárenské formy. Problematikou vlastností odlévaného kovu se zabývá další kapitola této práce- Vlastnosti odlévaného kovu a vady způsobené použitou výrobní technologií. [4]

4 Vlastnosti odlévaného kovu a vady způsobené použitou výrobní technologií

Tato kapitola diplomové práce rozebírá vlastnosti odlévaného kovu, na které je nutné brát při volbě vhodné slitiny zřetel. V první části této kapitoly je čtenář seznámen s vlastnostmi odlévaného kovu, jako je zabíhavost nebo povrchové napětí. V druhé části je pak seznámen s vadami, odlitků, které vznikají vlivem různých faktorů působících během vlastního procesu odlévání a následného tuhnutí slitin.

4.1 Vlastnosti odlévaného kovu

Výrobu odlitků nelze hodnotit jen na základě fyzikálních a chemických vlastností odlévané slitiny. Dále je nutné brát v úvahu také vzájemný vztah mezi formou a odlévanou slitinou. Jednou ze základních vlastností, která se při výrobě odlitků hodnotí je zabíhavost odlévané slitiny.

Zabíhavost charakterizuje schopnost slitiny vyplnit vnitřní prostor formy. Ve své podstatě musí platit, že síly způsobující pohyb taveniny musí překonat odpor působící proti němu. Během odlévání slitiny dochází k jejímu ochlazení, dále působí tření uvnitř kovu a mezi kovem
a formou. Vlivem těchto faktorů dochází k růstu odporu a snížení pohybové energie odlévané slitiny. Pokud působící odpory narostou do vyšší míry, než je pohybová energie odlévané slitiny, dojde k zastavení proudu kovu před úplným zaplněním dutiny formy. Zabíhavost slitin je dána především vlastnostmi odlévaného kovu, vlastnostmi formovacího materiálu, poté je závislá na konstrukci odlitku a na podmínkách plnění formy. Zabíhavost slitiny, je možné dopočítat dle níže uvedeného vzorce.

$$L_f = \frac{a \cdot \rho \cdot H \cdot v_0}{2 \cdot h \cdot (T_m - T_0)} \text{ [8]}$$

Kde:

a… poloměr kanálu (cm)

ρ… hustota odlévaného kovu (g/cm^3)

v_0… počáteční rychlost proudu kovu (cm/s)

T_0… teplota formy (^{0}C)

H… teplo tuhnutí (cal/g)

h… koeficient přestupu tepla: kov/forma (cal/cm^2·s·^{0}C)

T_m… teplota tuhnutí kovu (^{0}C)

L_f… délka zaběhnutí kovu (cm)

Mezi základní vlastnosti odlévaného kovu patří jeho tekutost. Tekutost odlévané slitiny je závislá na jejích fyzikálně- chemických vlastnostech, viskozitě, tepelném obsahu a povrchovém napětí.

Tepelným obsahem odlévaného kovu se rozumí závislost mezi teplotou přehřátí slitiny a teplotou její krystalizace. Pokud je tepelný obsah taveniny neboli vnesené teplo vysoké, bude

tavenina chladnout a následně tuhnout v delším časovém intervalu. To má za následek delší časový úsek, po který je slitina schopna proudit prostorem formy.

Další vlastností slitiny, která ovlivňuje její tekutost a následně i její zabíhavost, je viskozita.

Viskozitou se rozumí vnitřní odpor odlévaného kovu. Neboli odpor jednotlivých složek proudu kovu, tím se rozumí vnitřní tření mezi jednotlivými vrstvami proudu odlévaného kovu. Jak bude kov (kapalina) viskózní závisí na přitažlivých silách mezi jednotlivými částicemi proudícího kovu (kapaliny). Rozlišují se dva typy viskozity a to viskozita dynamická a statická.

Dynamická viskozita se mění vlivem teploty. Obecně platí, že odlévané slitiny mají při poměrně vyšší teplotě nižší viskozitu. Dynamickou viskozitu je možno určit na základě níže uvedené rovnice.

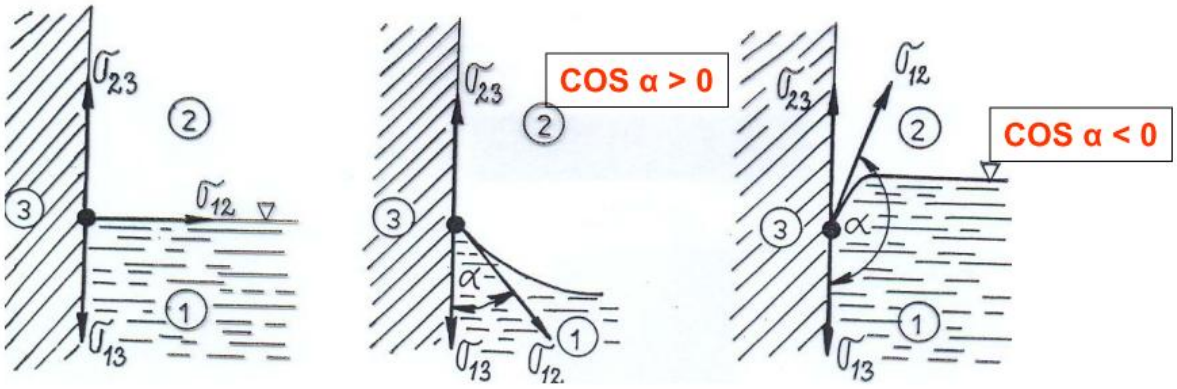
$$\eta = A^{\frac{E}{R \cdot T}} [Pa\ /\ s] \text{ [7 str. 286]}$$

Kde:

A… je konstanta závislá na slitině T… teplota (K)

R… plynová konstanta E… aktivační energie viskozního proudění (J)

Dále je nutné při odlévání slitin kovů počítat s jejich povrchovým napětím. Neboli s napětím, které působí mezi kovem, formou a okolním prostředím. Obecně platí, že čím je menší povrchové napětí, tím je zabíhavost odlévaného kovu větší. Velikost povrchového napětí určuje stupeň smáčivosti. Rozlišují se tři stupně smáčivosti a to v závislosti na úhlu smáčení, který je dán povrchovým napětím mezi formou, odlévaným kovem a okolním prostředím. Pokud je tento úhel větší jak 90^0, pak tavenina nesmáčí formu, pokud je úhel roven 90^0, pak je tavenina vůči formě netečná a pokud je úhel smáčení menší jak 90^0, je forma smáčivá. Z hlediska lepší zabíhavosti odlévané slitiny, je výhodnější mít formu smáčivou.



Obrázek 13: První část obrázku- levá část zobrazuje taveninu, která je vůči formě netečná, druhá část obrázku uprostřed zobrazuje formu smáčivou a pravá část obrázku zobrazuje formu nesmáčivou [9]

Kromě výše uvedených vlastností odlévaného kovu, jeho zabíhavost dále ovlivňuje materiál formy. Mezi formou a proudícím kovem, dochází ke tření, tím vzniká třecí síla, která působí proti pohybu kovu. Tato třecí síla je úměrná hustotě proudící taveniny, součiniteli tření, tlakové výšce a ploše, na které dochází ke styku mezi proudící taveninou a formou.

$$F_{tr} = S \cdot h \cdot \rho \cdot f \ [N]; \text{ [7 str. 287]}$$

Kde:

S… styčná plocha (m^2) ρ… hustota proudící taveniny (kg/m^3)

h… tlaková výška (m) f… součinitel tření (m/s^2)

Během plnění formy tekutým kovem, dochází k nárůstu třecí síly a to z důvodu zvětšování styčné plochy mezi kovem a formou. To má za následek postupné snižování zabíhavosti odlévané slitiny. Tento odpor vůči zabíhavosti slitiny se dá snížit vhodnými nátěry formy, které sníží tření mezi formou a odlévaným kovem, změní hodnotu součinitele tření.

Další vlastností, která má vliv na zabíhavost odlévané slitiny, je konstrukce odlitku. Tělo odlitku, nemá jednotný průřez, jeho průřez se ve formě mění. To má vliv na dynamiku plnění formy roztaveným kovem- dochází ke zpomalení pohybu kovu.

Při lití dochází k postupnému ochlazování kovu- neboli tuhnutí. Tuhnutí kovu je spojeno s jeho objemovými změnami, dochází ke změně fází, smrštění odlitku a vzniku pórovitosti. V odlitku během tuhnutí vzniká pórovitost rozptýlená a soustředěná ve staženině. Jakým podílem budou tyto dva typy poréznosti zastoupeny, je dáno vlastnostmi odlévané slitiny tzv. rozdílem mezi solidem a likvidem neboli intervalem tuhnutí a charakterem tuhnutí. Dále je nutno počítat s vlivem formy, která má vliv na rychlost ochlazování odlitku (prodyšnost formy).

U vznikajícího odlitku, jak bylo uvedeno výše, je nutno také počítat s jeho smrštěním a to z důvodu možného porušení jeho souvislosti, neboli vznikem trhlin. Odolnost slitiny proti vzniku trhlin, je dána především jejím chemickým složením. Ke vzniku trhlin dochází tehdy, pokud změna rozměrů odlitku vyvolá takové pnutí, které překročí plastičnost odlévané slitiny.

Z výše uvedeného textu vyplívá, že je nutné při výběru vhodné slitiny pro odlévání odlitku, brát v úvahu její chemické složení- polohu odlévané slitiny v binárním diagramu, teplotní interval krystalizace, rozdíl mezi chemickým složením taveniny a vznikajících fází, vlastnosti formy (prodyšnost, materiál, smáčivost apod.) a okolního prostředí (lití ve vakuu, odstředivé lití apod.). [7], [10], [9], [11]

4.1.1 Vady odlitků

Výroba odlitků je spojená se vznikem vad (řediny, bubliny, nezaběhnutí). Tyto vady vznikají během procesu odlévání, tuhnutí, následného tepelného zpracování nebo přepravy. Mohou být způsobeny špatnou konstrukcí odlitku, špatně zvoleným nálitkováním, nevhodně zvolenými teplotami lití nebo nevhodně zvoleným materiálem formy případně odlévané slitiny. O typech vad pojednává česká státní norma ČSN 42 1240. Tato norma rozdělila vady vznikající v odlitcích do sedmi skupin (vady tvaru, povrchu, souvislosti, dutiny, vměstky, vady struktury a vady chemického složení, fyzikálních nebo mechanických vlastností. Celkem je v této normě uvedeno 37 vad. Každá vada má své číselné označení a u každé vady je uvedena příčina jejího vzniku, její popis a možnosti detekce.

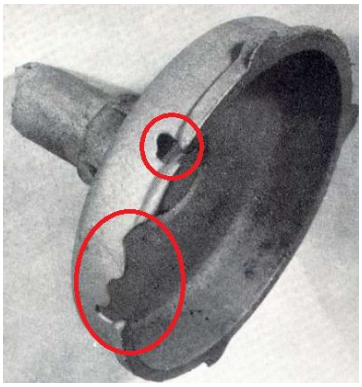
Vady odlitků se dále dělí na vady přípustné, vady nepřípustné- opravitelné a vady nepřípustné- neopravitelné. Toto členění vychází z velké části na dohodě mezi výrobcem a odběratelem odlitku. Odběratel stanovuje, které vady jsou přípustné, které neovlivní funkci odlitku, které jsou nepřípustné- opravitelné, vady které je možno vhodnou technologií (svařováním) opravit a zaručit tak funkčnost odlitku a které vady jsou nepřípustné- neopravitelné, to jsou vady, u kterých oprava není možná nebo nepřichází v úvahu (špatné rozměry, jiné chemické složení nebo fyzikální vlastnosti). Posledním zde uvedeným dělením, je dělení podle vztahu vady k povrchu odlitku. Pokud vada vystupuje na povrch součásti např. výpotky, výronky, trhliny nebo praskliny, jedná se o vadu povrchovou. Pokud je vada uzavřená v materiálu odlitku např. trhliny, bubliny, řediny apod., jedná se o vady podpovrchové. [10]

Vybrané vady

Níže uvedený text se zabývá vadami, s kterými se nejčastěji potýkají ve firmě AMATI DEMAK s.r.o. Kraslice při odlévání klapek hudebních nástrojů metodou vytavitelného modelu.

Nezaběhnutí

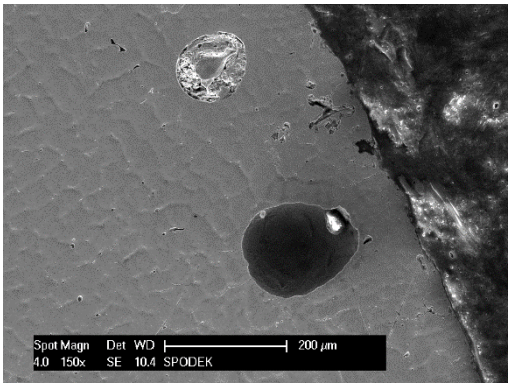
Tato vada většinou vzniká při nízké teplotě lití, nevhodně umístěnými zářezy, nedostatečné odvzdušněnou formou případně malou rychlostí lití. Její zjištění se provádí po vyjmutí odlitku z formy. Případně po jeho očištění u drobných nezaběhnutí.



Obrázek 14: Nezaběhnutí slitiny kovu- místa s vadou jsou zakroužkována [9]

Bubliny

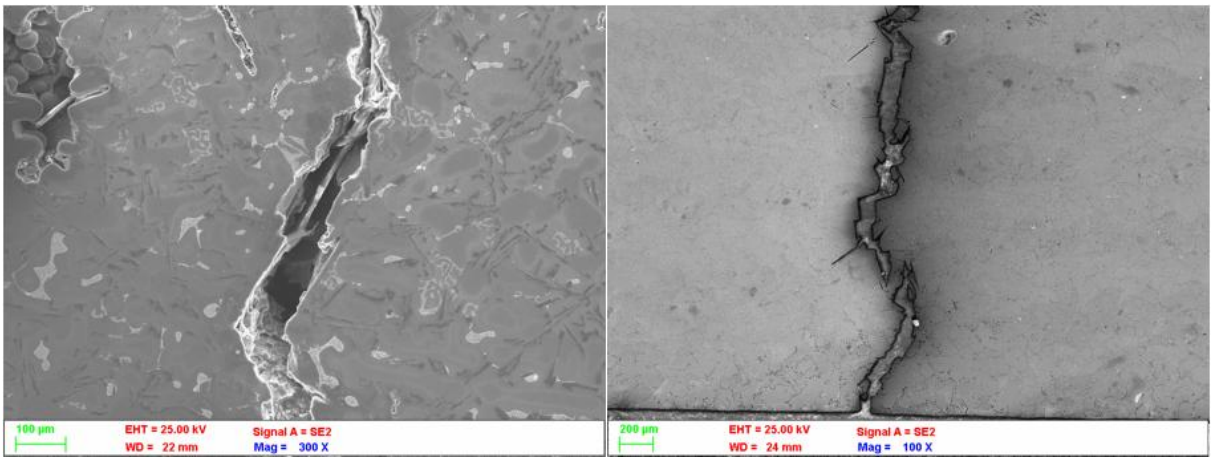
Bubliny mohou být povrchové nebo vnitřní. Jejich povrch je zpravidla čistý a hladký. Vada se vyskytuje buď samostatně anebo ve shlucích. Tato vada vzniká například díky špatné prodyšnosti formy, špatně provedená desoxidace nebo odplynění taveniny. Tento typ vady lze zjistit vizuální kontrolou- povrchové bubliny. Vnitřní bubliny se dají zjistit ultrazvukovými případně rentgenovými zkouškami případně poklepem.



Obrázek 15: Bubliny, snímky byly pořízeny na řádkovacím elektronovém mikroskopu (ŘEM) [vlastní zdroje]

Praskliny a trhliny

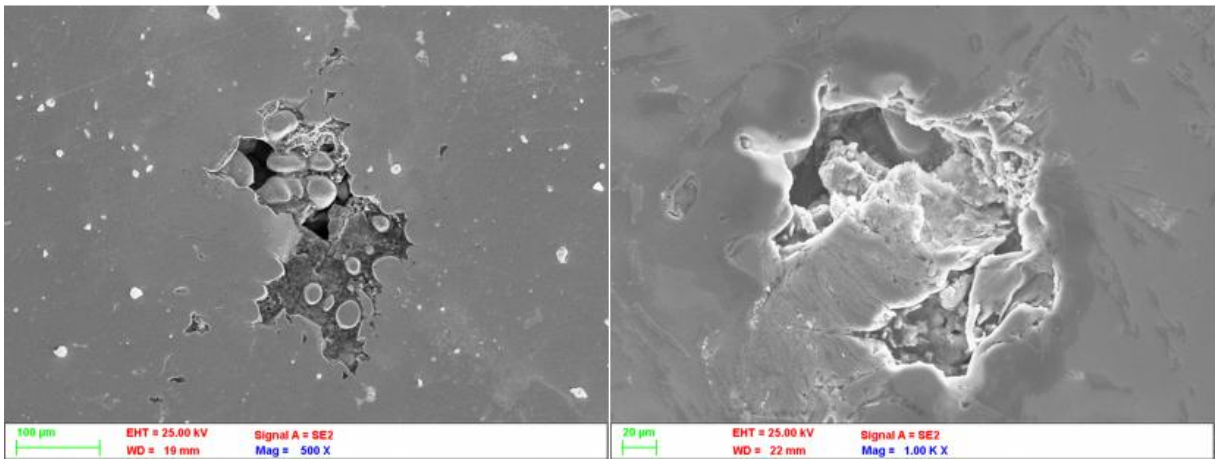
Rozdíl mezi prasklinou a trhlinou je dán jednak teplotou, kdy praskliny vznikají pod teplotou solidu a trhliny nad teplotou solidu. Další rozdíl je v jejich vzhledu a tvaru. Trhlina se šíří po hranicích zrn, zatímco prasklina zrna protíná. Povrh trhliny je zoxidovaný, oproti tomu povrch praskliny je čistý. Důvodem vzniku trhlin a prasklin je působení pnutí uvnitř materiálu. U prasklin se jedná o tepelná a transformační pnutí, u trhlin se jedná o pnutí exogenního charakteru. Určitý vliv na výskyt těchto vad, převážně pak prasklin má tvar odlitku.



Obrázek 16: Praskliny, snímky byly pořízeny na řádkovacím elektronovém mikroskopu (ŘEM) ZEISS SUPRA 35 [vlastní zdroje]

Řediny a staženiny

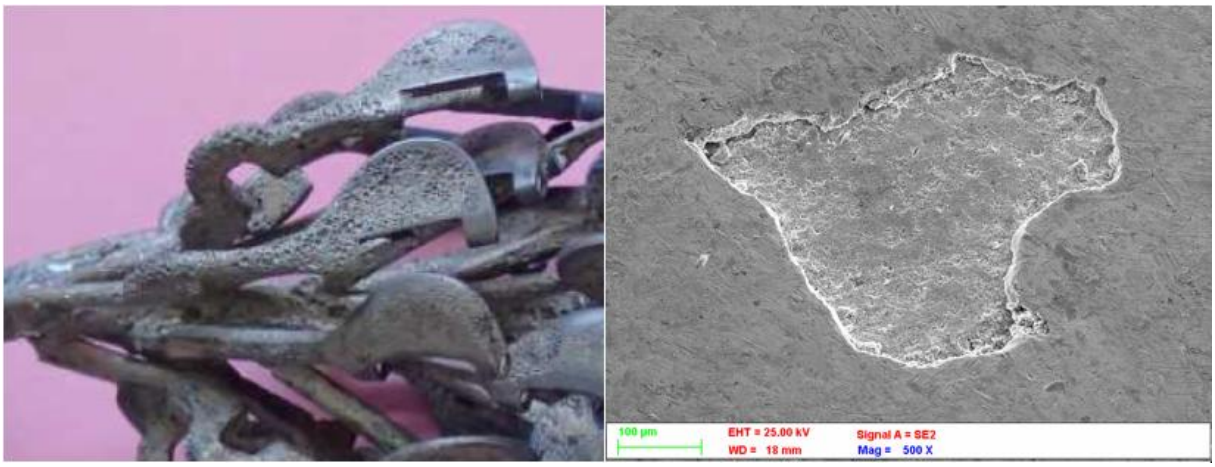
Řediny jsou místně nahromaděné staženiny malých rozměrů. Jejich vlivem dochází k oslabení průřezu odlitku. Tato vada vzniká v místech, kam nezasahuje dosazovací schopnost nálitku- počet nálitků je malý. Řediny se zjišťují buď prohlídkou odlitku po obrobení, nebo prozáření pomocí RTG. Staženiny mohou být buď povrchové- otevřené nebo vnitřní- uzavřené. Povrch vady je hrubý (drsný). Staženiny v odlitcích vznikají díky smršťování kovů během chladnutí. Jejich vznik je spojen s neusměrněným tuhnutím odlitku- nevhodně umístěné nálitky případně chladítky, špatnou konstrukcí odlitku a licí soustavy nebo příliš vysokou teplotou lití.



Obrázek 17: Řediny, snímky byly pořízeny na řádkovacím elektronovém mikroskopu (ŘEM) ZEISS SUPRA 35 [vlastní zdroje]

Nevyhovující geometrie povrchu

Požadavkem při výrobě klapek hudebních nástrojů je hladkost (nízká drsnost) povrchové vrstvy odlitků po odlití. Tuto vlastnost lze kontrolovat vizuálně, po odstranění zbytků formovacího matriálu z odlitků. [10] ; [8]; [12]



Obrázek 18: Povrchová pórovitost vzorku stromečku tavba CuNi12Zn24- levá část obrázku. Pravá část obrázku ukazuje povrchovou vadu v detailu (snímek pořízen pomocí ŘEM, mikroskop ZEISS SUPRA 35[vlastní zdroje]

5 Možnosti detekce vad

Výše uvedené vady lze nalézt a popsat pomocí různých metod jejich detekce. Metody detekce vad se dají rozdělit do dvou skupin a to na metody destruktivní a na metody nedestruktivní. Při použití nedestruktivních metod nedochází k poškození kontrolovaného dílu (odlitku) a ten je možno dále používat bez vynaložení jakýchkoliv prostředků na jeho případnou opravu (náhradu). Jejich základní dělení je na metody povrchové a metody volumetrické. U destruktivních metod dochází k odebrání vzorku, případně k úplnému zničení kontrolovaného dílu a to například při použití metalografických výbrusů.

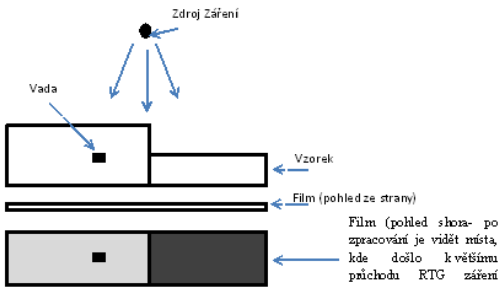
V této práci budou popsány metody detekce vad, které byly použity k odhalení a identifikaci vad na vzorcích získaných pro experimentální část této práce u firmy AMATI DEMAK s.r.o.

Vizuální kontrola

Vizuální kontrola, je kontrola součásti pomocí zraku nebo zraku a zvětšovací lupy o maximálním zvětšením 10. Vizuální kontrola slouží k odhalení povrchových vad, jako jsou povrchové bubliny, nezaběhnutí nebo nevyhovující geometrie výrobku. K provedení vizuální kontroly je zapotřebí dobré osvětlení, které nesmí kontrolujícího člověka oslňovat. Předmět by měl být v určité vzdálenosti od pozorovatele a od zdroje světla. Některé vady je možno před vizuální zkouškou zvýraznit. Zvýraznění vad se používá při kapilární zkoušce, kdy penetrační kapalina (červená) vyvzlíná z úzkých spár (prasklin, děr) na povrch pokrytý detekční kapalinou (bílá).

RTG analýza

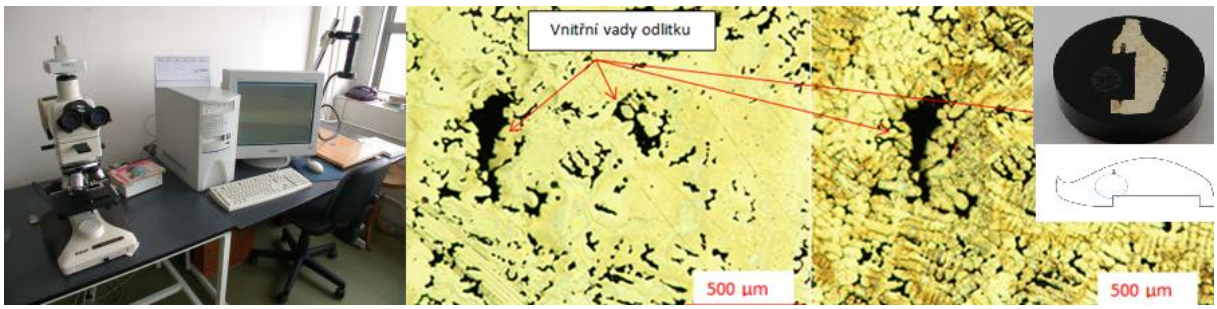
RTG analýza slouží k odhalení vnitřních vad kontrolované součásti. Měření se provádí tak, že za zkoumanou součást je umístěn fotografický papír případně folie. Tento papír je zalepen v obálce, která obsahuje stínění, jež zachytává odražené RTG paprsky a další negativní vlivy okolí. Před měřenou součást se postaví zdroj záření. Zdroj záření může být buď trvalý (gama zářiče), případně dočasný. Po zapnutí zdroje je produkováno RTG záření. To prochází měřeným předmětem a za ním se jeho průchod zaznamenává na fotografický papír. Během průchodu záření předmětem, dochází k jeho oslabení v širších částech vzorku. V místech tenčích nebo takových, které obsahují vadu, prochází více RTG záření. Takové místo se pak jeví na fotografickém papíru jako tmavší zatímco tlustší místo (bez vady) se jeví jako světlejší.



Obrázek 19: Schéma získání RTG snímku[vlastní zdroje]

Metalografický rozbor

Metalografický rozbor slouží k přesnějšímu popisu a detekci polohy zjištěných vad. Základní metalografický rozbor je možno provést na klasickém světelném mikroskopu, kde je možno určit rozložení vad, struktury vyskytující se ve vzorku apod. Pro přesný popis vad je nutné použít řádkovací elektronový mikroskop, který umožňuje pozorovat vzorek v daleko větším rozlišení. Pro metalografický rozbor je nejprve nutno vzorek připravit. Příprava spočívá v broušení, leštění a leptání zkoumané části (plochy) vzorku.



Obrázek 20: Levá část obrázku zobrazuje pracoviště světelné mikroskopie, pravá část obrázku zobrazuje struktury (vady) u vzorku, který je vyobrazen v rohu pravé části obrázku. Konkrétní místo pořízení snímku je uvedeno níže[vlastní zdroje]

Chemické složení, mechanické vlastnosti

Stanovení chemického složení je důležité kvůli možným rozdílům mezi předpokládaným chemickým složením a chemickým složením skutečným po odlití. Dále je možno pomocí chemického složení odlitku určit mechanické vlastnosti slitiny.

K určení chemického složení lze použít různé metody například metodu GDO-ES. Při této metodě dochází k odpařování povrchové vrstvy vzorku a to díky dopadu iontů. Vydané záření je snímáno detektory a následně vyneseno do grafu. Z grafu je patrné, že při použití této metody je chemické složení zkoumáno nejen v povrchové vrstvě ale i pod ní tzv. kráterový jev. [13]

6 Predikce vad

Vzniku vad v odlitku je snaha zabránit anebo jejich vznik omezit do určité části licí soustavy (vtokový kanál, zářezy, nálitky apod.), a to už během návrhu odlitku. A proto se další část této diplomové práce zabývá možnostmi návrhu odlitku. Tyto možnosti se dělí do dvou kategorií a to na klasický výpočet a na výpočet provedený pomocí výpočetního softwaru počítačem. V první části této kapitoly jsou uvedeny základní výpočty odlitků a vtokové soustavy pomocí „klasického“ výpočtu. V druhé části je dále čtenář seznámen s výpočtem pomocí výpočetního softwaru přesněji s použitím programu PROCAST, který je vyvíjen mezinárodní skupinou ESI. Po představení těchto dvou způsobů výpočtu je v závěru kapitoly uvedeno jejich vzájemné porovnání.

6.1 Základní typy výpočtů procesu odlévání

Cílem při výpočtu odlitku, je navrhnout licí soustavu tak, aby docházelo k jejímu plnění rovnoměrně a dostatečně rychle tak, aby byly zaplněny i ty nejmenší průřezy odlitku. Z toho důvodu je nutné správně navrhnout vtokovou soustavu. Při odlévání kovu a jeho tuhnutí je potřeba počítat s jeho smrštěním. Proto se při výpočtu zvětšuje jmenovitý rozměr modelu odlitku o hodnotu smrštění dané slitiny. Dále je nutné brát v úvahu tloušťku obráběné plochy a při návrhu odlitku počítat dále s přídavkem na obrobení. Při správném návrhu modelu, je dále nutné, aby na modelu nebyly ostré hrany, ty působí během odlévání a hlavně během tuhnutí slitiny jako koncentrátory napětí a mohou způsobit porušení odlitku. Z toho důvodu se ostré hrany zaoblují. To se děje také z důvodu lepšího usměrnění proudu roztaveného kovu a usnadnění vyjímání odlitku z formy.

Po úpravě modelu odlitku, je navrhována vtoková soustava. Vtoková soustava se skládá z licí jamky, licího kanálu, (odstruskovače), nálitků a zářezů, které ústí do odlitku. Tato soustava je navrhována tak, aby zajistila rovnoměrné plnění dutiny formy, aby nedocházelo během procesu odlévání k erozi formy, aby kov zaběhnul i do těch nejtenčích částí odlitku atd.

Prvním krokem při výpočtu licí soustavy, je stanovení doby lití. Pro výpočet této veličiny, lze použít řadu vzorců např. dle Sobelova nebo Dietarta.[4] Zde bude uveden výpočet dle Dieterta:

$$\tau_L = s \cdot \sqrt[3]{m_0}$$ [11 str. 101]

Kde:

$T_{L...}$ doba lití [s]

S… koeficient volený dle tloušťky odlitku (pro tloušťku 3-4 mm s=1,63) [11]

M_0… hrubá hmotnost odlitku [kg]

[4] Další informace o vzorcích, které se týkají zabíhavostí a dalších parametrů procesu odlévání, je možné dohledat v [7]; [9]; [11].

Po stanovení doby lití se vypočítá velikost licího kanálu nebo jiného prvku licí soustavy např. zářezu dle Osana. Níže je uveden možný výpočet velikosti průřezu licího kanálu:

$$S_k = \frac{m_0}{\tau_m \cdot \mu \cdot \rho \cdot \sqrt[2]{2 \cdot g \cdot h}}$$ [7 str. 301]

Kde:

S_k… průřez licího kanálu [m^2] μ… koeficient průtokových ztrát μ<1

$M_{0...}$ hmotnost odlitku [kg] ρ… hustota odléváného kovu [kg/m^3]

T_m… čas lití [s] g… gravitační zrychlení [m/s^2]

h… metalostatická výška [m]

Na základě vypočteného průřezu se dále v určitém poměru volí velikosti dalších průřezů licí soustavy a to v závislosti na odlévané slitině. Například pro slitiny cínových bronzů platí:

$S_k:S_{odstr}:S_z=1,7:1,5:1$ [7 str. 300]

Kde:

$S_{k...}$ průřez vstupního kanálu [m^2] S_{odstr}… průřez odstruskovače [m^2]

S_z… průřez zářezů [m^2]

Vtoková soustava není samozřejmě jediný prvek, který je nutno během navrhování odlitku spočítat. Poté jsou počítány tlaky, které působí na formu a případně na jádro během procesu odlévání apod. Výše uvedený příklad se týká vlastního návrhu geometrie odlitku a licí soustavy. Tyto výpočty patří mezi ty jednodušší.

Dále se počítá například doba tuhnutí odlitku, která je závislá na vedení tepla. Teplo je sdíleno uvnitř chladnoucí slitiny, mezi formou a slitinou a také mezi formou a vnějším prostředím. Vedení tepla v tělesech se dá vyjádřit pomocí Fourier-Kirchhofovy rovnice viz níže.[5]

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho \cdot c_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla T = \lambda \cdot \nabla^2 T + 2 \cdot \mu \cdot \overrightarrow{\Delta} : \vec{\Delta} + \dot{Q}^{(g)} \text{ [11 str. 272]}$$

Z těchto rovnic se dají odvodit rovnice pro výpočet doby tuhnutí. Zde je uveden příklad výpočtu doby tuhnutí pro jednoduché těleso- desku viz níže.[6]

$$T_p = \frac{\pi \cdot \rho_1^2 \cdot [L + c_1 \cdot (T_1^0 - T_{sm})]^2}{4 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot (T_1 - T_2^0)^2} \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 \text{ [11 str. 288]}$$

Možností jak vypočítat dobu tuhnutí odlitku je větší množství, lze například využít vzorce N. Chvorinova a dalších, jejich výčet však není cílem této kapitoly. Zde uvedené vztahy jsou pouhým nástinem toho, co je nutné při návrhu odlitku spočítat, aby byl výrobek odlit bez větších problémů. Dále je samozřejmé spočítat pnutí, která během tuhnutí vznikají ve výrobku, velikost případných nálitků nebo rychlost vyplouvání plynů a vměstků z taveniny.

Jak je vidět z výše uvedeného při návrhu odlitku a procesu odlévání případně tuhnutí se využívají jednak jednoduché vzorce a tabulky s experimentálně zjištěnými hodnotami, např. při návrhu vtokové soustavy, anebo složitější vzorce, pro určení ideální doby tuhnutí. Složitost některých vzorců má značný vliv na čas strávený výpočtem a právě tento čas je konstruktér odlitku schopen zkrátit použitím simulačního softwaru procesu odlévání.

[5] Více informací k výše uvedené rovnici je uvedeno např. v [11] nebo v publikaci: Adéla Macháčková, Radim Kocich; Sdílení tepla a proudění, dostupné z www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_final_LAST.pdf (29.3.2014)

[6] Více informací k výše uvedené rovnici je uvedeno např. v [11] nebo v přednáškách z předmětu Teorie slévání; vyučovaném na katedře materiálů a strojírenské metalurgie fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni

6.2 Simulační výpočet procesu odlévání

Výhodou simulačního výpočtu je jeho rychlost. Díky tomu se dá při navrhování vhodné slitiny, otestovat více materiálů, než při klasickém zkoušení, kdy jsou odlévány zkušební tělesa, na nichž se následně provádí různé rozbory, jako například stanovení množství defektů v odlitku, jejich rozložení, metalografie, tvrdost nebo pevnost. Tyto rozbory slitin jsou časově náročné nehledě na to, že prodražují volbu vhodného materiálu. Další výhodou simulačního výpočtu je možnost simulace více licích teplot u jedné slitiny, kde by při použití zkušebních odlitků bylo nutné použít větší množství materiálu, což opět prodražuje výrobu.

Z těchto důvodů, se před odlitím zkušebních odlitků provádí simulační výpočet, pomocí kterého jsou určeny nejvhodnější slitiny a teploty odlévání pro danou technologii lití a daný odlitek.

Níže uvedený text popisuje jednotlivé kroky, které vedou ke správně provedené simulaci a k získání požadovaných výsledků.

V podstatě se jedná o čtyři kroky:

1. Tvorba modelu odlitku
2. úprava modelu
3. příprava okrajových podmínek simulace
4. vyhodnocení simulace

Krok č. 1

V první fázi simulačního procesu je vytvořen model odlitku. Model odlitku může být vytvořen na základě výkresu, buď pomocí 3D grafického programu např. Proe, Inventor popř. Catia nebo pokud není k dispozici výkresová dokumentace, jako v případě experimentální části práce, je možno odlitek proměřit s použitím klasických nástrojů, jako je posuvné měřítko úhloměr apod. anebo je možno využít moderní techniku jakou je například 3D scanner. Získaný model je dále nutné exportovat do formátu, který podporuje použitý simulační program, případně jej do tohoto formátu převést později.

Obrázek 21:Model odlitku klapky KLG 119 98_nasnímaný pomocí 3D scanneru [vlastní zdroje]

Krok č. 2

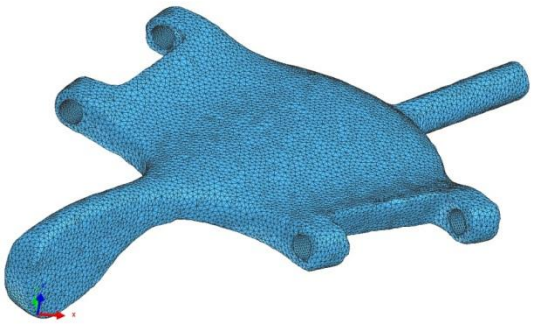
Po vytvoření modelu přichází na řadu vybraný simulační program. Simulační výpočty procesu odlévání uvedené v experimentální části této práce probíhaly v programu PROCAST, který je vyvíjen společností MECAS ESI s.r.o, tudíž další text bude věnován popisu výpočtu v tomto prostředí. Prvním krokem je tedy otevření modelu v prostředí Visual- mesh.

V tomto prostředí je možné vytvořit jednoduchý model a to pomocí záložky Geometry_curve (surface). Také je možné vytvářet sestavy a to pomocí kopírování a přesouvání jednotlivých modelů. K tomuto účelu je zde záložka Tools_transform. Pokud se jedná o symetrický model, je možné jej oříznout podle osy symetrie a tím zkrátit výpočetní čas simulace.

Jakmile jsou úpravy modelu dokončeny, je provedena kontrola, zdali je vytvořená geometrie v pořádku, zdali neobsahuje chyby například překřížení nebo necelistvosti. K tomuto účelu je možno použít nástroj repair nacházející se v záložce geometry. Po úpravě modelu, se provádí jeho zasíťování. Tento krok je důležitý kvůli definici vztahu mezi povrchy (odlitek-forma) a vnitřních vztahů taveniny během odlévání a tuhnutí.

Nejprve se vytváří síť povrchová. Její hustota (velikost jednotlivých elementů), ovlivňuje přesnost a rychlost výpočtu. Při zvolení příliš hrubé sítě budou výsledky nepřesné, při zvolení příliš jemné sítě, budou získány přesnější hodnoty, ale výpočet bude trvat příliš dlouho. Při vytváření sítě je možné volit mezi různými tvary elementů, kterými je síť tvořena (trojúhelníkové, čtvercové nebo jejich kombinace). Všechny tyto možnosti jakými lze síť modifikovat lze nalézt v záložce 2d mesh.

Povrchová síť vytvořila body, na které se následně naváže objemová síť. Tato síť je nazývána 3D sítí. A k jejímu vytváření a úpravě je zde záložka 3d mesh. Vytvořená síť je poté podrobena, jako vytvořená geometrie kontrole, zdali neobsahuje chyby. Funkci pro kontrolu prvků sítě je možné nalézt v záložkách 2D-3D mesh.



Obrázek 22: zasíťovaný model odlitku KLG 119 98 [vlastní zdroje]

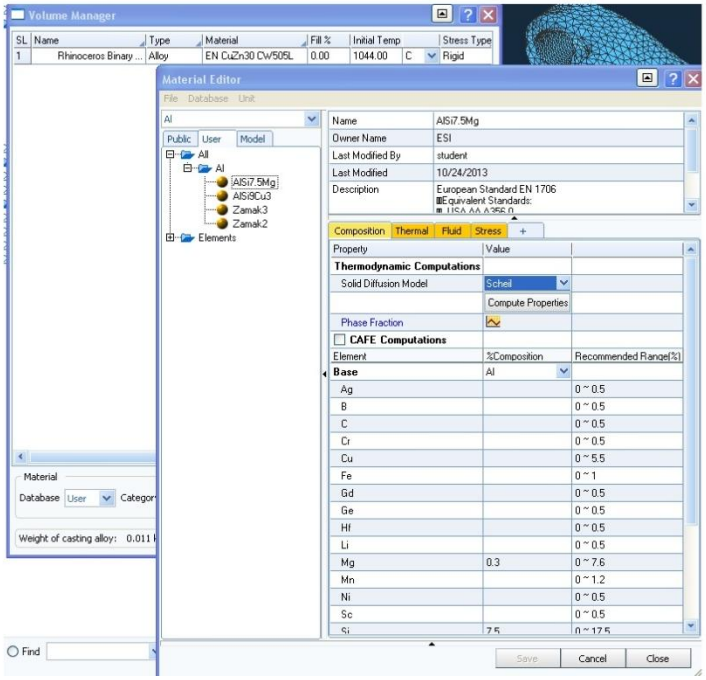
Krok č. 3

Takto zasíťovaný model je následně uložen a otevřen v dalším prostředí a to v prostředí Visual-cast.V tomto prostředí, jsou stanoveny okrajové podmínky, podle kterých následně proběhne simulace.

Prvním krokem v tomto prostředí je určení jakým směrem bude při odlévání působit gravitace (část_gravity vector). Tím se určí základní poloha odlitku v prostoru. Poté jsou definovány první podmínky procesu odlévání (cast_process_condition_manager). Je stanoven vtok (inlet), pokud se jedná o symetrický odlitek, jsou stanoveny plochy symetrie apod. všechny podmínky, které lze v tomto kroku nastavit se nacházejí v záložce část- process_condition-manager.

Dále se nastavují vztahy mezi jednotlivými částmi odlitku a formou. K tomu slouží HTC interface manager nacházející se také v záložce cast.

V další fázi jsou stanoveny typy materiálů pro odlitek a formu. K tomuto účelu tento program obsahuje v záložce cast volume manager. Pomocí tohoto nástroje lze vybírat jednak slitiny z databáze materiálů obsažené v programu PROCAST, ale je také možné zvolit si svůj vlastní materiál a na základě jeho chemického složení dopočítat jeho mechanické vlastnosti, teplotu solidu, likvidu apod.

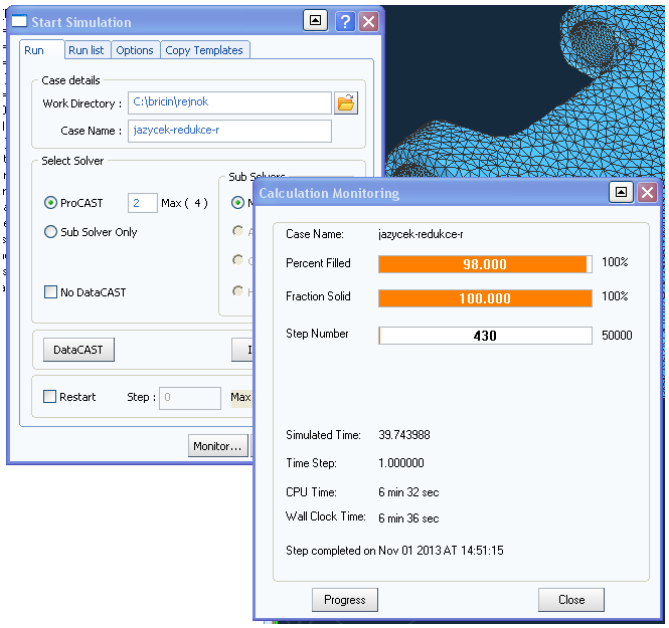


Obrázek 23: Ukázka volby materiálu z vlastní databáze, jehož další vlastnosti, jako teplota solidu a likvidu byly vypočítány pomocí difúzního modelu Scheil [vlastní zdroje]

Kromě výběru materiálu se zde nastavují další podmínky procesu odlévání jako je například teplota lití kovu, teplota předehřevu formy atd.

Předposledním krokem je nastavení parametrů vlastní simulace. K tomuto účelu slouží v záložce cast položka simulation parameter.

Zde je možno měnit typ (způsob odlévání) a nejrůznější parametry procesu odlévání jako je počáteční tlak lití, působení plynu na odlévaný kov nebo množství odlévaného kovu. Parametrů, které lze v tomto kroku nastavit existuje velké množství, proto jsou zde uvedeny jen jejich příklady. Po nastavení všech parametrů následuje jejich kontrola. K tomu slouží nástroj Data check. Posledním krokem je spuštění simulace. K tomu slouží nástroj start simulation. Pomocí tohoto nástroje je možné volit umístění, ve kterém k výpočtu dojde, počet jader počítače, která se výpočtu zúčastní, i který nástroj z nabídky select solver bude použit k výpočtu. Po spuštění simulace lze tlačítkem monitor sledovat stav výpočtu.



Obrázek 24: Při sledování procesu simulace je možno sledovat procento zaplnění formy, procenta ztuhlého kovu a čas simulace [vlastní zdroje]

Krok č. 4

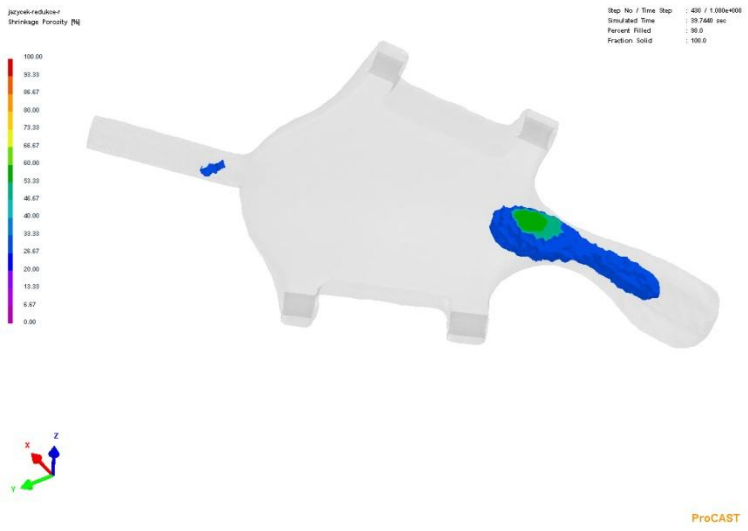
Poté, co je simulační výpočet hotov, je jeho výsledky možné zobrazit pomocí dalšího mudulu programu a to pomocí. Visual viwer.

Výsledky simulace jsou rozděleny do třech skupin. První skupina (kategorie) nese název thermal. V této části se nacházejí informace o průběhu teplot během lití, o rychlosti a způsobu tuhnutí a také informace o tom, jaké vady se v odlitku vyskytují. K tomuto účelu je zde modul schringage porosity o kterém bude pojednáno níže.

Druhá skupina (kategorie) nese název fluid. V této části se nacházejí informace o průbězích tlaků během plnění formy, o rychlostech, jakými postupuje proud odlévaného kovu, o čase lití atd. Samozřejmě je možné zobrazit i další informace například mechanické vlastnosti odlitého kovu jako je tvrdost nebo pevnost o tom, kde tyto informace najít pojednávají návody pro tento program, tato práce se jimi nezabývá.

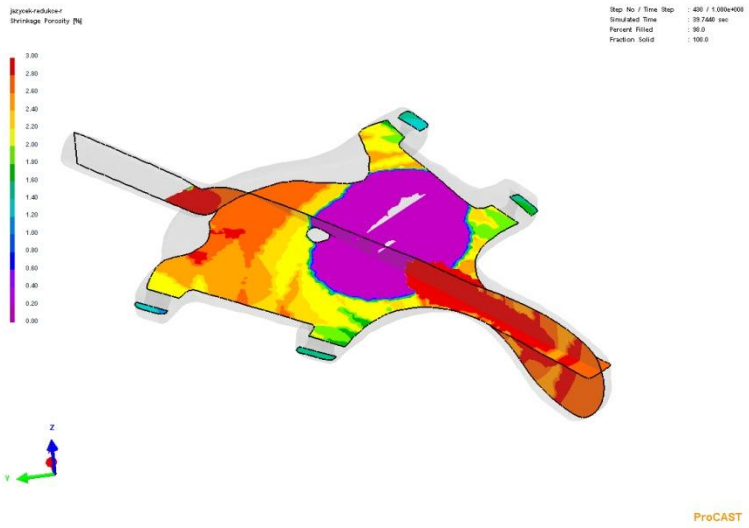
Model schringage porosity

Tento model zobrazuje rozložení vad a jejich velikost v objemu materiálu. K tomuto účelu je možné využít dvou modelů. První model zobrazuje vady ve 3D.



Obrázek 25: Zobrazení porózity v odlitku ve 3D. Osa vlevo zobrazuje procenta porózity, kdy při 100% porózity se jedná o místo v odlitku, bez kovu- dutinu. Jakmile začne porosita klesat začíná se v jejím objemu objevovat určité procento kovu. Na obrázku jsou vidět místa, kde se porózita pohybuje mezi 25-60% [vlastní zdroje]

Druhý model zobrazuje vady použitím různých řezů součásti. Jedná se tedy o 2D zobrazení vad. Různými kombinacemi řezů lze poté získat prostorovou představu o rozložení vad v objemu materiálu a na základě toho určit ideální místo pro umístění nálitku, druhého zářezu nebo místo, kde by bylo vhodné změnit geometrii odlitku.



Obrázek 26: Zobrazení porózity v odlitku ve 2D pomocí dvou na sebe kolmých řezů. Osa vlevo zobrazuje procenta porózity. V tomto případě byla hodnota poréznosti snížena na 5% a to aby vynikly vady s nižší pórovitostí. V tomto případě jsou tedy vady s pórovitostí vyšší jak 5% zobrazeny červenou barvou viz. Barevná stupnice vlevo. [vlastní zdroje]

Jakmile při vyhodnocování simulace dojde k rozporu mezi výsledkem simulačního výpočtu a skutečností, je nutné se opět vrátit na začátek a pozměnit okrajové podmínky výpočtu. Okrajové podmínky výpočtu je totiž možné zadávat několika různými způsoby například při volbě, přestupu tepla mezi formou a odlitkem je možné tuto hodnotu zadat jako funkci, pokud je známá nebo ji lze zadat jako konstantu, kde je poté nutno výsledky získané simulačním výpočtem porovnat se zadáním nebo dodanými vzorky a postupnou úpravou okrajových podmínek se dopracovat k výsledku, který bude odpovídat skutečnosti- dodaným vzorkům. [14],

6.3 Výhody a nevýhody výpočtu pomocí simulačního softwaru

Mezi výhody simulačního softwaru PROCAST skupiny ESI patří jeho modulové uspořádání. Modulové uspořádání spočívá v možnosti širokého rozšíření základního softwaru. Po konzultaci s odborníky z této společnosti, je možné dále upravit a doplnit výpočtové prostředí programu tak, aby splňovalo nároky- potřeby konkrétní společnosti. Mezi další výhody patří široké možnosti zadávání okrajových podmínek, které je možno zadávat jak pomocí funkcí, vystihující konkrétní závislost, tak pomocí konstant, tak aby následný simulační výpočet vystihoval konkrétní problematiku. Při použití konstant je však nutné mít nějaký referenční vzorek, pomocí něhož se tyto konstanty aproximují tak, aby následný výpočet odpovídal realitě. Nedílnou výhodou simulačního výpočtu je jeho rychlost oproti použití klasického „ručního“ výpočtu, u kterého je řešení některých rovnic zdlouhavé. Simulační výpočet omezuje chyby spojené s průběhem výpočtu, kde během počítání rovnic v ruce může dojít k chybě výpočtáře a to například z důvodu únavy. U výpočetního softwaru, může samozřejmě také dojít k chybám a to například díky špatně zvoleným okrajovým podmínkám nebo chybou v zadané rovnici či chybou vlastního softwaru. Další výhodou je možnost využití široké databáze materiálů, která je součástí tohoto softwaru. Tato materiálová databáze v sobě zahrnuje informace o mechanických vlastnostech materiálu a jeho chování během procesu odlévání. Pokud tato databáze požadovaný materiál neobsahuje, je možné na základě požadovaného chemického složení slitiny jeho mechanické vlastnosti a chování během procesu odlévání dopočítat a to opět s použitím jednoho modulu tohoto softwaru.[7]

Nevýhodou tohoto softwaru je jeho pořizovací cena a nutný dostatečný výpočetní výkon počítače, který značným způsobem ovlivňuje délku trvání simulačního výpočtu. Další nevýhodou pro nezkušeného uživatele, je jeho rozsáhlost, kdy neznalost potřebných funkcí značným způsobem zpomaluje postup vytváření simulačního výpočtu. Tato nevýhoda je částečně vykompenzována širokou uživatelskou základnou a různými návody a tutoriály, které seznamují s prostředím programu PROCAST a značným způsobem urychlují práci s tímto softwarem.[8] [14]

[7] Další informace o Programu PROCAST jsou uvedeny na stránkách výrobce dostupné z: www.esi-group.com/cz (1. 1. 2014); více informací o jednotlivých modulech je možné dohledat v návodech na výše uvedený program PROCAST, případně osobním kontaktem přes výše uvedené stránky výrobce a poskytovatele programu

[8] Více informací o těchto návodech a tutoriálech je dostupných například na stránkách výrobce programu, dostupné z: www.esi-group.com/cz nebo www.youtube.com (1. 1. 2014)

7 Experimentální část diplomové práce

Tato část diplomové práce se zabývá a řeší problematiku odlévání drobných součástek hudebních nástrojů vyráběných ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. V této firmě jsou odlitky vyráběny technologií lití na vytavitelný model[9], ze slitin neželezných kovů přesněji ze slitin mědi[10]. V prvé fázi experimentu byly odlity vzorky ze slitin, které jsou běžně používány ve výše uvedené společnosti, přesněji se jednalo o slitiny CuZn30, CuNi12Zn24 a N31. Vzorky z těchto slitin byly po svém odlití rozděleny do skupin a to dle provedených expertíz. Po provedení expertíz, bylo provedeno vyhodnocení vlastností dodaných vzorků a na jeho základě byl proveden návrh variant řešení nalezené problematiky. K řešení této problematiky byl použit simulační výpočet procesu odlévání v programu PROCAST, jenž je vyvíjen společností ESI GROUP s.r.o. Po provedení simulačních výpočtů a jejich vyhodnocení bylo dále přistoupeno k praktickému ověření správnosti navrženého řešení a to odlitím nových vzorků dle vytvořeného návrhu. Tyto nové vzorky byly obdobně jako první skupina vzorků rozděleny do skupin dle provedených expertíz a jejich výsledky byly následně porovnány s výsledky první série vzorků.
Tato experimentální část diplomové práce je tedy rozdělena do několika částí. V úvodní kapitole je uvedeno rozdělení a výsledky expertíz provedených u prvé série vzorků, která zastupuje používané slitiny ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Na tuto část navazuje kapitola, která se zabývá různými variantami řešení nalezené problematiky a výsledky jednotlivých simulačních výpočtů, které byly provedeny pomocí výše zmíněného programu. Po této kapitole pokračuje experimentální část této diplomové práce porovnáním výsledků expertíz
u vzorků, které byly odlity na základě výsledků simulačního výpočtu s výsledky expertíz u prvé série vzorků. Tím se dostává tato práce ke svému závěru, ve kterém je uvedena diskuse k získaným výsledkům experimentální části práce a vlastní závěr, který tuto diplomovou práci uzavírá.

[9] Více informací o technologii lití na vytavitelný model je uvedeno v úvodní kapitole této diplomové práce: Charakteristika technologie výroby hudebních dílů ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. případně v publikaci Lost Wax or Investment Casting, autor James E. Sopcak.

[10] Více informací o slitinách neželezných kovů, je dostupných například v publikaci *ASM HANDBOOK VOL. 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose materials; vydavatel ASM INTERNATIONAL, dostupné například v univerzitní knihovně Západočeské univerzity v Plzni nebo v publikaci: Čáp, Albín; Vybrané kapitoly z neželezných kovů a jejich slitin; dostupné například v univerzitní knihovně Západočeské univerzity v Plzni*

8 Zhodnocení dodaných vzorků- rozdělení do skupin

Společnosti AMATI DEMAK s.r.o. dodala na začátku experimentu skupinu vzorků. Tato skupina obsahovala dva voskové modely, výchozí polotovary pro tavbu a dále řadu odlitků buď ve formě celého stromečku, případně jednotlivých klapek. Vzorky byly odebrány z různých taveb tří materiálů. Tyto materiály byly slitiny mědi, kde hlavním legujícím prvkem byl zinek. Jednalo se o slitiny CuZn30, slitinu N31 a slitinu CuNi12Zn24. Všechny vzorky byly po převzetí označeny, viz níže uvedený obrázek. Po označení, byly vzorky rozděleny do skupin a to podle prováděného experimentu.

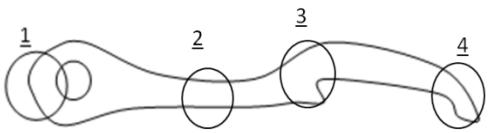
Obrázek 27: Vzorky dodané společností AMATI s.r.o. [vlastní zdroje]

Skupina voskových modelů klapka typu KLG 512, na obrázku vlevo nahoře byla určena spolu s klapkami KL 119 98 a klapkami KLG 597 a KLG 55 k tvorbě 3D modelů pro pozdější simulační výpočet. Ke tvorbě 3D modelů, byla použita technologie snímání součásti pomocí 3D scanneru. Model vytvořený pomocí této technologie byl dále zpracován pomocí konstrukčního softwaru (Autodesk Inventor, Catia), kde došlo k jeho úpravě- odstranění necelistvostí geometrie, úpravě otvorů, zářezů apod. Po úpravě byly modely připraveny pro simulační výpočet. Další skupinu vzorků tvořily vzorky určené pro RTG analýzu, která se používá k detekci vnitřních defektů součástí. Poslední největší skupinou, byla skupina vzorků určená k chemickému rozboru slitin, změření tvrdosti a stanovení typu vad pomocí světelné a elektronové mikroskopie.

Již během přebírání vzorků byla u některých vzorků patrná vysoká povrchová poréznost, především pak u vzorků ze slitiny CuNi12Zn24. U vzorků dalších dvou dodaných slitin, nebyla tato poréznost při vizuální kontrole pozorována.

8.1 Nalezené vady

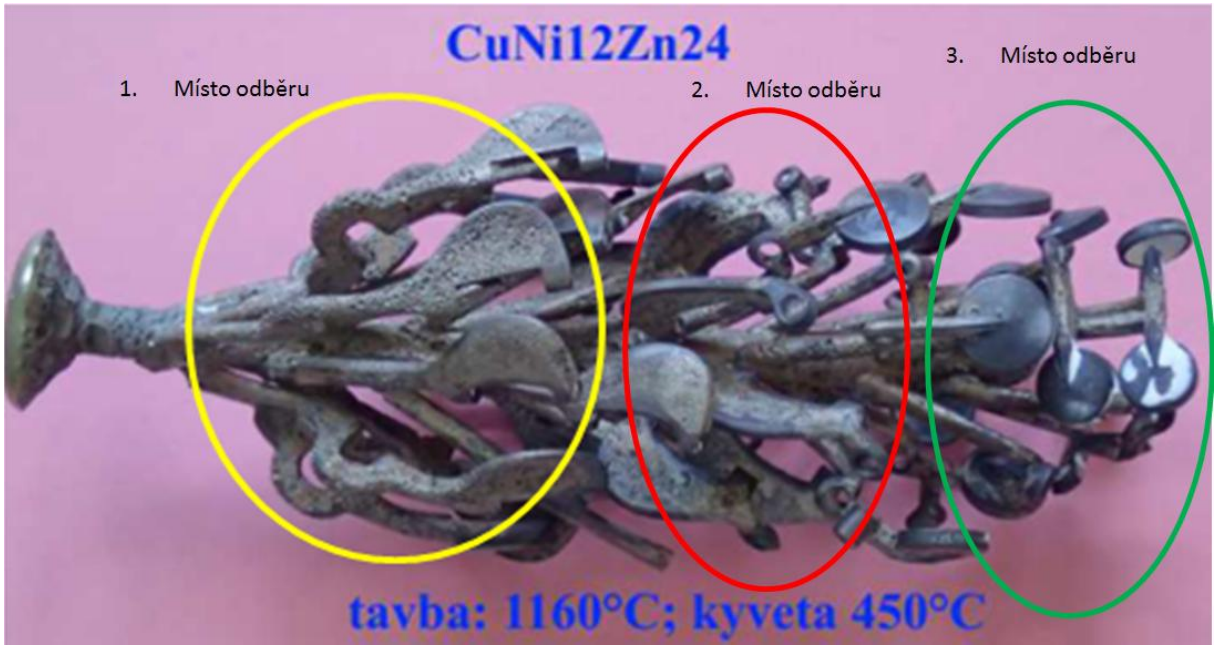
Po vizuální kontrole následovaly další výše zmíněné expertízy. Z důvodu velkého množství vzorků, bude v této části práce uveden vždy výsledek pro jeden vzorek dané slitiny, vyhodnocení ostatních vzorků je v přílohách na konci této práce. U vzorků určených pro metalografický rozbor a měření mikrotvrdosti bylo toto měření provedeno napříč každým vzorkem, jak zobrazuje níže uvedený obrázek. Tento postup byl zvolen z důvodu zjištění rozdílu mechanických vlastností a rozdílu v rozložení vnitřních vad, v různých částech vzorku odlitku.



Obrázek 28: Ukázka míst, na kterých došlo k zaznamenání metalografických snímků a míst, kde došlo k změření mikrotvrdosti (počet míst, na kterých došlo k pořízení snímku se liší v závislosti na typu vzorku)

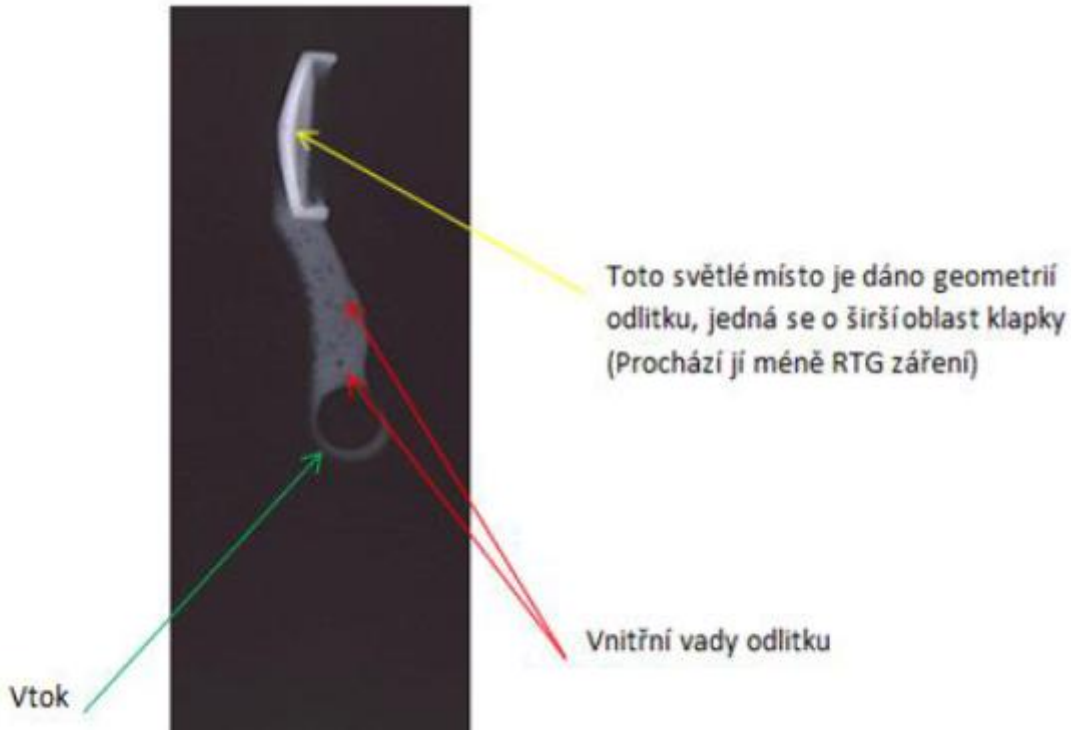
8.1.1 Slitina CuNi12Zn24

U této slitiny byly vzorky dodány ve formě stromečku a výchozího polotovaru (granulátu). Odběr vzorků proběhl ze tří míst odlitého stromečku a to z horní, střední a spodní části. Odběr z těchto třech míst proběhl z důvodu zjištění rozdílnosti v množství segregujících prvků v různých částech tavby a s tím spojenými odlišnými mechanickými vlastnostmi. Přibližná místa odběru ukazuje níže uvedený obrázek.

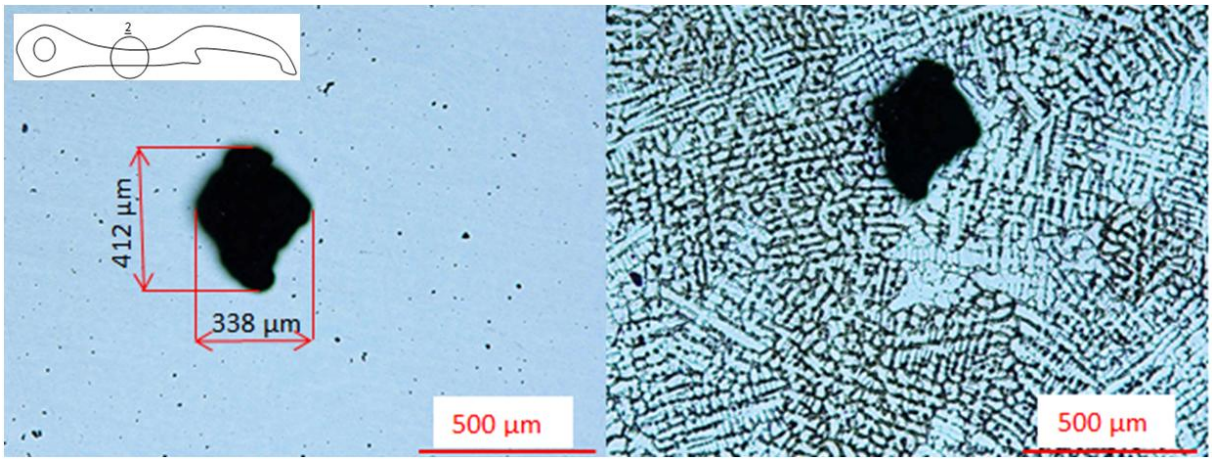


Obrázek 29: Vzorek tavby slitiny CuNi12Zn24, na povrchu vzorku je vidět výrazná povrchová poréznost, kroužky označují místa odběru jednotlivých vzorků [vlastní zdroje]

Na prvních odebraných vzorcích, byla provedena RTG analýza a metalografický rozbor. Další vzorky byly určeny pro chemickou analýzu tavby. Níže jsou uvedeny výsledky z expertíz pro místo odběru č.3- spodní část stromečku.



Obrázek 30:Rentgenový snímek vzorku CuNi12Zn24 (spodní část), vady se nacházejí za zúženou, v rozšířené, části odlitku. V této oblasti má kov zhoršenou dosazovací schopnost, díky čemuž mohou vznikat řediny. Náprava je možná například nálitkováním v blízkosti výskytu popřípadě umístěním dalšího vtoku.[vlastní zdroje]



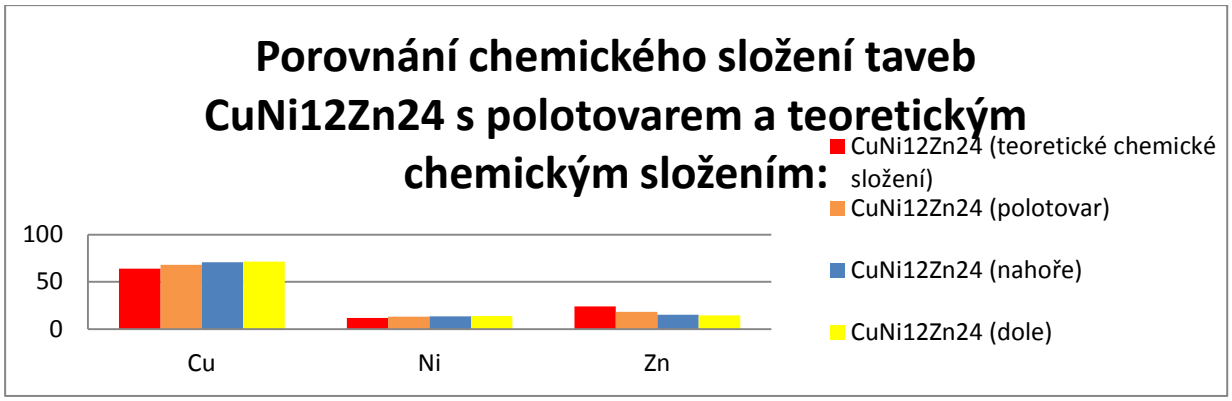
Obrázek 31: V rohu levé části obrázku je zobrazeno místo pořízení snímku. Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním, černá oblasti jsou vady odlitku, jedná se o staženinu a pravděpodobně drobné řediny. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury.]vlastní zdroje]

Tabulka 2:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti tavby slitiny CuNi12Zn24- místo odběru č. 3. Chemická analýza byla provedena Pomocí GDOS.[vlastní zdroje]

	Naměřené mikrotvrdosti HV 0,05:						Průměrná hodnota:	Směrodatná odchylka:
CuNi12Zn24:	85	90	98	91	99		92	4,7
Chemické složení vzorku- místo odběru č.3:								
Chemický prvek:	**Zn:**			**Ni:**			**Cu:**	
Procentuální zastoupení:	14,5			13,9			71,50	

Závěr z provedených expertíz

RTG analýzou, byl u všech vzorků slitiny CuNi12Zn24 prokázán výskyt vnitřních vad. Tyto vady byly následně analyzovány pomocí světelné a elektronové mikroskopie, což umožnilo popis vzniklých vad. Vnitřní vady se ve větší míře objevovali v místech, s větším objemem oproti zbývající části odlitku. Tato místa se nacházela ve velké části případů za místem značně užším. Protože toto užší místo ztuhne rychleji než objemnější část odlitku, dojde k zamezení přístupu tekutého kovu do objemnější části odlitku a tím nastane tvorba dutin-staženin v odlitku viz výše uvedený metalografický snímek. Dále se u vzorků objevují řediny. Řediny se vždy objevují na okraji dendritických větví- vznikají ke konci tuhnutí slitiny. Chemické složení u vzorků tavby CuNi12Zn24 se v jednotlivých částech (horní a spodní část stromečku) v zásadě neliší, z čehož lze usuzovat na obdobné mechanické vlastnosti. Velký rozdíl je ovšem mezi chemickým složením tavby a polotovaru oproti teoretickému chemickému složení, kde je u teoretického chemického složení výrazně více zinku. Ostatní prvky vyskytující se ve slitině jsou v normě. Z výše uvedeného lze usuzovat, že výchozí polotovar byl pravděpodobně jednou přetaven, což vysvětluje nižší procento zinku u polotovaru a vzorků tavby. Procento propalu zinku při jedné tavbě lze odečíst z grafu jedná se přibližně o 4 procenta. Měřením mikrotvrdosti napříč vzorkem bylo zjištěno, že se tato hodnota výrazně neliší, z čehož lze usuzovat na obdobné vlastnosti v průřezu odlitku. Porovnáním mikrotvrdostí vzorku z místa odběru č.3, s naměřenými hodnotami u vzorků ze dvou zbylých odběrných míst lze říci, že se mikrotvrdost liší nevýrazně. Rozdíly jsou způsobeny výskytem ředin v jednotlivých částech licí soustavy.



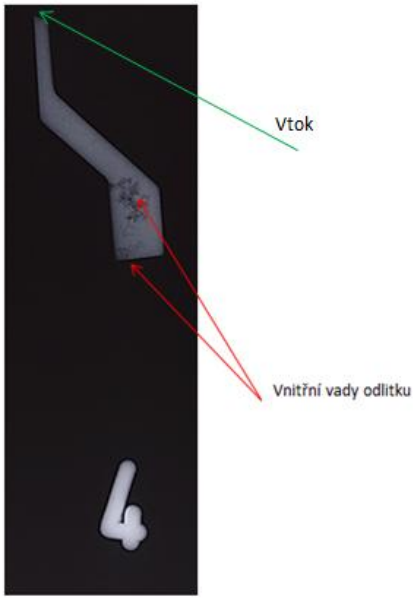
Graf 5: Porovnání chemických složení dodaných vzorků s teoretickým chemickým složením [vlastní zdroje]

8.1.2 Slitina s typovým označením N31

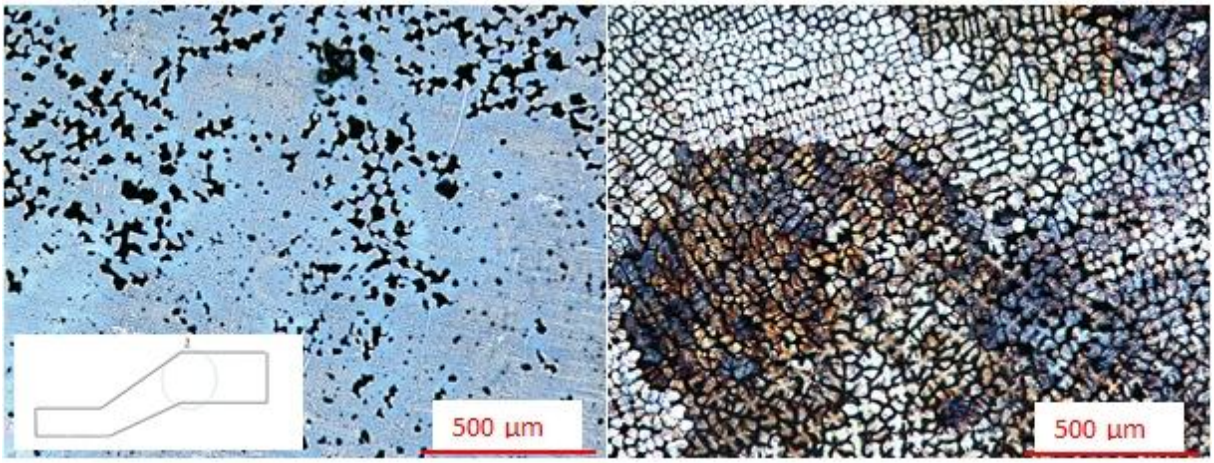
Vzorky této slitiny byly dodány ve stavu po opracování. Vzorky byly stejně, jako u předešlé slitiny dodány z různých částí stromečku viz níže uvedený obrázek.

Obrázek 32: dodané vzorky slitiny N31 [vlastní zdroje]

Jako výchozí polotovar této slitiny, byla dodána tyčovina o průměru 15 milimetrů. U této slitiny byly provedeny obdobné expertízy jako u předešlé slitiny. Níže uvedené obrázky zobrazují výsledky provedených expertíz u vybraných vzorků.



Obrázek 33: RTG snímek vzorků N31 (9- horní část, 10- střední část, 11- dolní část, vady se u odlitků nacházejí za zúženou, v rozšiřující se oblasti odlitku. V této oblasti má kov zhoršenou dosazovací schop schopnost, díky čemuž mohou vznikat řediny. Náprava je možná například nálitkováním v blízkosti jejich výskytu popřípadě umístěním dalšího vtoku.[vlastní zdroje]



Obrázek 34: V rohu levé části obrázku je zobrazeno místo pořízení snímku. Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]

Tabulka 3:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti tavby slitiny N31. Chemická analýza byla provedena pomocí GDOES.[vlastní zdroje]

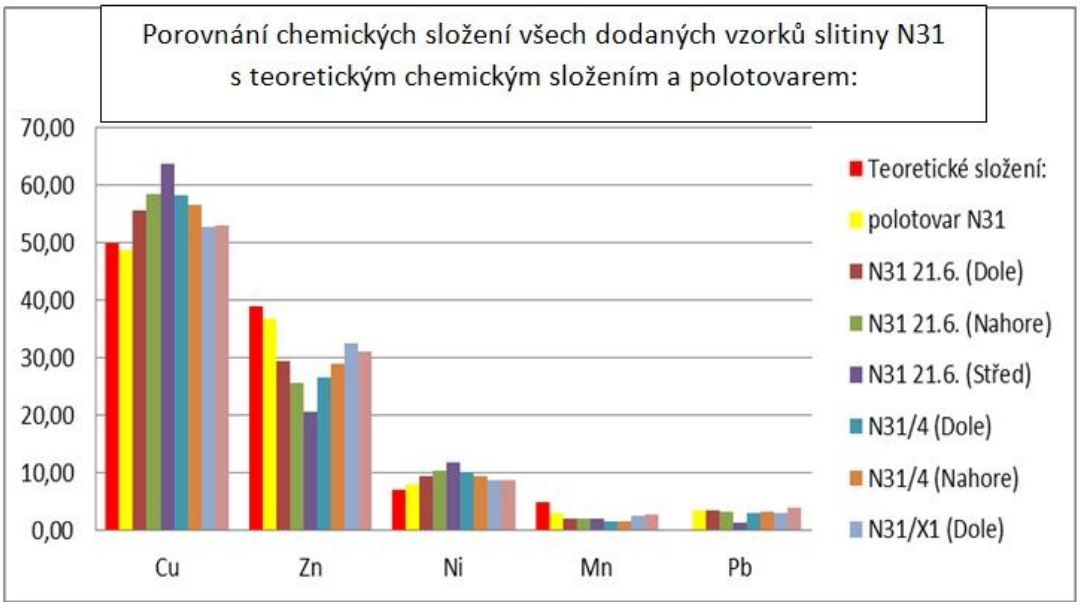
	Naměřené mikrotvrdosti HV 0,05:						Průměrná hodnota:	Směrodatná odchylka:
N31:	94	102	109	96	95	99	99,17	4,22

Chemické složení vzorku z tavby 21.6. 2013- střed:					
Chemický prvek:	**Zn:**	**Ni:**	**Mn:**	**Pb:**	**Cu:**
Procentuální zastoupení:	20,8	11,9	2	1,4	63,7

Závěr z provedených expertíz

RTG analýzou, byl u všech vzorků slitiny N31 (všech dodaných taveb) prokázán výskyt vnitřních vad. Tyto vady byly následně analyzovány pomocí světelné a elektronové mikroskopie, což umožnilo popis vzniklých vad. Vnitřní vady se ve větší míře objevovaly v místech, s větším objemem oproti zbývající části odlitku. Tato místa se nacházela ve velké části případů za místem značně užším. Protože toto užší místo ztuhne rychleji než objemnější část odlitku, dojde k zamezení přístupu tekutého kovu do jeho objemnější části a tím dojde k tvorbě dutin-staženin a ředin v odlitku.

Chemické složení u vzorků taveb materiálu N31 je možno porovnat pomocí níže uvedeného grafu.



Graf 6:Porovnání chemických složení dodaných vzorků s teoretickým chemickým složením[vlastní zdroje]

Z grafu je patrné, že se teoretické chemické složení neliší od chemického složení polotovaru. Viditelný rozdíl je u vzorků různých taveb, kde je zřejmé, že byl u tavby z 21. 6. Použit jiný výchozí polotovar- o jiném výchozím složení. Nižší obsah zinku u všech dodaných vzorků je pravděpodobně způsoben jeho vypařováním během tavení polotovaru, případně přetavením již jednou zpracovaného materiálu. Procentuální zastoupení ostatních prvků se výrazně neliší od výchozího polotovaru.

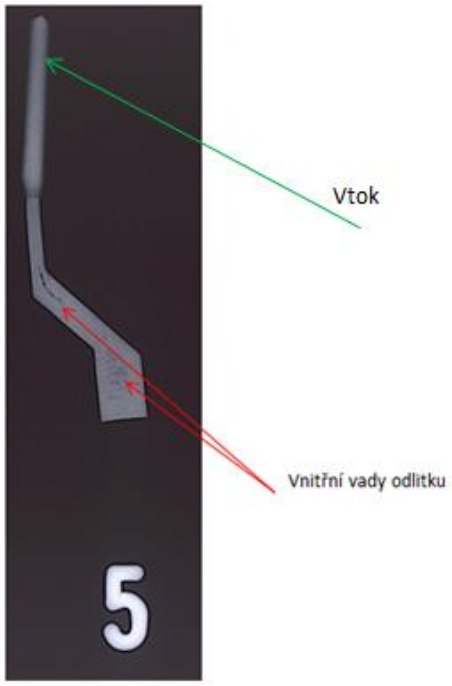
Měření mikrotvrdosti bylo provedeno u tavby N31/4 a vzorku klapky typu KL 119 98. Měření bylo provedeno napříč jednotlivými vzorky. Bylo zjištěno, že se naměřené hodnoty výrazně neliší, z čehož lze usuzovat na obdobné vlastnosti v průřezech jednotlivých vzorků. Porovnáním mikrotvrdostí vzorků těchto dvou taveb lze říci, že se mikrotvrdosti výrazně neliší. Rozdíly jsou způsobeny výskytem ředin v jednotlivých částech licí soustavy.

8.1.3 Slitina CuZn30

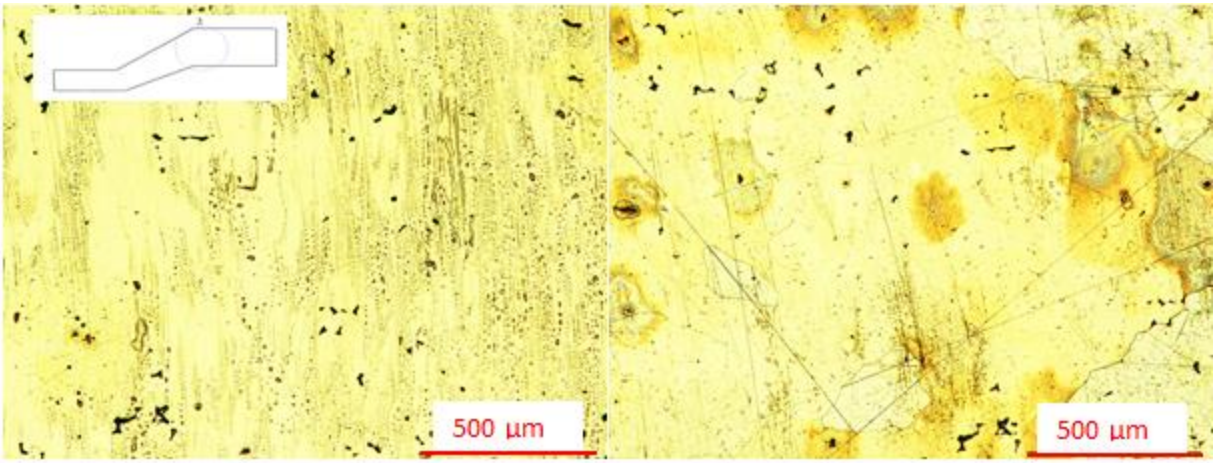
Vzorky této slitiny byly dodány ve stavu po opracování. Vzorky byly stejně, jako u předešlé slitiny dodány z různých částí stromečku viz níže uvedený obrázek.

Obrázek 35: dodané vzorky slitiny CuZn30 [vlastní zdroje]

Jako výchozí polotovar této slitiny, byl dodán plechový pás šířky 10 mm, tloušťky 1,5 mm. U této slitiny byly provedeny obdobné expertízy jako u předešlých dvou slitin. Níže uvedené obrázky zobrazují výsledky provedených expertíz u vybraných vzorků.



Obrázek 36: : RTG snímek vzorku CUZn30 KL119 98, vady odlitku se nachází v rozšiřující se části dolitku. V této oblasti, má kov zhoršenou dosazovací schopnost, díky čemuž mohou vznikat řediny. Náprava je možná například nálitkováním v blízkosti jejich výskytu popřípadě umístěním dalšího vtoku. [vlastní zdroje]



Obrázek 37: V rohu levé části obrázku je zobrazeno místo pořízení snímku. Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, v tomto případě nedošlo k zobrazení dendritické struktury ani po delším čase leptání [vlastní zdroje]

Tabulka 4:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti tavby slitiny CuZn30- vzorek KL119 98. Chemická analýza byla provedena pomocí GDOES na vstupním polotovaru.[vlastní zdroje]

	Naměřené mikrotvrdosti HV 0,05:						Průměrná hodnota:	Směrodatná odchylka:
CuNi12Zn24:	76	79	82	88	77	76	80,4	3,68

Chemické složení vzorku- místo odběru č.3:			
Chemický prvek:	**Zn:**	**Ni:**	**Cu:**
Procentuální zastoupení:	26,7	-	73,2

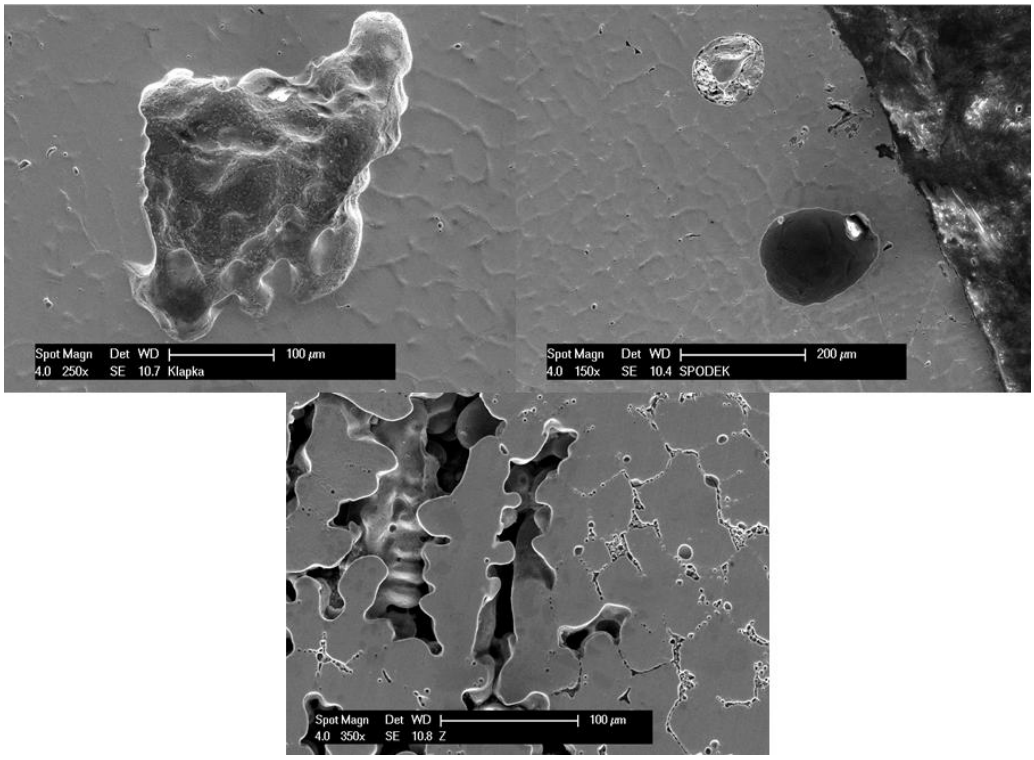
Závěr z provedených expertíz

RTG analýzou, byl u všech vzorků slitiny CuZn30 prokázán výskyt vnitřních vad. Tyto vady byly následně analyzovány pomocí světelné a elektronové mikroskopie, což umožnilo popis vzniklých vad. Vnitřní vady se ve větší míře objevovali v místech, s větším objemem oproti zbývající části odlitku. Tato místa se nacházela ve velké části případů za místem značně užším. Protože toto užší místo ztuhne rychleji než objemnější část odlitku, dojde k zamezení přístupu tekutého kovu do objemnější části odlitku a tím dojde k tvorbě dutin- ředin a staženin. Chemické složení bylo stanoveno u vstupního polotovaru. Zjištěná hodnota odpovídá normě. U dalších vzorků nebylo chemické složení stanoveno z důvodu jejich malého množství (vzorky byly použity pro jiné expertízy) a náročnosti přípravy vzorku. Měřením mikrotvrdosti napříč vzorkem KL119 98, bylo zjištěno, že se tato hodnota výrazně neliší, z čehož lze usuzovat na obdobné vlastnosti v průřezu vzorku. Rozdíly v naměřených

mikrotvrdostech jsou způsobeny výskytem vnitřních vad v jednotlivých částech zkoumaného vzorku.

8.2 Závěrečné zhodnocení dodaných vzorků

Získané vzorky, jak bylo uvedeno výše, byly rozděleny do skupin. První skupina vzorků byla použita k RTG analýze a k metalografickým výbrusům. Pomocí RTG analýzy byla určena přibližná poloha vnitřních vad. Ze zjištěné polohy vad, lze usuzovat na možné problémy se zabíhavostí slitiny a to např. díky umístění velkých ploch za menšími, kde díky tuhnutí slitiny dochází k nedostatečnému dosazování kovu. Po určení polohy vad byly na jednotlivých vzorcích provedeny metalografické výbrusy, pomocí kterých byl stanoven typ vad. Ve velké míře vzorky obsahovaly řediny, místa, kde nedošlo k zaplnění prostoru kovem, na některých vzorcích byly v těsné blízkosti povrchu objeveny bubliny, jejichž příčinou je plyn, který nestihl opustit tuhnoucí odlitek.



Obrázek 38: Snímky pořízené pomocí ŘEM. Levá část obrázku nahoře ukazuje staženinu u vzorku slitiny CuNi12Zn24-místo odběru č.3, místo pořízení snímku na vzorku č. 2, pravá část obrázku nahoře zobrazuje podpovrchové bubliny- jednu zaplněnou, druhou prázdnou- snímek byl pořízen u slitiny CuNi12Zn24- místo odběru č. 2, místo pořízení snímku na vzorku č. 5. Snímek uprostřed dole zobrazuje řediny u vzorku slitiny CuZn30 KL 119 98, místo pořízení snímku na vzorku č. 3 [vlastní zdroje]

Dále byla u jednotlivých vzorků změřena mikrotvrdost, z které je možno určit mechanické vlastnosti slitiny. Z měření mikrotvrdosti lze usuzovat, že nejlepší mechanické vlastnosti má slitina N31. Další skupina vzorků byla použita k určení chemického složení. Zjištěné chemické složení bylo následně srovnáno s chemickým složením, které udává materiálový list slitiny. Na základě jejich porovnání se dá říci, že zjištěné chemické složení se od chemického složení udaného materiálovým listem v zásadě neliší a proto by také nemělo ovlivňovat další technologické parametry. U slitiny CuNi12Zn24 byl zjištěn nižší obsah zinku oproti normě, to

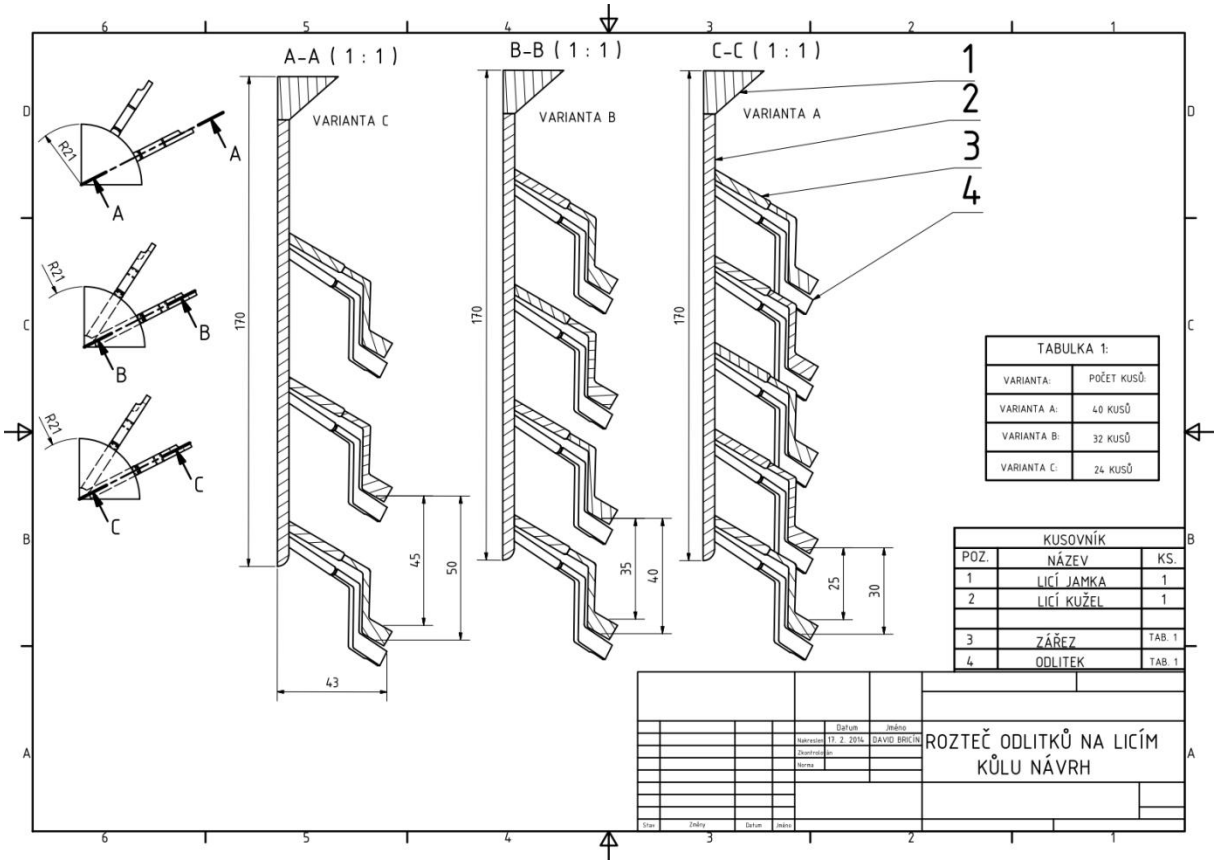
může být způsobeno jeho propalem, popřípadě použitím přetavené slitiny, dále byla u této slitiny pozorována vysoká povrchová poréznost.

9 Možnosti řešení, Návrh na snížení vad

Cílem této části práce je návrh řešení, které pomůže snížit, případně úplně odstranit procento vad nalezených ve vzorcích dodaných slitin. Z velkého množství odlévaných dílů pro hudební nástroje, byly vybrány čtyři, pro simulační výpočet. Jejich výběr byl učiněn na základě požadavků společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Jednalo se o jednoduchou klapku typu KL 119 98, na které proběhlo odladění simulačního výpočtu a tři komplexnější klapky typu KLG 512, KLG 597 a KLG 55. Protože ke geometrii těchto klapek neexistovala výkresová dokumentace, byly modely pro simulační výpočet vytvořeny pomocí technologie 3D snímání objektů tzn. Pomocí 3D scanneru. Na základě těchto modelů byla následně vytvořena jejich výkresová dokumentace, která je uvedena v příloze tohoto dokumentu. Pro simulační výpočet byly nastaveny určité parametry, které nebylo možné změnit. Jednalo se především o zachování charakteru výroby tj. i nadále bude využívána technologie lití odlitků na vytavitelný model, bude zachována původní geometrie odlitků a způsob výroby sádrové formy. Z těchto omezujících podmínek plyne, že je možné se zaměřit z hlediska vizuálního na rozpoložení odlitků na licím kůlu, změnu umístění, případně změnu počtu zářezu ústících do odlitku. Dále je možné z hlediska metalurgického zaměřit se na používané teploty, během lití- teplotu přehřátí slitiny a během výpalu forem- teplotu, při které je forma připravena k odlévání. Z hlediska chemického složení navrhnout nové typy slitin, které budou svými mechanickými vlastnostmi vyhovovat funkci odlévaných výrobků. Prvá část této kapitoly pojednává o možnosti použití úpravy licí soustavy tj. o možnosti změny rozložení odlitků na licím kůlu a změně umístění zářezů ústících do odlitku. Druhá část pojednává o možnosti použití jiných licích teplot a slitin než jsou v současné době používány. V této části jsou uvedeny navrhované slitiny, jejich vlastnosti a způsob jejich výběru a volba vhodných teplot přehřátí.

9.1 Změna rozložení odlitků na licím kůlu a změna rozložení zářezů na odlitku

Tato prvá část návrhu variant řešení výše uvedené problematiky má za cíl zjistit, jaký vliv má na poréznost odlévané slitiny rozmístění odlitků na licím kůlu, tedy jejich vzájemná vzdálenost a jakým způsobem ovlivňuje tuto poréznost umístění nebo rozložení zářezů ústících do odlitku. Jako první je zde uveden návrh rozložení odlitků na licím kůlu. Simulační výpočet byl u tohoto návrhu proveden pro klapku typu KL 119 98. Níže uvedený obrázek zobrazuje výkres, na kterém je návrh rozložení odlitků na licím kůlu. Na výkresu jsou uvedeny tři varianty řešení, které se od sebe liší počtem odlitků na licím kůlu a jejich vzájemnou roztečí. Tato rozteč se pohybuje od vzdálenosti 30 mm po vzdálenost 50 mm s krokem po 10 mm. Dle tohoto výkresu byly následně vytvořeny modely pro simulační výpočet, jehož výsledek je uveden za níže uvedeným obrázkem výkresu návrhu variant rozložení odlitků na licím kůlu.

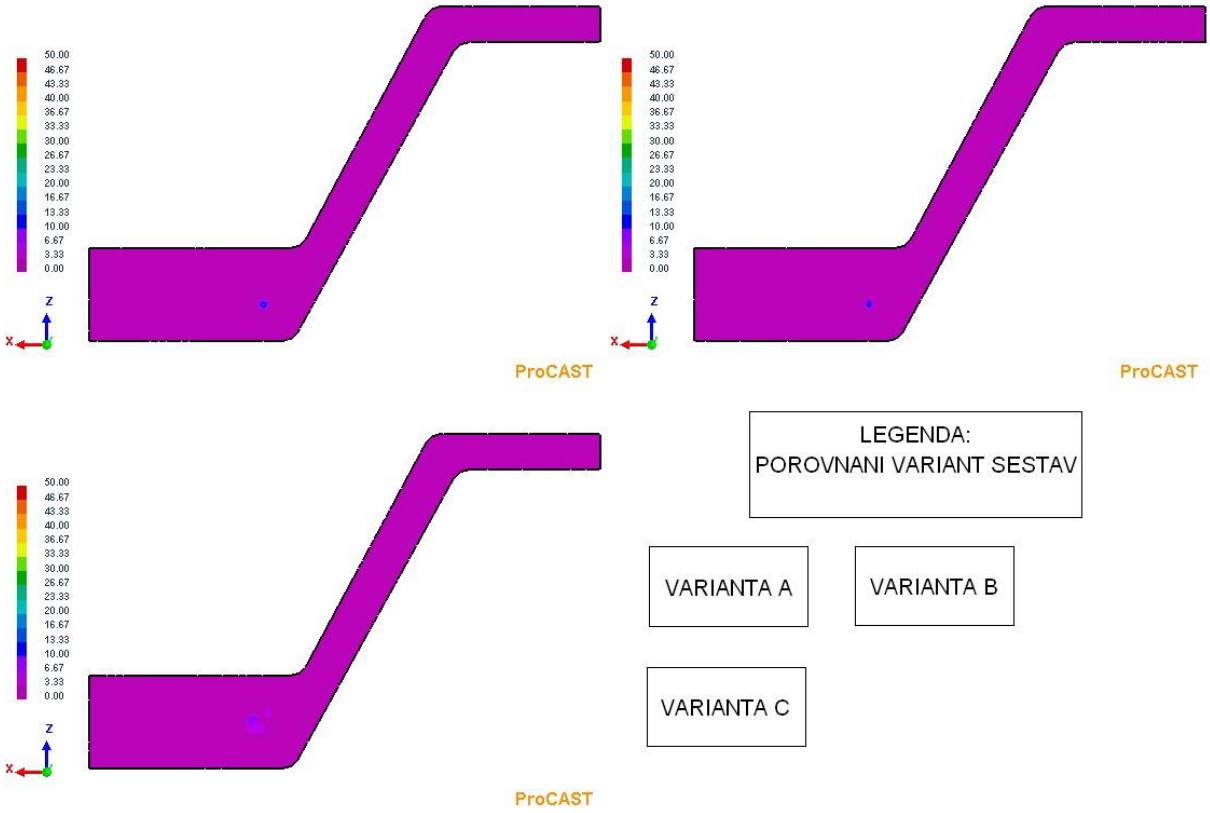


Obrázek 39: Navrhované varianty rozložení odlitků na licím kůlu, odlitek typu KL 119 98[vlastní zroje]

Níže uvedené obrázky zobrazují výsledek simulačního výpočtu na detailu klapky, která je umístěna na modelech vytvořených dle výše uvedeného výkresu. Jedním z hodnotících krytérií při výrobě součástek pro hudební nástroje, je jich velmi nízká povrchová poréznost a drsnost. Její zachování má za cíl zlepšení vzhledových vlastností a snížení času a pracnosti při jejich dalším zpracování např. omílání.

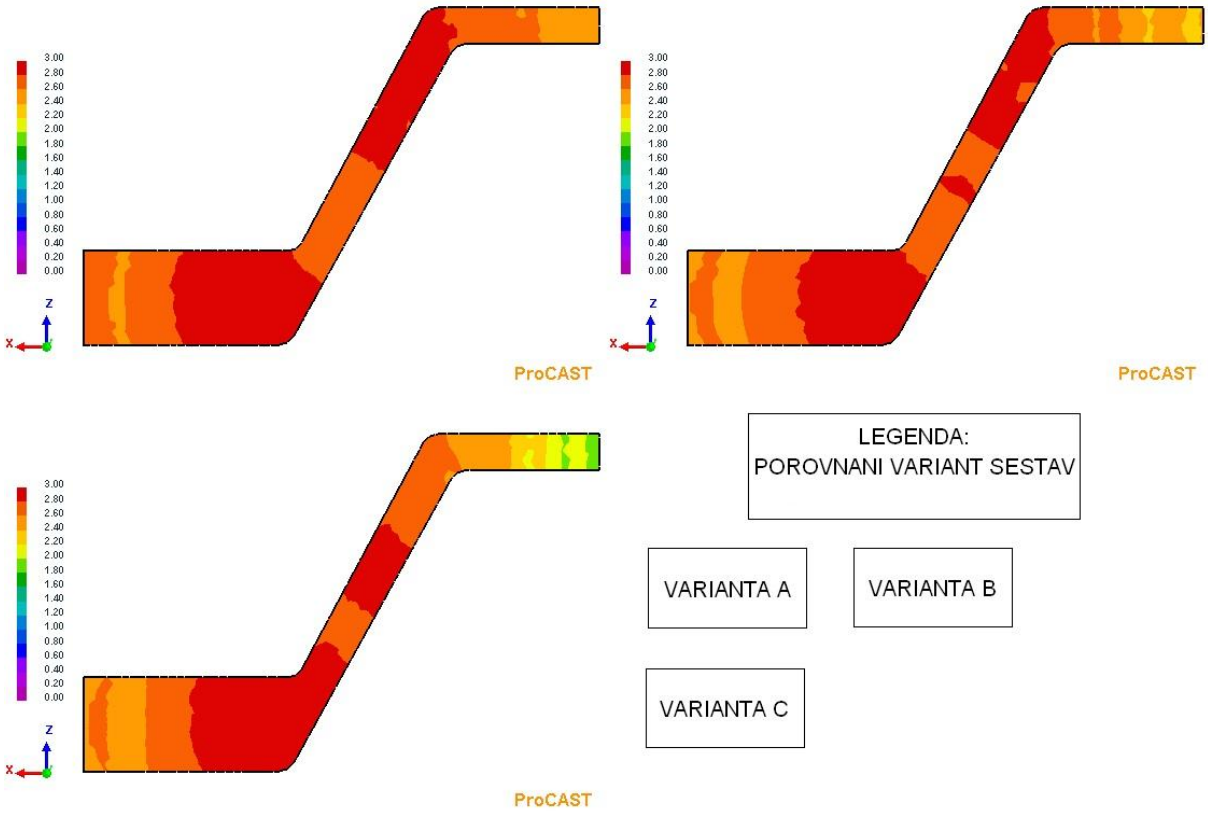
Z tohoto důvodu je nutné při vyhodnocování simulačního výčtu nastavit hodnoty zobrazované poréznosti tak, aby tato drobná poréznost byla dobře rozeznatelná. Zde je na prvním obrázku

uvedeno porovnání výše uvedených variant při nastaveném stupni zobrazení porezity na hodnotu 50%. To znamená, že místa, na kterých je poréznost, zastoupení kovu a prázdného místa řediny na stejné úrovni anebo pokud místo obsahuje více prázdných míst ředin zobrazuje se červenou barvou. Při stoupajícím množství pevné fáze a úbytku ředin přechází tato červená barva v určitých stupních k fialové barvě, která zastupuje poréznost blížící se hodnotě nula, tedy místo zcela zaplněné kovem. Při tomto stupni zobrazení, se jeví odlitek jako by byl téměř bez vad, přičemž rozdíly v drobné poréznosti se nedají mezi navrhovanými variantami odlišit. Z toho důvodu, je na dalším obrázku zobrazeno porovnání při nastaveném stupni porezity 3%, kdy vyšší poréznost jak 3% bude zobrazena červenou barvou. Toto nastavení je z hlediska posuzování drobné poréznosti výhodnější, protože umožňuje jemnější nastavení stupnice zobrazující poréznost odlitku.



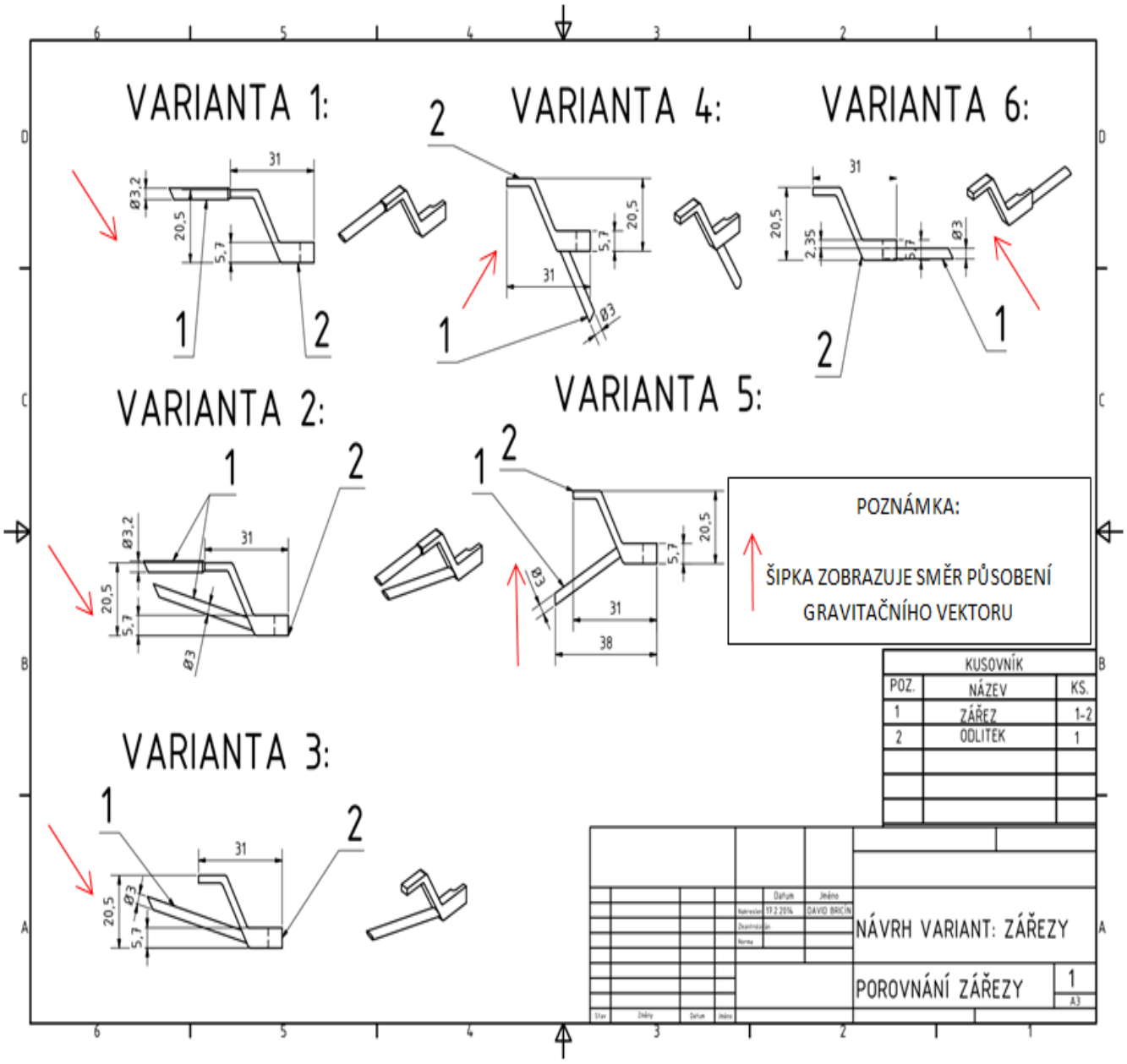
Obrázek 40: Finální porovnání tří variant rozložení odlitků na licím kůlu.[vlastní zdroje]

Níže uvedený obrázek zobrazuje porovnání navrhovaných řešení při nastaveném stupni poresity 3%. Jak je z obrázku patrné, jednotlivé varianty se od sebe ve stupni poréznosti nepatrně liší. Z těchto odlišností lze následně vyhodnotit, která varianta rozmístění odlitků na licím kůlu je pro tento typ odlitku výhodnější.



Obrázek 41: Finální porovnání tří variant rozložení odlitků na licím kůlu.[vlastní zdroje]

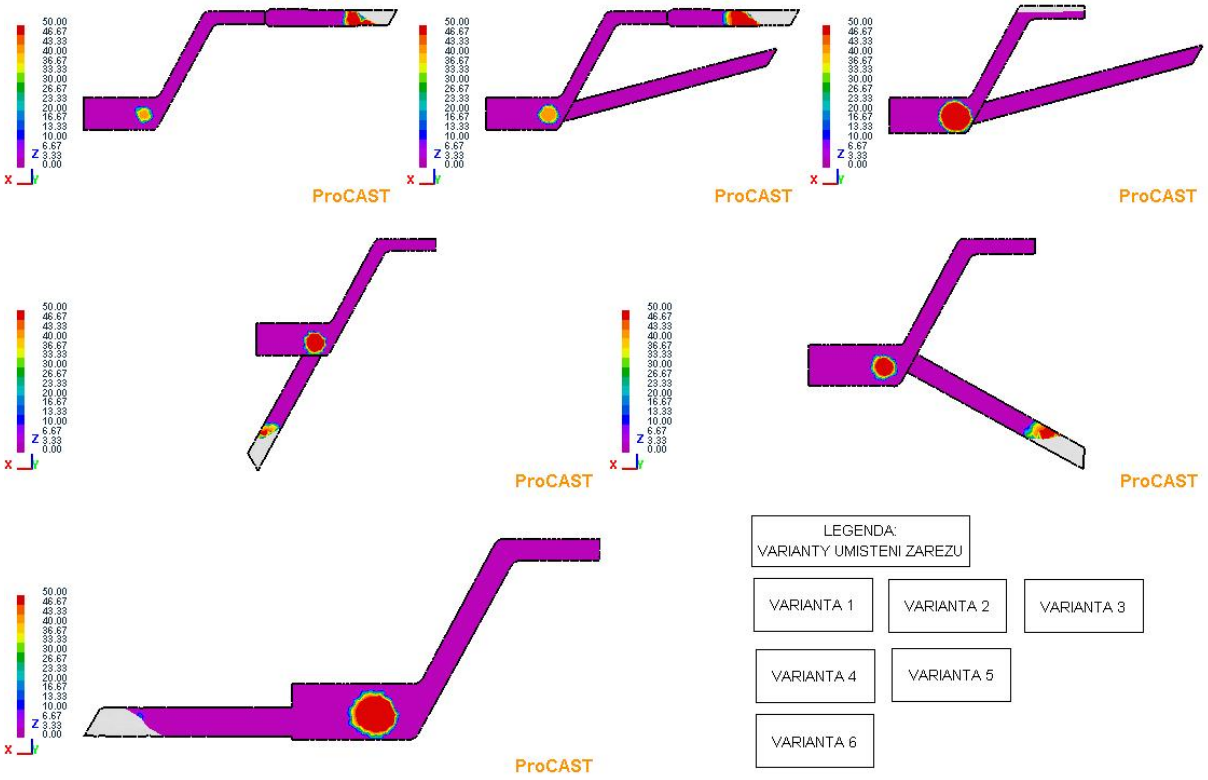
Z výše uvedených dvou obrázků zobrazující výsledek simulačního výpočtu pro variantu, která se zabývá rozložením odlitků na licím kůlu je patrné, že vlastní rozložení odlitků na licím kůlu má na vnitřní jakost odlitků vliv avšak tento vliv je velmi malý. Z obrázku, který zobrazuje stupeň poréznosti 50% a vyšší je u varianty C nejnižší poréznost v nejširší části odlitku. Druhé dvě varianty nevykazují znatelné rozdíly v poréznosti. Z druhého obrázku je patrné, že varianta C obsahuje větší procento oranžové a dalších barev, které značí nižší poréznost oproti dvěma zbývajícím. Z tohoto lze usuzovat, že varianta rozmístění odlitků C je pro tento typ odlitku nejvýhodnější. V další části této kapitoly bude pomocí simulačního výpočtu zkoumán vliv umístění zářezu ústícího do odlitku. Simulační výpočet byl proveden u klapky typu KLG 512, KLG 597, KLG 55 a klapky typu KL 119 98. Níže bude uveden variantní návrh umístění zářezů u klapky typu KL 119 98, za nímž bude následovat obrázek zobrazující výsledek simulačního výpočtu. Zbylé návrhy a výsledky simulačních výpočtů týkající se klapek typu KLG 512, KLG 597 a KLG 55 jsou uvedeny v přílohách této diplomové práce.



Obrázek 42: Navrhované varianty umístění zářezů, odlitek tupu KL 119 98[vlastní zdroje]

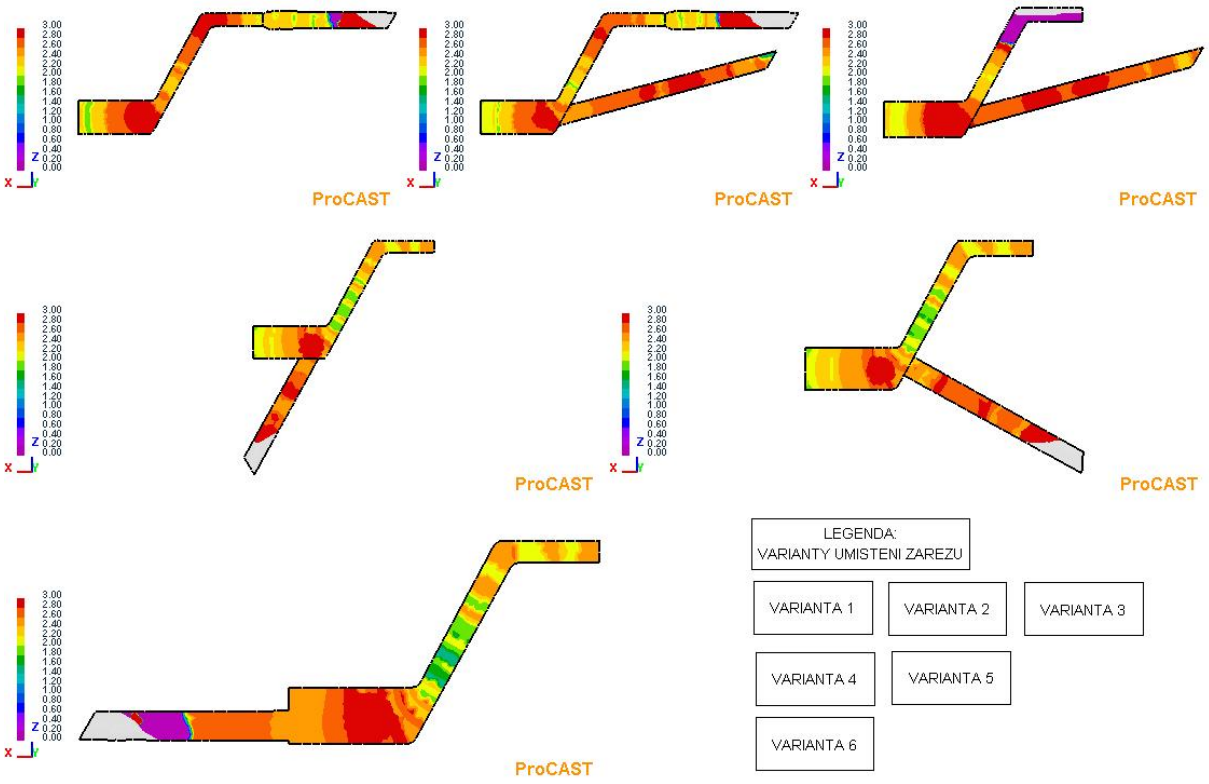
Výše uvedený výkres, zobrazuje šest různých variant umístění zářezu do odlitku, přičemž je u každého návrhu uvedeno, jakým směrem je tento odlitek umístěn ve formě.

Na základě výše uvedených návrhů byly vytvořeny modely pro simulační výpočet. Výsledky tohoto simulačního výpočtu jsou zobrazeny na níže uvedených obrázcích. Jak zde bylo uvedeno výše, zde jsou uvedeny výsledky simulačního výpočtu pro klapku typu KL 119 98. První obrázek zobrazuje výsledky při nastaveném stupni poréznosti 50%. Z tohoto porovnání se jeví jako nejjakostnější varianty č. 1 a č. 2 zatímco varianty č. 3 a č. 6 se jeví jako nejméně jakostí. Z tohoto obrázku je patrné, že takovéto umístění zářezů do odlitku má za následek velkou poréznost v nejširší části odlitku. Na druhém obrázku je zachyceno porovnání tohoto návrhu při nastaveném stupni poréznosti 3%. Tedy při studiu drobné poréznosti v objemu odlitku.



Obrázek 43: Porovnání vyskytující se poréznosti v odlitku při různě umístěných zářezech ústících do odlitku[vlastní zdroje]

Z tohoto porovnání je patrné, že nejhorší poréznost se vyskytuje u varianty umístění zářezu č. 3, kde nedošlo k úplnému zaplnění odlitku tekutým kovem. U varianty č. 6 je drobná poréznost ve sledovaném objemu nižší než u varianty č.1 a č. 2 avšak tato varianta má vysoké procento poréznosti v nejširší části odlitku viz výše uvedený obrázek. Nejnižší procento drobné poréznosti v objemu odlitku zobrazují výsledky simulačního výpočtu pro varianty č.4 a č.5, za kterými následuje varianta č. 2 a č.1



Obrázek 44:Porovnání vyskytující se poréznosti v odlitku při různě umístěných zářezech ústících do odlitku[vlastní zdroje]

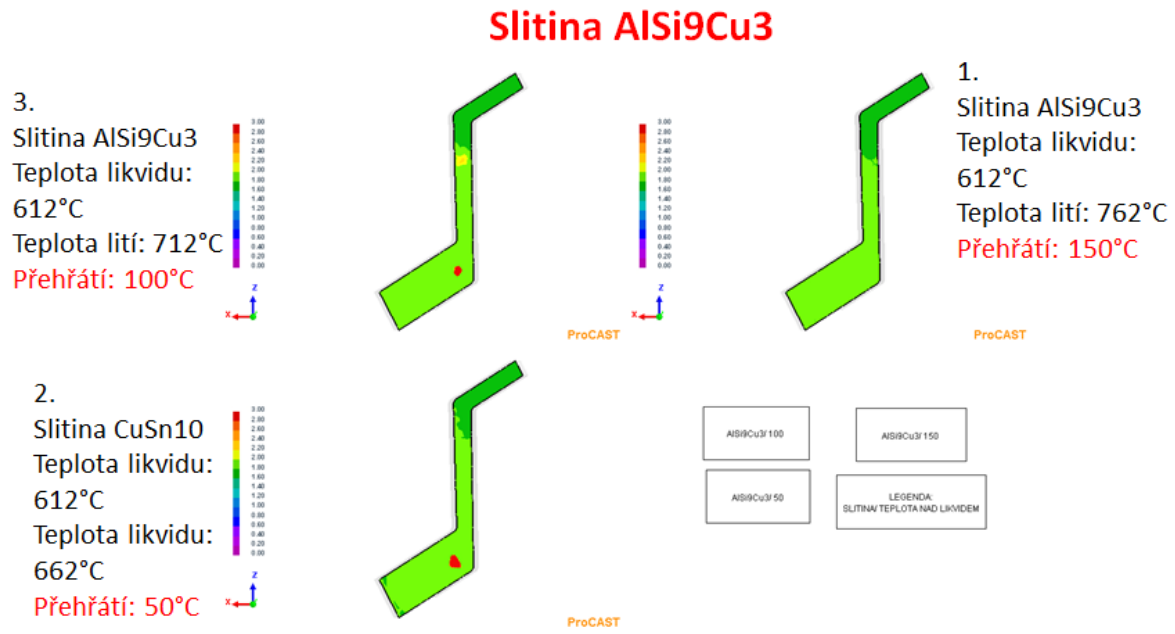
Z výše uvedených obrázků, které porovnávají výsledky simulačního výpočtu pro různé varianty umístění zářezů, je patrné, že umístění zářezu do odlitku má podstatně vyšší vliv na jakost odlitku než rozmístění těchto odlitků na licím kůlu. Z navrhovaných variant se jako nevyhovující umístění zářezu jeví jeho umístění do nejširší části odlitku, které mělo za následek vytvoření velké oblasti s porézností vyšší jak 50% varianta č. 6 a č. 3. Jako nejvýhodnější se z hlediska objemu drobné poréznosti jeví varianty č. 5 a č. 4 avšak tyto varianty mají v rozšířené části odlitku oblast s výskytem poréznosti vyšší jak 50%, což znamená vyšší výskyt poréznosti oproti variantám č. 1 a č. 2. S tímto problémem by bylo možné se vypořádat umístěním širšího zářezu v místě napojení do odlitku případně změnou jiného jeho parametru, což by mělo za cíl zvýšení dosazovací schopnosti kovu do odlitku a tím zvýšení jakosti odlitku.

Výše uvedený text se zabývá vlivem rozmístění odlitků na licím kůlu a vlivem umístění zářezů do odlitku. Navazující část se zabývá vlivem používané slitiny na jakost odlitku.

9.2 Použití jiných materiálů a jiných licích teplot

Prvním navrhovaným řešením, je použití jiných slitin než jsou v současné době používané a tyto slitiny následně porovnat s již používanými. Prvním krokem byla volba slitin, které by mohli současně používané slitiny nahradit. Volba proběhla na základě dostupnosti, ceny, mechanických a metalurgických vlastností slitin. Dále byla volba provedena tak, aby zde byly zastoupeny slitiny s různým stupněm velikosti rozdílu mezi teplotou solidu a likvidu a to z důvodu zkoumání jeho vlivu na povrchovou poréznost slitin. Prvními navrhovanými slitinami byly slitiny na bázi mědi. Tyto slitiny byly následně porovnány s používanými slitinami a slitinami na bázi zinku a hliníku, které jsou běžně používány pro jiné aplikace (výroba dílů pro automobilový průmysl). V níže uvedených podkapitolách je uveden způsob výběru vhodné slitiny a jejich porovnání na základě mechanických vlastnosti, ceny a metalurgických vlastností. Při výběru slitin byla zkoumána také závislost velikosti přehřátí dané slitiny na velikosti a rozmístění vad v odlitku.

Pro experiment byly navrženy tři teploty přehřátí a to teplota 50^0C, 100^0C a 150^0C. Jejich porovnáním byla následně stanovena ideální teplota přehřátí pro danou slitinu, viz níže uvedený obrázek.



Obrázek 45: Příklad poréznosti slitiny AlSi9Cu3, který ukazuje vliv velikosti přehřátí slitiny na velikost a rozložení poréznosti v odlitku typu KL 119 98 [vlastní zdroje]

9.2.1 Navrhované materiály

Prvním krokem byl výběr vhodných slitin. Jak bylo uvedeno výše, byly vybrány takové slitiny, u kterých se mění rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu. Z toho důvodu byli vybrání kandidáti mezi slitinami, s velkým rozdílem těchto dvou teplot. Do této skupiny patří bronzy, u kterých je hlavním legujícím prvkem cín. U těchto slitin se teplota rozdílu L/S pohybuje od 265-300^{0}C. Druhou skupinu tvoří slitiny, u kterých je velikost rozdílu malá. Do této skupiny byly vybrány slitiny na bázi mědi, u kterých je hlavním legujícím prvkem hliník (CuAl5 a CuAl7Fe2). U těchto slitin se teplota rozdílu pohybuje od 11^{0}C do 30^{0}C. Dále do této skupiny patří slitiny mosazí (CuZn30 a CuZn40) a slitiny zinku tzv. ZAMAKY (ZnAl4 a ZnAl4Cu3), u kterých se tato teplota rozdílu mezi teplotami solidu a likvidu pohybuje od 6^{0}C do 11^{0}C. Jako vybrané přechodové slitiny, by se daly označit slitiny, u kterých se teplota L/S pohybuje mezi 50^{0}C-200^{0}C. Mezi tyto slitiny patří slitiny hliníku (AlSi9Cu3 a AlSi7,5Mg).

Nyní trochu blíže k navrhovaným slitinám. O slitinách mosazí a cínových bronzech bylo pojednáno výše v kapitole *„Materiály používané ve společnosti AMATI s.r.o. a u konkurenčních firem“*

Dále bude postupně pojednáno o zbývajících slitinách, kterých se týká simulační výpočet procesu odlévání.

První skupinu tvoří hliníkové bronzy pro simulační výpočet zastoupené slitinou CuAl5 a CuAl7Fe2. Slitiny hliníkových bronzů se vyznačují dobrou korozní odolností, mechanickými vlastnostmi atd. Se stoupajícím obsahem hliníku se zvyšuje pevnost slitiny. Mezi legující prvky hliníkových bronzů patří železo, které ovlivňuje jemnozrnnost slitiny, mangan, který zvyšuje pevnost a odolnost proti korozi a například nikl, který zvyšuje pevnost slitin. Hliníkové bronzy se používají na součásti, které musí vykazovat odolnost proti korozi a tření.

Druhou skupinu tvoří slitiny zinku a to slitiny ZnAl4 a ZnAl4Cu3. Tyto slitiny se v převážné míře používají na lití odlitků pod tlakem. Tyto slitiny procházejí během tuhnutí velkými objemovými změnami, které jsou spojeny se vznikem vnitřních pnutí a trhlin. Hlavním legujícím prvkem u těchto slitin je měď, která zvyšuje pevnost slitin a například hořčík, jehož přidáním se dá snížit vnitřní pnutí, které vzniká v důsledku kolaugulace fáze β. Slitiny zinku se používají například pro odlitky do automobilového průmyslu nebo na drobné odlitky různého charakteru např. spojovací elementy zahradních altánů.

Třetí a poslední skupinu tvoří slitiny hliníku. Pro simulační výpočet tuto skupinu zastupují slitiny AlSi9Cu3 a AlSi7,5Mg. Jedná se o slitiny, u kterých je hlavním legujícím prvkem křemík tzv. siluminy. Křemík v těchto slitinách zlepšuje slévárenské vlastnosti jako je například zabíhavost, dále také v závislosti na obsahu zlepšuje mechanické vlastnosti slitiny. Mezi další legující prvky patří například měď. Jejím přidání dochází ke zlepšení pevnosti slitiny, ale klesá její korozní odolnost. Dalším legujícím prvkem může být například chróm nebo nikl, který se přidává z důvodu odstranění nežádoucího vlivu železa, které snižuje mechanické vlastnosti slitiny jako je její pevnost nebo tažnost. Tyto slitiny siluminy se používají například pro složité tenkostěnné odlitky např. součásti motorů nebo převodovek. Níže uvedená tabulka obsahuje informace o základních mechanických a metalurgických

vlastnostech navrhovaných slitin (vyjma slitin uvedených v kapitole Materiály používané ve společnosti AMATI s.r.o. a u konkurenčních firem).

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti navrhovaných slitin

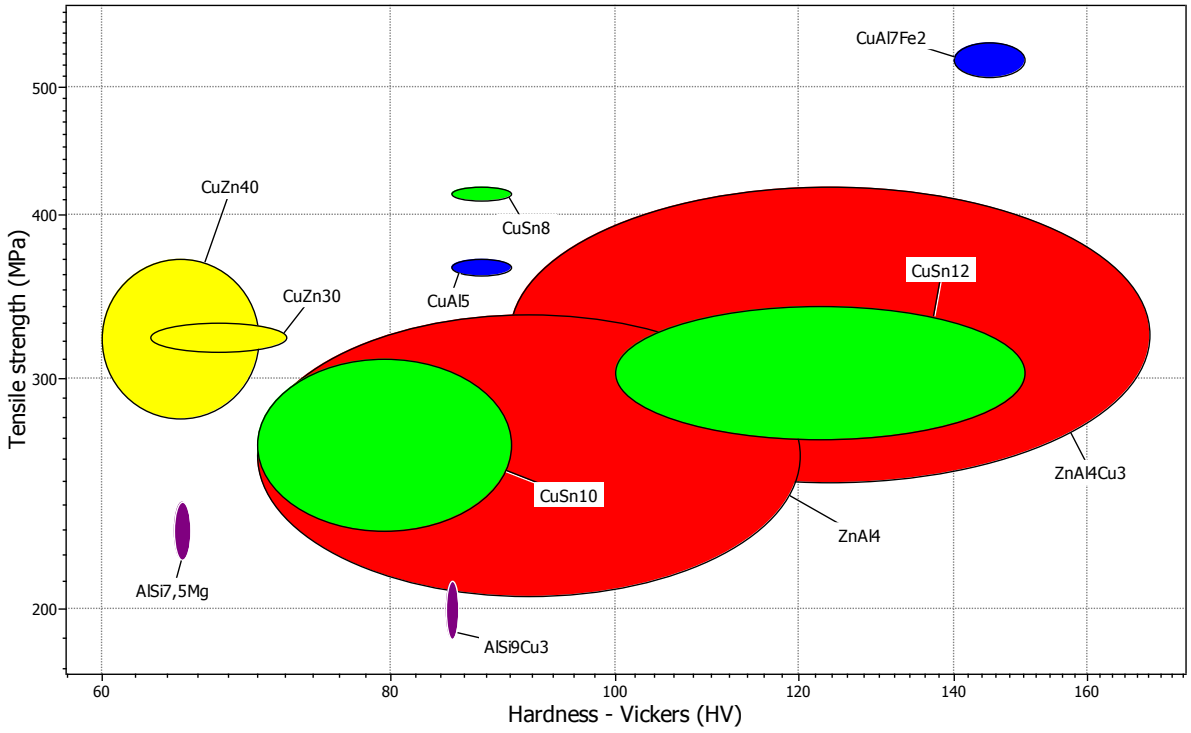
Materiál **CuAl5**:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (MHB) (^{0}C):					
1030	1063					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRF):					
415	77					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Al:	-	-	-
8,17		95	5	-	-	-
Materiál **CuSn8**:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
718	1018					
Pevnost (Mpa):	Tvrdost (HRB):					
370-630	73-82					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Sn:	-	-	-
8,8		92	8	-	-	-
Materiál **CuSn12**:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
709	974					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
260-300	80-90					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Sn:	-	-	-
8,7		88	12	-	-	-
Materiál **ZnAl4** (ZAMAK 3):						
Teplota solidu(^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
381	387					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
285	72-100					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Zn:	Al:	-	-	-
6,6		96	4	-	-	-
Materiál**ZnAl4Cu3** (ZAMAK 2):						
Teplota solidu(^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
379	390					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
360	98-100					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Zn:	Al:	Cu:	-	-
6,6		93	4	3	-	-
Materiál**AlSi9Cu3**:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
479	612					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
240	80					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Al:	Si:	Cu:	-	-
2,75		89	9	3	-	-

Tabulka 6:Pokračování tabulky 5: Mechanické vlastnosti navrhovaných slitin[11]

Materiál **AlSi7,5Mg**:						
Teplota solidu(^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
554	612					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
140-240	50-75					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Al:	Si:	Mg:	-	-
2,7		~92	7,5	<1	-	-
Materiál **CuAl7Fe2**:						
Teplota solidu (^{0}C):	Teplota likvidu (^{0}C):					
1040	1051					
Pevnost (MPa):	Tvrdost (HRB):					
565-550	80-84					
Hustota (g/cm^3):	Chemické složení (%):	Cu:	Al::	Fe	-	-
7,89		91	7	2	-	-

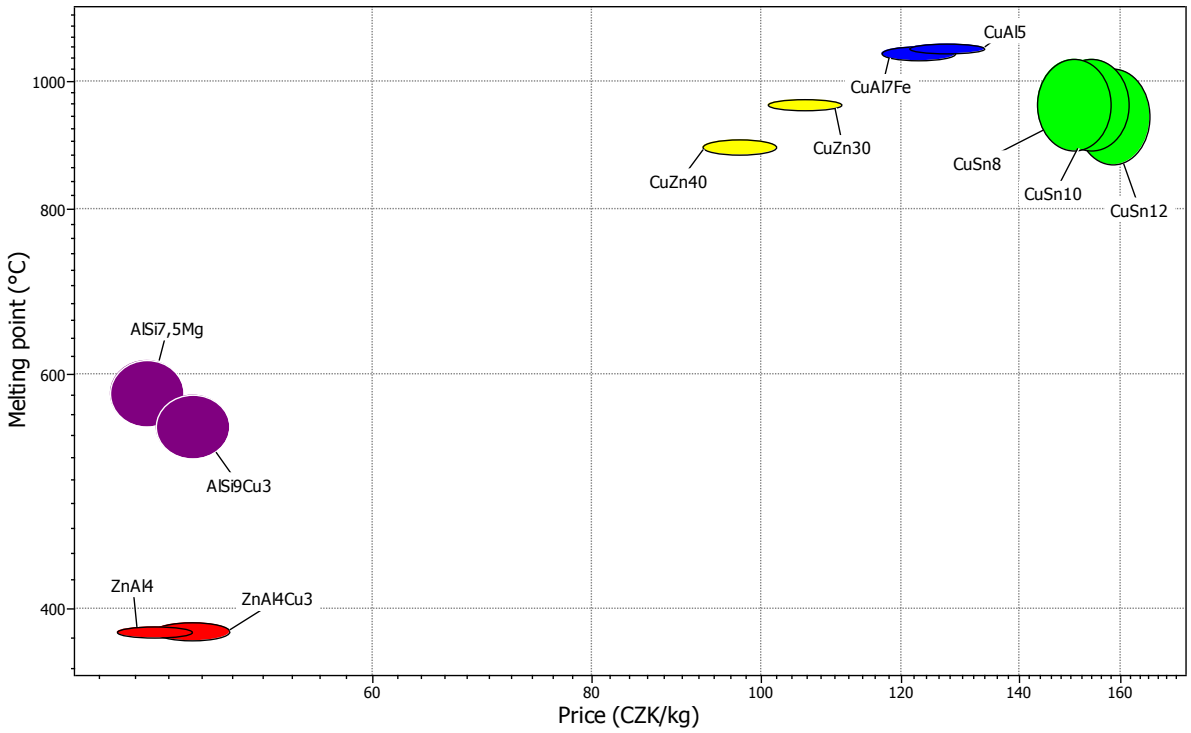
9.2.2 Navrhované materiály slitiny- porovnání

Navrhované slitiny byly mezi sebou porovnány a to obdobným způsobem jako materiály uvedené v kapitole Porovnání používaných materiálů. Níže uvedené grafy zobrazují tato porovnání.



Graf 7: Porovnání navrhovaných slitin na základě jejich mechanických vlastností tvrdosti HV a pevnosti v tahu [4]

[11] *Data uvedená ve výše uvedené tabulce byla získána pomocí simulačního výpočtu v programu PROCAST a výsledek byl ověřen publikací ASM HANDBOOK VOL. 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose materials; vydavatel ASM INTERNATIONAL, dostupné na katedře materiálu a strojírenské metalurgie fakulty strojí Západočeské univerzity v Plzni*

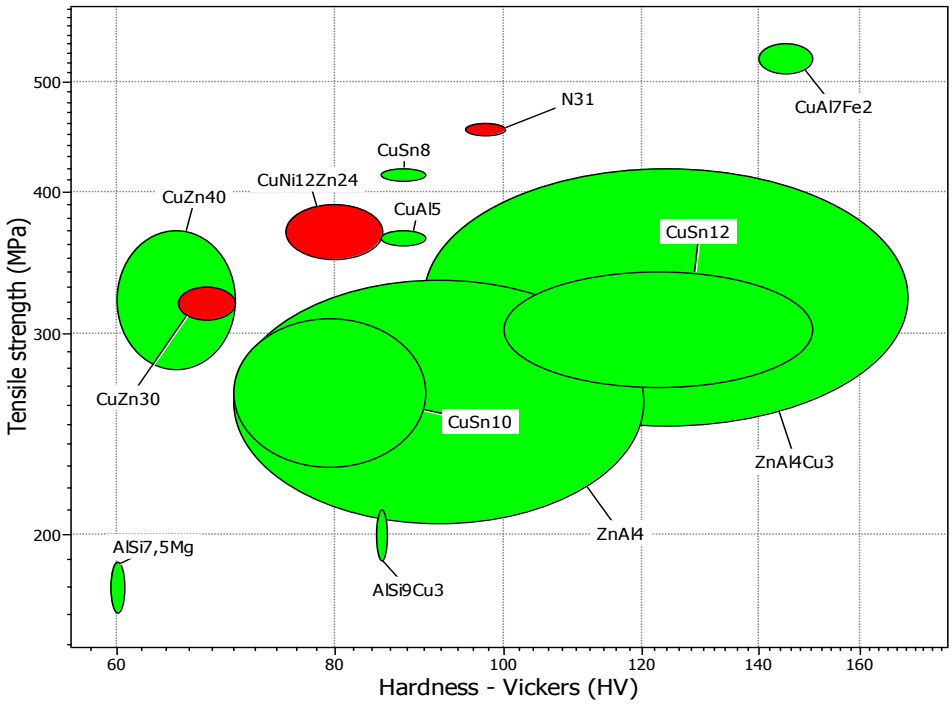


Graf 8: Porovnání navrhovaných slitin v závislosti na ceně a rozpětí teploty tavení slitiny [4]

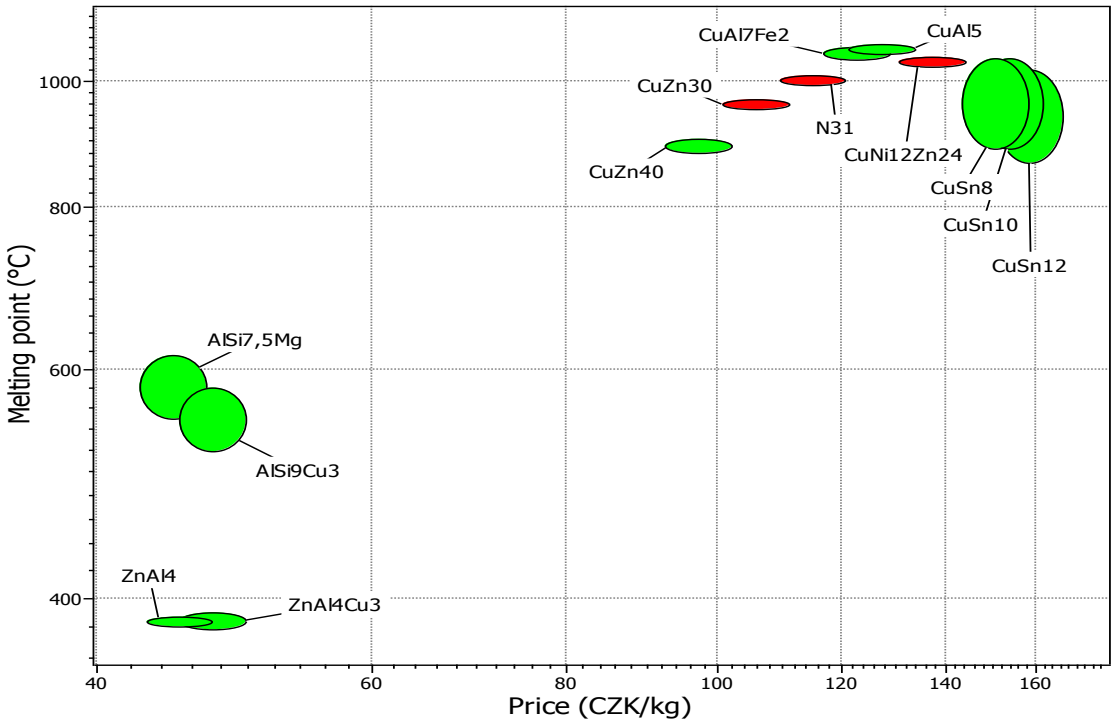
Z výše uvedeného srovnání navrhovaných slitin, pro simulační výpočet, plyne jejich požadovaná rozmanitost. Z porovnání slitin je vidět, že byly vybrány kandidáti s různým rozptylem teplot solidu a likvidu a s různou teplotou odlévání. Déle byli vybrání kandidáti s přibližně stejnými mechanickými vlastnostmi a různou pořizovací cenou.

Z tohoto porovnání je také patrné, že slitiny s nižší pořizovací cenou mají nižší teplotu odlévání, díky tomu dochází k menšímu opotřebení licího zařízení, přičemž dosahují přibližně takových hodnot v mechanických vlastnostech, jako slitiny s vyšší teplotou odlévání a vyšší pořizovací cenou. Mezi první skupinu slitin patří slitiny zinku- zamaky ZnAl4 a ZnAl4Cu3 a slitiny hliníku AlSi9Cu3 a AlSi7,5Mg. Druhou skupinu tvoří slitiny na bázi mědi a zinku CuZn30 a CuZn40 a bronzy, slitiny na bázi mědi s dalšími legujícími prvky vyjma zinku. Tuto část druhé skupiny slitin tvoří hliníkové bronzy CuAl5 a CuAl7Fe2 a cínové bronzy CuSn8, CuSn10 a CuSn12.

Dále je možno tyto navrhované slitiny porovnat se slitinami, které jsou uvedeny v kapitole Porovnání používaných materiálů, přesněji se jedná o materiály, které jsou používány ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Viz níže uvedené grafy.



Graf 9Porovnání navrhovaných slitin se slitinami dodanými pro experimentální část diplomové práce společností AMATI DEMAK s.r.o. (červená barva) na základě jejich mechanických vlastností tvrdosti HV a pevnosti v tahu [4]



Graf 10:Porovnání navrhovaných slitin se slitinami dodanými pro experimentální část diplomové práce společností AMATI DEMAK s.r.o. (červená barva) v závislosti na ceně a rozpětí teploty tavení slitiny [4]

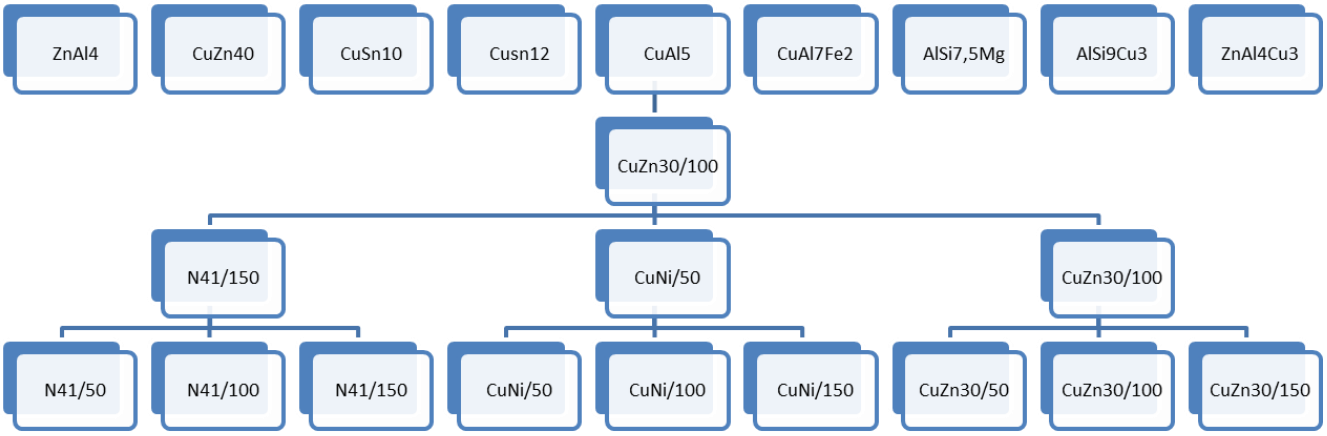
Jak bylo ze srovnání navrhovaných slitin pro simulační výpočet vidět, tak toto porovnání obsahuje některé slitiny uvedené v kapitole Porovnání používaných materiálů. Tyto materiály jsou zde uvedeny z toho důvodu, že je používají (používaly), kromě společnosti AMATI DEMAK s.r.o. i konkurenční společnosti.

9.2.3 Navrhované materiály způsob výběru

U výše uvedených slitin byl proveden výběr nejvhodnějšího kandidáta následujícím způsobem:

1. U každé slitiny byla určena „ideální“ teplota přehřátí (jak u již používaných slitin, tak u nově navrhovaných slitin)
2. Následně byli výše vybraní kandidáti (s „ideální teplotou přehřátí“)porovnáni mezi sebou.
3. Jejich porovnáním byli určeni nejvhodnější kandidáti.
4. Vybraní kandidáti byli následně odliti pro ověření správnosti výpočetní simulace procesu odlévání.

Níže uvedený graf zobrazuje, jakým způsobem byli mezi sebou jednotliví kandidáti porovnáváni.



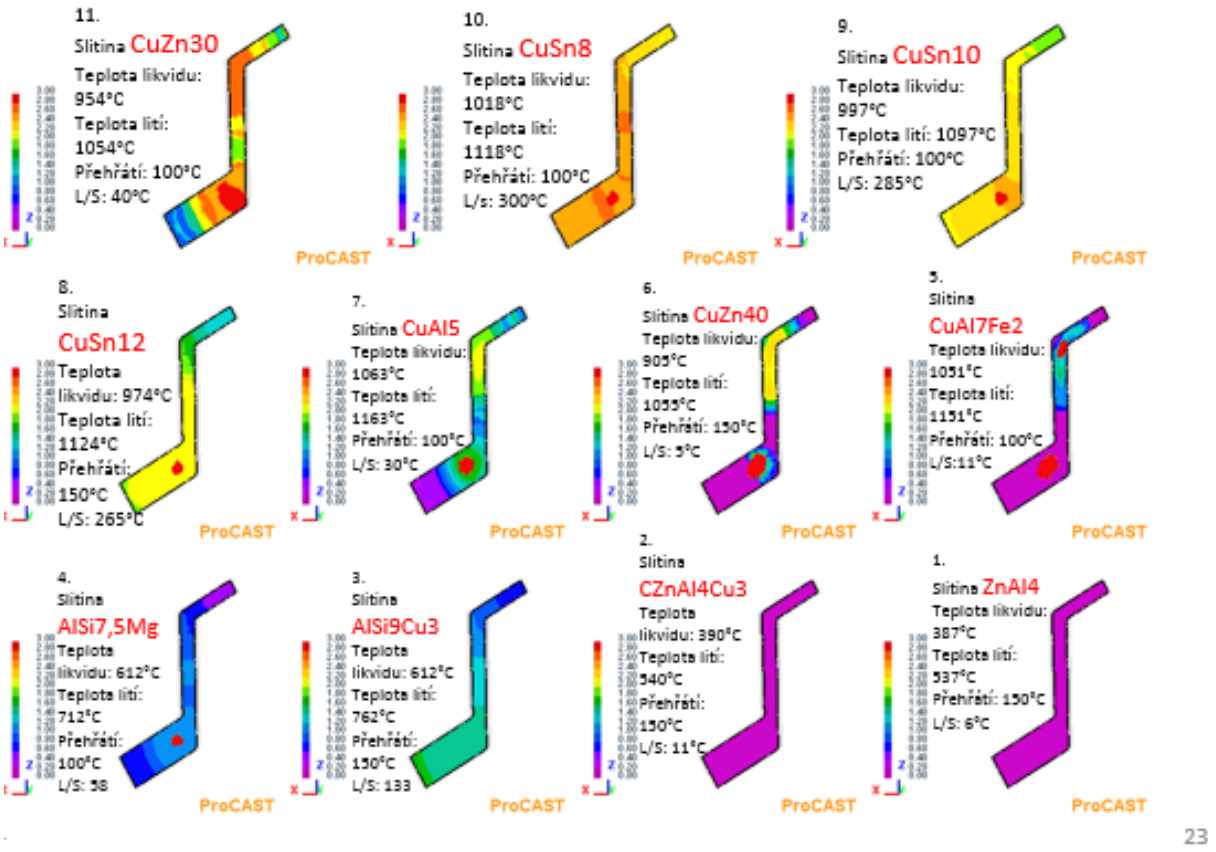
Obrázek 46: Způsob výběru vhodných kandidátů- Spodní část obrázku zobrazuje výběr kandidáta u používaných slitin. Nejvhodnější kandidát z této skupiny je následně porovnán s nejlepšími kandidáty navrhovaných slitin. (vysvětlivka: xx/číslo- xx…používaná/navrhovaná slitina, číslo- teplota přehřátí slitiny- do dalšího stupně postupuje vždy slitina, která při dané teplotě přehřátí vykazuje nižší poréznost)

Pro výběr vhodného kandidáta byl použit, jak bylo uvedeno výše simulační výpočet. Pro tento výpočet museli být spolu s teplotou přehřátí slitiny uvedeny- nastaveny další parametry. Tyto parametry simulace jsou uvedeny v níže uvedené tabulce.

Tabulka 7: Počáteční parametry simulačního výpočtu.[vlastní zdroje]
*** K této hodnotě bylo dospěno po konzultaci a na základě porovnání simulačních výpočtů s rozdílným parametrem H s metalografickým a RTG snímkem struktury.**
**** velikost kyvety se měnila dle velikosti odlévaného odlitku.**
***** teplota lití slitiny používaná ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o.**

Způsob lití:	Tlak působící na počátku lití:	Přestup tepla mezi formou a slitinou H:*	Materiál formy:	Lití na střed licí jamky
Gravitačně na vytavitelný model	0,8 bar	1000	sádra	ANO
Velikost použité kyvety (Dxh[mm]) :**	teplota kyvety:	Čas odlití (čas ve kterém dojde k vyplnění dutiny formy):	Výstupní průměr licího kelímku:	Teplota lití slitiny CuZn30:***
100x220 a125x220 dle velikosti odlitku	400^{0}C	2-3 sekundy	8 mm	1050^{0}C

Po dosazení výše uvedených parametrů byla u každé slitiny provedena simulace procesu odlévání a to při třech různých teplotách přehřátí slitiny. Výběr vhodných kandidátů, s nejnižší porézností byl proveden, dle výše uvedeného schématu u klapky typu KL 119 98.

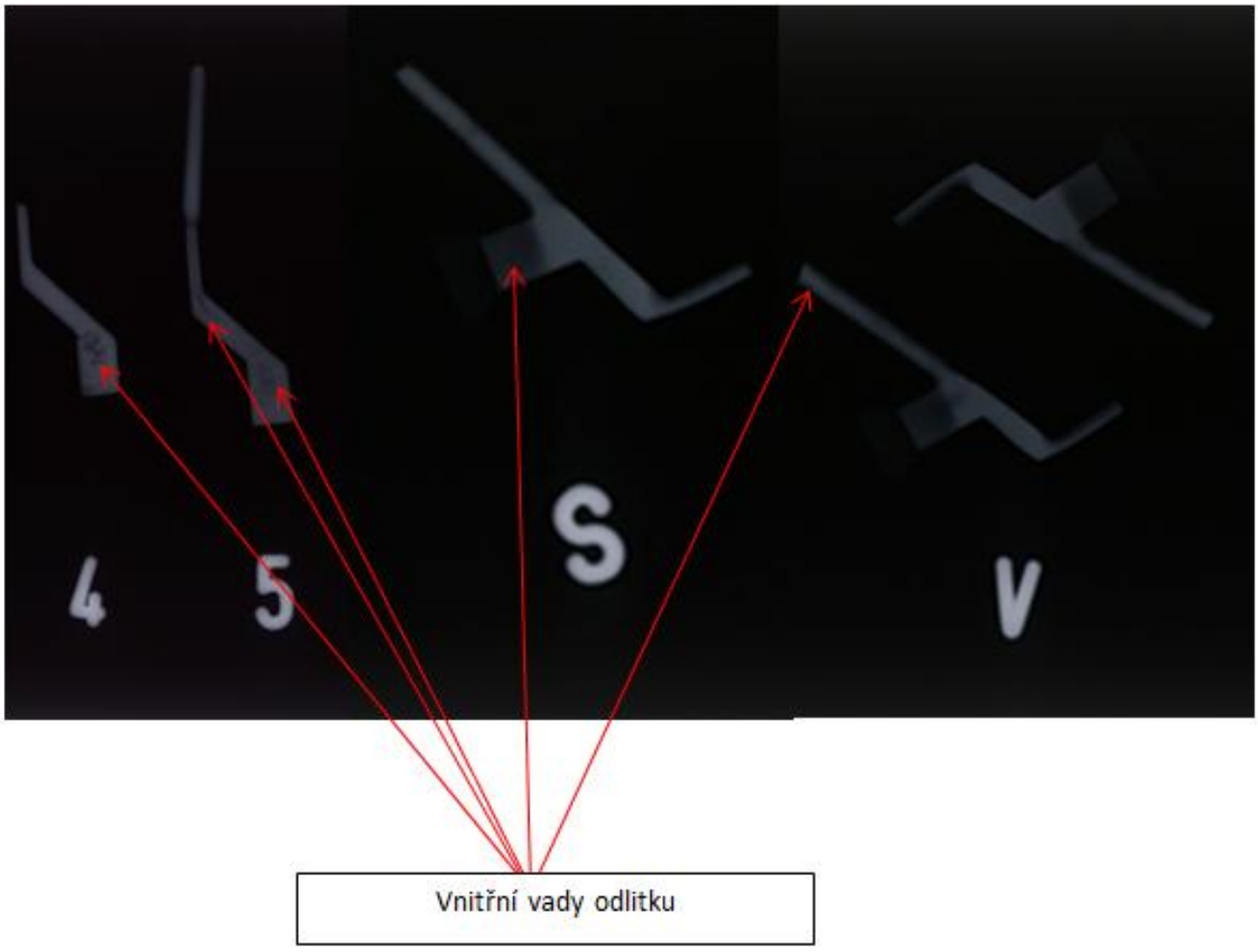


Obrázek 47: Konečné srovnání navrhovaných slitin.[vlastní zdroje]

Zde je uvedeno finální srovnání slitin, které bylo cílem simulačního výpočtu. Z výše uvedeného srovnání navrhovaných slitin, vychází jako nejvhodnější kandidáti na post slitin s nejnižší povrchovou a celkovou porézností slitiny umístěné v pravém spodním rohu výše uvedeného obrázku. Přesněji se jedná o slitiny na bázi mědi CuZn40 a CuAl7Fe2 a slitiny zinku (zamaky) ZnAl4 a ZnAl4Cu3.

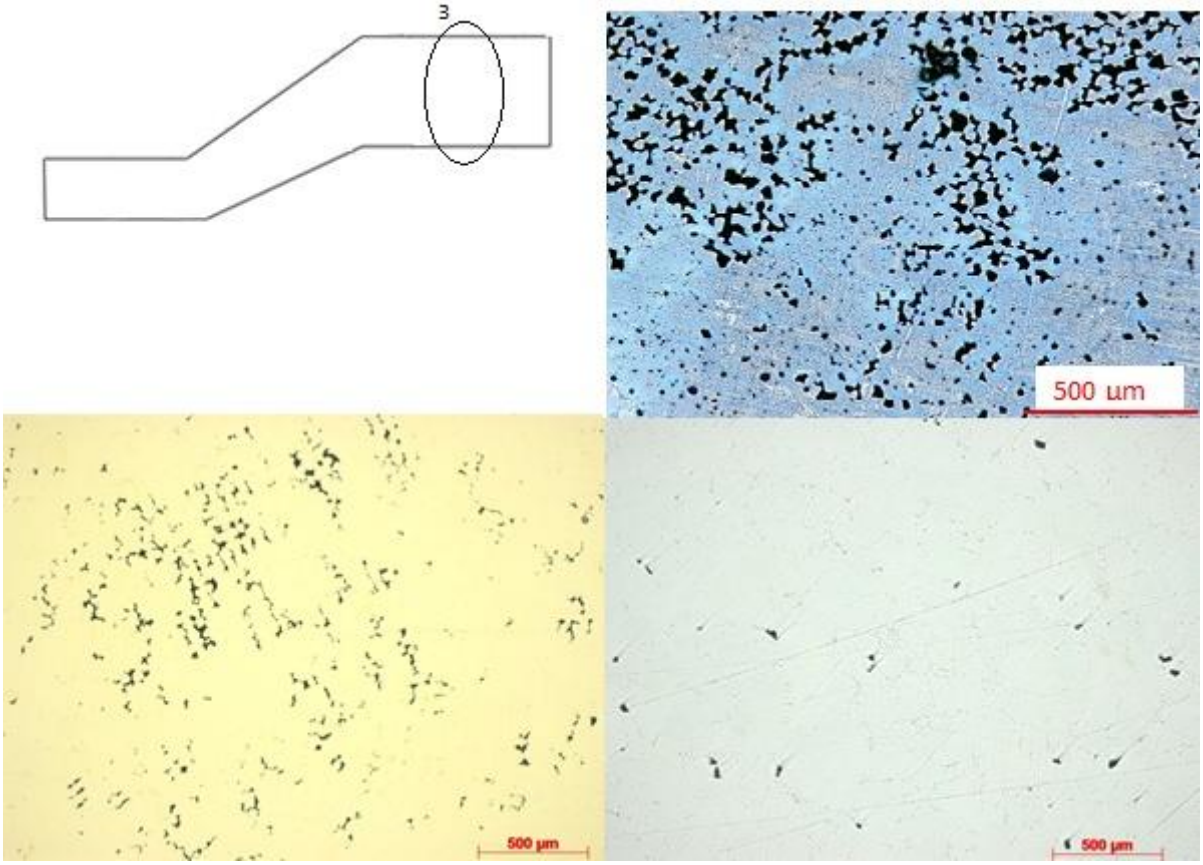
9.2.4 Navrhovaní kandidáti- praktické potvrzení správnosti volby

Po vyhodnocení simulačního výpočtu byly vybrány dvě slitiny, které vykazovaly jednu z nejnižších porézností. Těmito slitinami byla slitina na bázi zinku ZnAl4Cu3 a slitina na bázi hliníku AlSi9Cu3. Jedním z hlavních důvodů pro volbu těchto slitin byla jejich včasná dostupnost. Tyto slitiny byly následně odlity ve společnosti AMATI s.r.o. a to za podmínek, při kterých probíhal simulační výpočet. Po odlití byly odebrány z jednotlivých taveb vzorky. Na těchto vzorcích byly provedeny stejné expertízy jako u vstupních vzorků a následně došlo k jejich vzájemnému porovnání. Toto finální porovnání je uvedeno níže.

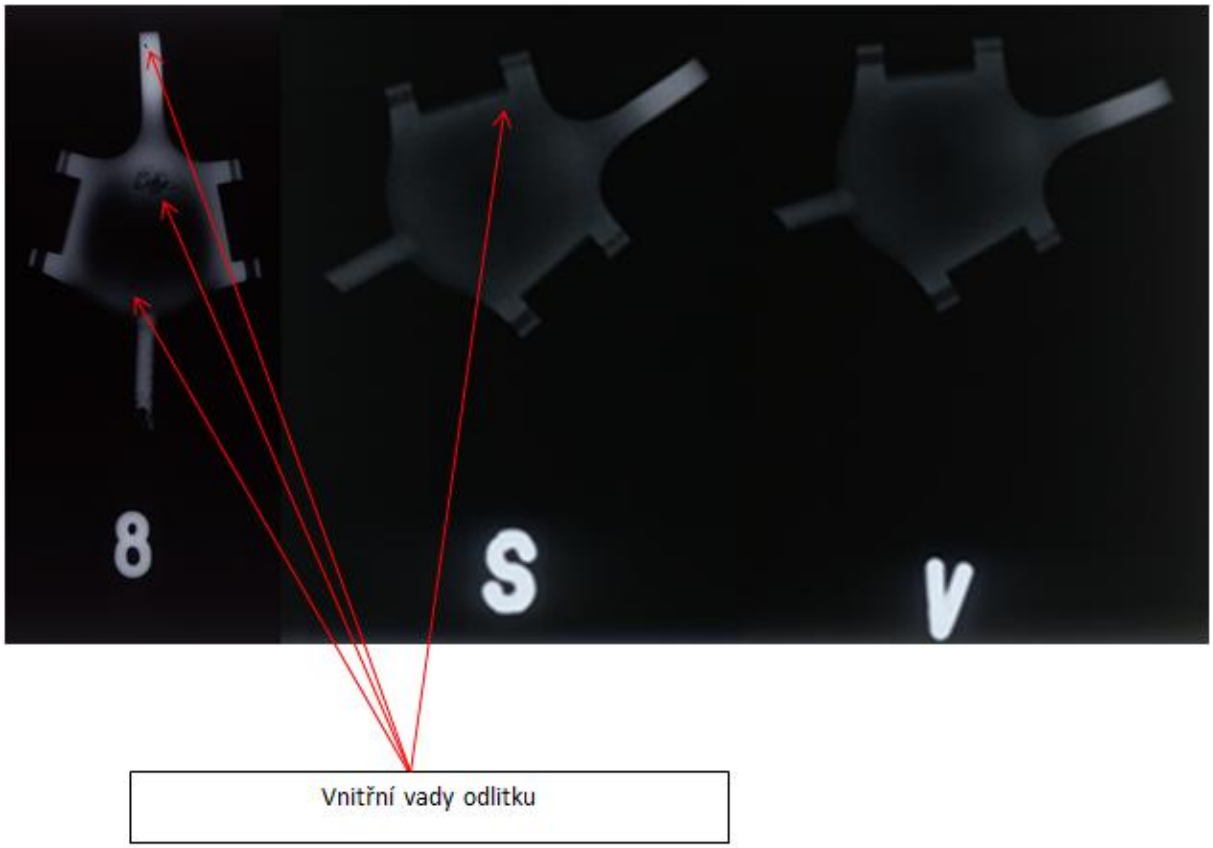


Obrázek 48: Porovnání RTG snímků. Levá část obrázku zobrazuje slitiny dodané společností AMATI DEMAK s.r.o. č. 4 slitina N31 č. 5 slitina CuZn30. Pravá část ukazuje slitinu ZnAl4Cu3, která byla vybrána pomocí simulačního výpočtu v programu PROCAST. Vzorek označený písmenem S- spodní část stromečku, vzorek označen písmenem V horní část stromečku Z výše uvedeného porovnání RTG snímků je patrné, že slitiny, které byly dodány společností AMATI DEMAK s.r.o. vykazují zřetelně viditelnou vnitřní poréznost. Oproti tomu slitina ZnAl4Cu3 navržená při simulačním výpočtu v programu PROCAST nevykazuje tuto poréznost. Pro její nalezení je nutné snímek řádně prozkoumat.[vlastní zdroje]

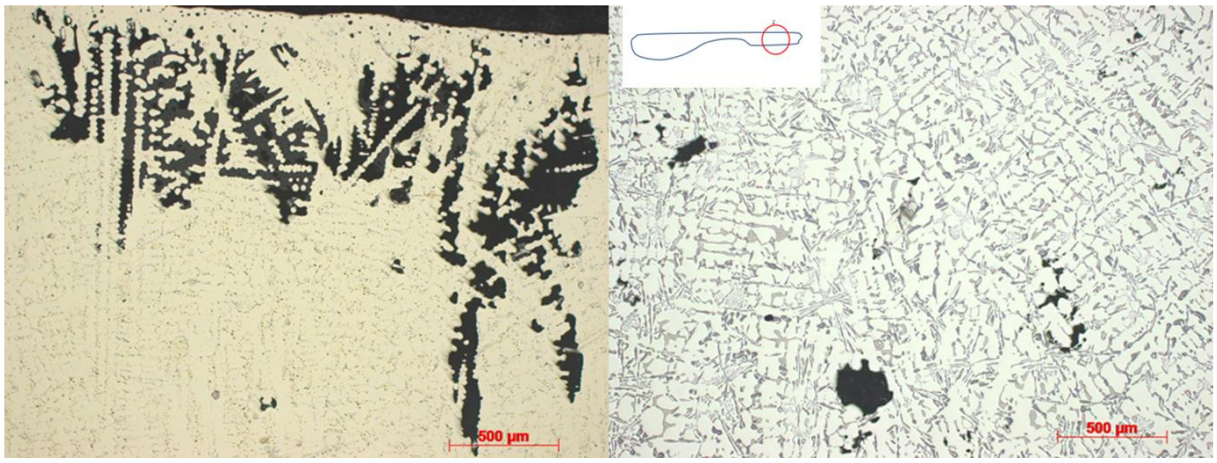
Další vzorky byly určeny pro metalografii viz. níže uvedený obrázek



Obrázek 49: Metalografický snímek struktury. Levá část obrázku nahoře zobrazuje místo pořízení snímku na vzorcích odlitku typu KL 119 98. Pravá část obrázku nahoře zobrazuje strukturu- poréznost sliny N31, levá část obrázku dole, zobrazuje strukturu- poréznost slitiny CuZn30 a pravá část obrázku dole zobrazuje strukturu- poréznost u navrhované slitiny ZnAl4Cu3. Porovnáním výše uvedených snímků je vidět, že nově navržená slitina vykazuje nižší poréznost ve sledovaném místě, než již používané slitiny.[vlastní zdroje]



Obrázek 50:Porovnání RTG snímků. Levá část obrázku zobrazuje slitinu dodanou společností AMATI DEMAK s.r.o. č. 8 slitina N31. Pravá část ukazuje slitinu AlSi9Cu3, která byla vybrána pomocí simulačního výpočtu v programu PROCAST. Vzorek označený písmenem S- spodní část stromečku, vzorek označen písmenem V horní část stromečku. Z výše uvedeného porovnání RTG snímků je patrné, že slitiny, které byly dodány společností AMATI DEMAK s.r.o. vykazují zřetelně viditelnou vnitřní poréznost. Oproti tomu slitina AlSi9Cu3 navržená při simulačním výpočtu v programu PROCAST nevykazuje tuto poréznost. Pro její nalezení je nutné vzorek řádně prozkoumat.[vlastní zdroje]



Obrázek 51:Metalografický snímek struktury. Levá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku KLG 512 slitiny N31, místo odběru č.2, (původní slitina), pravá část obrázku zobrazuje navrhovanou slitinu AlSi94Cu3- místo pořízení snímku č.2. Porovnáním výše uvedených snímků je vidět, že nově navržená slitina vykazuje nižší poréznost ve sledovaném místě.[vlastní zdroje]

10 Diskuse výsledků

Experimentální část této diplomové práce se zabývala simulačním návrhem řešení problematiky jakosti odlitků ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Na dodaných vzorcích třech slitin, byly pomocí RTG analýzy nalezeny vnitřní vady. Jejich výskyt následně potvrdil metalografický rozbor. U dodaných vzorků byla následně změřena mikrotvrdost a zjištěno chemické složení pro stanovení přibližných hodnot jejich mechanických vlastností. Na základě výsledků těchto expertíz a požadavků výše zmíněné společnosti byl vytvořen experimentální program, který měl za cíl snížení vnitřní poréznosti odlitků, případně její úplné odstranění. K tomuto účelu byl použit simulační software PROCAT, používaný pro simulační výpočty týkající se procesu odlévání, který je vyvíjen společností ESI GROUP s.r.o. Experimentální program se zabýval vlivy, které mohou způsobovat poréznost odlitků. Nejprve se zaměřil na stránku tzv. vizuální tedy na rozložení odlitků na licím kůlu a také na umístění zářezů, které přivádějí tekutý kov do odlitku. Poté se zabýval vlivem používané slitiny a teploty jejího přehřátí.

Při simulačních výpočtech, které se zabývaly rozložením odlitků na licím kůlu, byla určena jako nejvhodnější varianta C, u které bylo při simulačním výpočtu určena nejnižší poréznost ve sledovaném objemu odlitku. V druhém případě byl posuzován vliv umístěný zářezu ústících do odlitku. V tomto případě se jako nejvýhodnější umístění zářezů do odlitku jeví varianty č. 1, č.2, č. 4 a č. 5. Volba mezi těmito variantami je náročnější a závisí na tom, zdali bude přihlíženo k vyššímu stupni poréznosti v rozšířené oblasti odlitku typu KL 119 98. Pokud by bylo určeno, že rozdíl v této poréznosti je zanedbatelný, jeví se jako nejvýhodnější umístění zářezů do odlitku varianta č. 4 a č. 5. Pokud by tato poréznost byla brána jako nezanedbatelná, jeví se jako výhodnější varianty č. 1 a č. 2, i když v jejich případě je v objemu materiálu vyšší procento drobné poréznosti. K zajištění nižší poréznosti odlitku by tedy z hlediska vizuálního rozložení odlitků na licím kůlu a zářezů ústících do odlitku byla kombinace varianty rozložení odlitků na licím kůlu C s jednou z variant umístění zářezů ústících do odlitku č.1,č.2,č.4 nebo č. 5 a to v závislosti na požadovaném stupni rozložení drobné poréznosti vůči vyšší poréznosti ve středové části odlitku typu KL 119 98.

Dále se experimentální program jak bylo uvedeno výše, zabýval vlivem odlévané slitiny na vnitřní jakost odlitku. Pro tuto část experimentálního programu bylo zvoleno celkem jedenáct slitin. Z toho tři slitiny byly již v minulosti pro výrobu drobných součástek ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. použity. Tyto tři slitiny byly, jak bylo uvedeno výše, dodány pro stanovení jakosti vytvořených odlitků a stanovení okrajových podmínek simulačního výpočtu. U každé navrhované slitiny byla určena ideální teplota přehřátí. Ta byla stanovena porovnáním výsledku simulačního výpočtu pro tři teploty přehřátí a to 50^0C, 100^0C a 150^0C. Slitiny se stanovenou ideální teplotou přehřátí byly následně mezi sebou porovnány, čímž byly určeny slitiny s nejnižším stupněm poréznosti. Z tohoto porovnání vyšli nejlépe slitiny zinku ZnAl4 a ZnAl4Cu3, u kterých se při simulačních výpočtech prokázala nejnižší objemová poréznost v odlitku. Dalšími dvěma slitinami s nízkým stupněm povrchové poréznosti byly slitiny na bázi mědi a to hliníkový bronz CuAl7Fe2 a slitina mosazi CuZn40. Z hliníkových slitin byla pomocí simulačního výpočtu určena jako výhodnější slitina AlSi7,5Mg. Dalším krokem, bylo ověření simulačního výpočtu a to odlitím vybraných

kandidátů. Jako kandidáti byly zvoleny slitiny Zinku ZnAl4Cu3 a slitina AlSi9Cu3. Jednalo se o slitiny, které nevykazovaly nejnižší poréznost zejména pak slitina AlSi9Cu3 avšak jejich dostupnost byla v době provedení experimentu vyšší než slitin, které vykazovali oproti těmto slitinám nižší objemovou poréznost. Po odlití vzorků z těchto slitin byly provedeny obdobné expertízy jako u první série vzorků. Výsledky těchto expertíz byly následně mezi sebou porovnány. Slitina ZnAl4Cu3 byla odlita ve formě klapky typu KL 119 98 a následně byla porovnána se vzorky stejného typu klapky, vyrobených ze slitin CuZn30 a N31. Na základě porovnání RTG a metalografických snímků byl u slitiny ZNAl4Cu3 konstatován výrazně nižší výskyt poréznosti ve sledovaném místě vzorku. Při metalografických výbrusech u vzorků této slitiny, byla v místě přechodu rozšířené části odlitku do užší části pozorována trhlina. Tato trhlina vznikla velmi pravděpodobně při probíhajících objemových změnách odlitku během tuhnutí, kdy tyto slitiny zinku jsou ke vzniku trhlin náchylnější a to z důvodu velkých objemových smrštění v krátkém časovém úseku, kdy je nutné těmto změnám bránit a to buď nálitkováním, kdy dochází k prodloužení dosazovacího času odlévaného kovu, případně přidáním hořčíku jako legujícího prvku. Jeho přidání má za cíl snížit vnitřní pnutí v matrici odlitku, které vzniká díky vzniku nové fáze.

U slitiny AlSi9Cu3 byla pozorována vyšší vnitřní poréznost oproti výše zmíněné zinkové slitině. Vzorky z této slitiny byly odlity ve formě klapky typu KLG 512 a následně byly porovnány se vzorky stejného typu klapky, ze slitiny N31. U tohoto typu klapky byla pozorována i během simulačního výpočtu velká vnitřní poréznost těsně za zužující se středovou částí odlitku směrem do rozšířeného nosu. Tuto poréznost následně potvrdily jak RTG, tak metalografické snímky. U navrhované slitiny je poréznost v těchto místech výrazně nižší oproti původní slitině. Na pořízených RTG snímcích není tato poréznost téměř patrná. Její výskyt a rovnoměrné rozložení v objemu vzorku potvrdily metalografické snímky. Toto rovnoměrné rozložení poréznosti v objemu materiálu odpovídá výsledkům simulačního výpočtu.

Obecně z výše uvedených výsledků simulačního výpočtu, jehož správnost byla u dvou slitin ověřena odlitím, vyplívá, že nejvyšší vliv na vnitřní jakost odlitku má používaná slitina, přičemž sliny, u kterých byl rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu malý, jednalo se o slitiny typu hliníkových bronzů, slitinu CuZn40 a slitiny zinkové, vykazovaly nižší poréznost v okrajových vrstvách, oproti slitinám s velkým rozdílem mezi těmito teplotami. U slitin s velkým rozdílem mezi teplotou solidu a likvidu, byla pozorována rovnoměrně rozložená poréznost ve sledovaném objemu odlitku. Což bylo ověřeno i experimentální tavbou dvou výše zmíněných slitin, kde hliníková slitina AlSi9Cu3 zastupuje skupinu slitin s větším rozdílem teplot mezi solidem a likvidem, u této slitiny je to 133^0C, zatímco skupinu slitin s nízkým rozdílem mezi těmito teplotami zastupovala slitina ZnAl4Cu3 s rozdílem mezi teplotami L/S 11^0C.

Simulačními výpočty bylo dále ověřeno, že na poréznost odlitků má vliv jejich rozmístění na licím kůlu a umístění zářezů ústících do odlitku. Z toho více ovlivňuje jakost odlitku umístění zářezu do odlitku. Přičemž kromě umístění zářezu do odlitku má zásadní vliv na poréznost odlitku i jeho umístění ve formě, což bylo během simulačního výpočtu ověřeno, kdy při

špatně zvoleném uložení odlitku došlo k výskytu vyšší poréznosti a například k neúplnému zaplnění odlitku roztaveným kovem.

11 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou návrhu vhodné slitiny pro odlitky hudebních nástrojů. V úvodu této práce je nastíněna problematika výroby součástek ve společnosti AMATI DEMAK s.r.o. Dále byla uvedena používaná výrobní technologie ve výše uvedené společnosti, která byla dále porovnána s technologiemi výroby těchto součástek u jiných společností. Za touto kapitolou, pokračovala rešeršní část kapitolami, které se zabývaly materiály používanými pro výrobu součástek hudebních nástrojů, vlastnostmi odlévaného kovu, vznikajícími vadami, možnostmi jejich detekce a možnostmi jejich predikce „klasickým“ nebo simulačním výpočtem. Na rešeršní část navazuje část experimentální, která řeší vlastní problematiku výroby drobných dílů ve výše uvedené společnosti AMATI DEMAK s.r.o. a to za pomoci simulačního výpočtu procesu odlévání v programu PROCAST společnosti ESI GROUP s.r.o. Prvním krokem bylo určení vad, které ve výrobcích vznikají, k tomto účelu byly dodány vzorky vyrobené ze slitin, které jsou ve výše uvedené společnosti používány. Na základě nalezených vad byl vytvořen experimentální program, který se snažil nalézt řešení, vedoucí ke snížení poréznosti v dodaných vzorcích na minimum. Experimentální program byl zaměřen na tři vlivy, které ovlivňují vnitřní jakost odlitků a to na jejich rozmístění na licím kůlu, na umístění zářezů ústících do odlitku, přičemž byla brána i v potaz poloha odlitku ve formě. Dále se experimentální program zaměřil na návrh nových slitin, které by mohly mít za následek snížení poréznosti odlitku a tím zlepšení jeho jakosti. Kromě slitin mědi byly navrženy i slitiny na bázi jiných prvků jednalo se o slitiny hliníku a zinku, které se velmi často používají pro jiné aplikace, než na výrobu součástek pro hudební průmysl.

Na základě výsledků simulačních výpočtů bylo určeno, že nejnižší vliv na poréznost odlitku má rozložení odlitků na licím kůlu, zatímco poloha odlitku ve formě a umístění zářezů do odlitku ovlivňují tuto poréznost více. Nejvíce však vnitřní jakost odlitku ovlivňuje použitá slitina. Na základě výsledků simulačního výpočtu byly vybrány dvě slitiny, ze kterých byly odlity vzorky. Tyto nové vzorky byly vyhodnoceny obdobně jako vzorky dodané na počátku experimentu. Výsledky těchto experimentů byly následně mezi sebou porovnány, čímž byla potvrzena nižší poréznost u vzorků ze slitin navrhovaných pomocí simulačního výpočtu. Na základě údajů získaných simulačním výpočtem a výsledky provedených expertíz u dodaných vzorků plyne, pro výše zmíněnou společnost AMATI DEMAK s.r.o. následující doporučení. Jako nejvýhodnější slitiny z hlediska poréznosti se jeví slitiny zinku neboli „zamaky“. Tyto slitiny však prochází při tuhnutí velkými objemovými změnami, které mají za následek ve velkém množství případů vznik velkých vnitřních pnutí, která vedou ke vzniku trhlin. Z tohoto důvodu, by při zavedení těchto slitin bylo nutné zavést vyšší stupeň nálitkování, případně změnit geometrii odlitku, což nebylo pro experimentální program povoleno. Dalším požadavkem, který vyplynul až po provedení simulačních výpočtů, bylo zachování výroby součástek ze slitin mědi. Z tohoto pohledu, se jeví jako výhodnější slitina CuZn40, která má daleko nižší povrchovou poréznost než mosazné slitiny v současné době používané. Nevýhodou všech těchto slitin obsahujících jako jeden z prvků zinek je jeho vypařování v průběhu vlastní tavby slitiny. Z toho důvodu se mohou výrazně lišit vlastnosti mezi vstupním polotovarem a výstupním odlitkem a to především pokud je pro další tavbu

používán odpad z předchozích taveb (vtoky, zářezy nebo nejakostní odlitky). Na základě těchto úvah a výsledku simulačního výpočtu jsou nejvýhodnějšími slitinami, hliníkové bronzy přesněji slitina CuAl7Fe2, která má kromě dobrých slévárenských vlastností, i výborné vlastnosti mechanické. Vybrané slitiny hliníku vykazovaly také nízké procento poréznosti, ale z důvodu zachování výroby součástek pro hudební nástroje ze slitin na bázi mědi nebudou v praxi tyto poznatky využity.

12 Seznam grafů, obrázků a tabulek

Graf 1: Porovnání používaných technologií [4] 12
Graf 3:Porovnání používaných materiálů [4] 16
Graf 5: Porovnání chemických složení dodaných vzorků ……42
Graf 6:Porovnání chemických složení vzorků [vlastní zdroje] 44
Graf 7: Porovnání navrhovaných slitin [4] 59
Graf 9Porovnání navrhovaných slitin [4] 61
Obrázek 1:Forma [vlastní zdroje]. 2
Obrázek 2: Vstřikovací stroj [vlastní zdroje]. 3
Obrázek 3: Voskový model stromečku [vlastní zdroje]. 4
Obrázek 4: Přístroj používaný k vytvoření sádrové skořepiny [vlastní zdroje]. 5
Obrázek 5:Komorová vypalovací pec [vlastní zdroje]. 5
Obrázek 6:Graf zobrazující možný průběh vypalovací teploty [vlastní zdroje]. 6
Obrázek 7: Pec určená k natavení vsázkového materiálu [vlastní zdroje]. 6
Obrázek 8: Výsledný odlitek [vlastní zdroje]. 7
Obrázek 9: finální výrobek [vlastní zdroje]. 7
Obrázek 10: Schéma technologie zápustkového kování [4] 9
Obrázek 11: Schéma technologie vysokotlakého lití [4]. 10
Obrázek 12: Schéma technologie nízkotlakého lití [4] 11
Obrázek 13: Smáčivost formy [9] 19
Obrázek 14: Nezaběhnutí slitiny kovu [9] 22
Obrázek 15: Bubliny[vlastní zdroje] 22
Obrázek 16: Praskliny [vlastní zdroje] 23
Obrázek 17: Řediny[vlastní zdroje] 24
Obrázek 18: Povrchová pórovitost[vlastní zdroje] 24
Obrázek 19: Schéma získání RTG snímku[vlastní zdroje] 25
Obrázek 20: snímky získané světelnou mikroskopií[vlastní zdroje] 26
Obrázek 21:Model odlitku klapky KLG 119 98 [vlastní zdroje] 30
Obrázek 22: zasíťovaný model odlitku KLG 119 98 [vlastní zdroje] 31
Obrázek 23: Ukázka volby materiálu [vlastní zdroje] 32
Obrázek 24: Sledování průběhu simulace [vlastní zdroje] 33
Obrázek 25: Zobrazení porózity v odlitku ve 3D [vlastní zdroje] 34
Obrázek 26: Zobrazení porózity v odlitku ve 2D[vlastní zdroje] 35
Obrázek 27: Vzorky dodané společností AMATI s.r.o. [vlastní zdroje] 38
Obrázek 28: Ukázka míst, na kterých došlo k zaznamenání metalografických snímků 39
Obrázek 29: Vzorek tavby [vlastní zdroje] 39
Obrázek 30:Rentgenový snímek vzorku [vlastní zdroje] 40
Obrázek 31: Metalografický snímek struktury]vlastní zdroje] 40
Obrázek 32: dodané vzorky slitiny N31 [vlastní zdroje] 42
Obrázek 33: RTG snímek vzorků N31[vlastní zdroje] 43
Obrázek 34: Metalografický snímek struktury[vlastní zdroje] 43
Obrázek 35: dodané vzorky slitiny CuZn30 [vlastní zdroje] 46
Obrázek 36: : RTG snímek vzorku CUZn30 [vlastní zdroje] 46

Obrázek 37: Metalografický snímek struktury [vlastní zdroje] 47
Obrázek 38: Snímky pořízené pomocí ŘEM [vlastní zdroje] 48
Obrázek 39: Navrhované varianty rozložení odlitků [vlastní zroje] 50
Obrázek 40: Finální porovnání tří variant rozložení odlitků na licím kůlu.[vlastní zdroje] 51
Obrázek 41: Finální porovnání tří variant rozložení odlitků na licím kůlu.[vlastní zdroje] 52
Obrázek 42: Navrhované varianty umístění zářezů, odlitek tupu KL 119 98[vlastní zdroje] . 53
Obrázek 43: Porovnání vyskytující se poréznosti[vlastní zdroje] 54
Obrázek 44:Porovnání vyskytující se poréznosti[vlastní zdroje] 55
Obrázek 45: Příklad poréznosti slitiny AlSi9Cu3[vlastní zdroje] 56
Obrázek 46: Způsob výběru vhodných kandidátů[vlastní zdroje] 62
Obrázek 47: Konečné srovnání navrhovaných slitin.[vlastní zdroje] 63
Obrázek 48: Porovnání RTG snímků[vlastní zdroje] 64
Obrázek 49: Metalografický snímek struktury[vlastní zdroje] 65
Obrázek 50:Porovnání RTG snímků[vlastní zdroje] 66
Obrázek 51:Metalografický snímek struktury[vlastní zdroje] 66
Tabulka 1: Vlastnosti nejčastěji používaných slitin 15
Tabulka 2:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti[vlastní zdroje] 41
Tabulka 3:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti[vlastní zdroje] 44
Tabulka 4:Chemické složení vzorku a naměřené mikrotvrdosti[vlastní zdroje] 47
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti navrhovaných slitin 58
Tabulka 6:Pokračování tabulky 5: Mechanické vlastnosti navrhovaných slitin 59
Tabulka 7: Počáteční parametry simulačního výpočtu.[vlastní zdroje] 63

13 Citovaná literatura

[1] **HORÁČEK, Milan.** Výroba přesných odlitků: Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu. *Digitální knihovna VUT Brno.* [Online] 2009. [Citace: 12. prosinec 2013.] http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html.

[2] **HORÁČEK, mILAN** Ústav strojírenské technologie. [Online] 2009. [Citace: 10.prosinec 2013.] ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/.../technologie-vytavitelneho-modelu.pdf&oe=utf-8&rls=org.mozilla:cs:of.

[3] **HERMAN Aleš** Lití na vytavitelný model. *Ústav strojírenské technologie.* [Online] [Citace: 7. listopad 2013.] u12133.fsid.cvut.cz/.../presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.p....

[4] **LIMITED, GRANTA DESIGN.** *CES EDUPACK 2011.2 vERSION 7.0.0.* [KMM-VPK-NTB 5] CAMBRIDGE : autor neznámý, 2010.

[5] **BERNÁŠEK Vladimír** Přednášky a cvičení z předmětu přípravky a nástroje pro tváření (KMM/PNT).

[6] **BERNÁŠEK Vladimír, HOŘEJŠÍ Jan.** *Technologie slévání.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2006.

[7] **GRIGEROVÁ Tatiana, KOŘENÝ Rudolf, LUKÁČ Ivan.** *Zlévárenstvo neželezných kovov.* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1988.

[8] **HÁLA Miroslav** Přednášky a cvičení z předmětu metalurgie ocelí a litin (KMM/MOL).

[9] **BEDNÁŘOVÁ Vlasta.** Základy teorie a technologie slévárenství.

[10] **OTÁHAL Vlastislav.** Vady odlitků, atlas vad železné a neželezné slitiny. místo neznámé : Technicko-ekonomické poradenství, MetalCasting and foundry Consult;Otáhal Vlastislav; Brno; horská 27.

[11] **ELBEL Tomáš** Teorie slévárenských pochodů I. Ostrava : VŠB OSTARAVA; fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2008.

[12] **HÁLA Miroslav** přednášky a cvičení z předmětu slévárenské formy (KMM/SF).

[13] **BENEŠ Petr** Přednášky a cvičení z předmětu defektoskopie a provozní diagnostika KMM/DPD.

[14] **s.r.o., MECAS ESI GROUP.** *Procast User manual.* místo neznámé : Mecas esi group s.r.o., 2012.

[15] **BERNÁŠEK Vladimír** *Technologie slévání, tváření a svařování- návody na cvičení.* Plzeň : VŠSE v Plzni, 1990.

[16] **HORÁČEK Milan** Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. *Digitální knihovna VUT Brno.* [Online] 2009. http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/.../technologie-vytavitelneho-modelu.pdf.

[17] **PLACHÝ Jan, NĚMEC Milan, BEDNÁŘ Bohumír** *Teorie slévání.* Praha : Ediční středisko ČVUT, Praha 6, Zítkova 4, 1990.

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová (bakalářská) práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum: Podpis:

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto diplomovou (bakalářskou) práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis

Obsah přílohy

Příloha I. I

Skici klapek použitých pro simulační výpočet I

Příloha II. VI

Výsledky simulačních výpočtů: VI

Vliv velikosti zářezu: VII

Vliv umístění zářezu: X

Vliv odlévané slitiny: XIII

Příloha III. XV

RTG a metalografie XV

RTG analýza- vzorky dodané společností AMATI: XVI

Metalografie- vzorky dodané společností AMATI: XVIII

Metalografie a RTG- Porovnání slitin odlitých na základě dat simulačního výpočtu se slitinami dodanými: XXXV

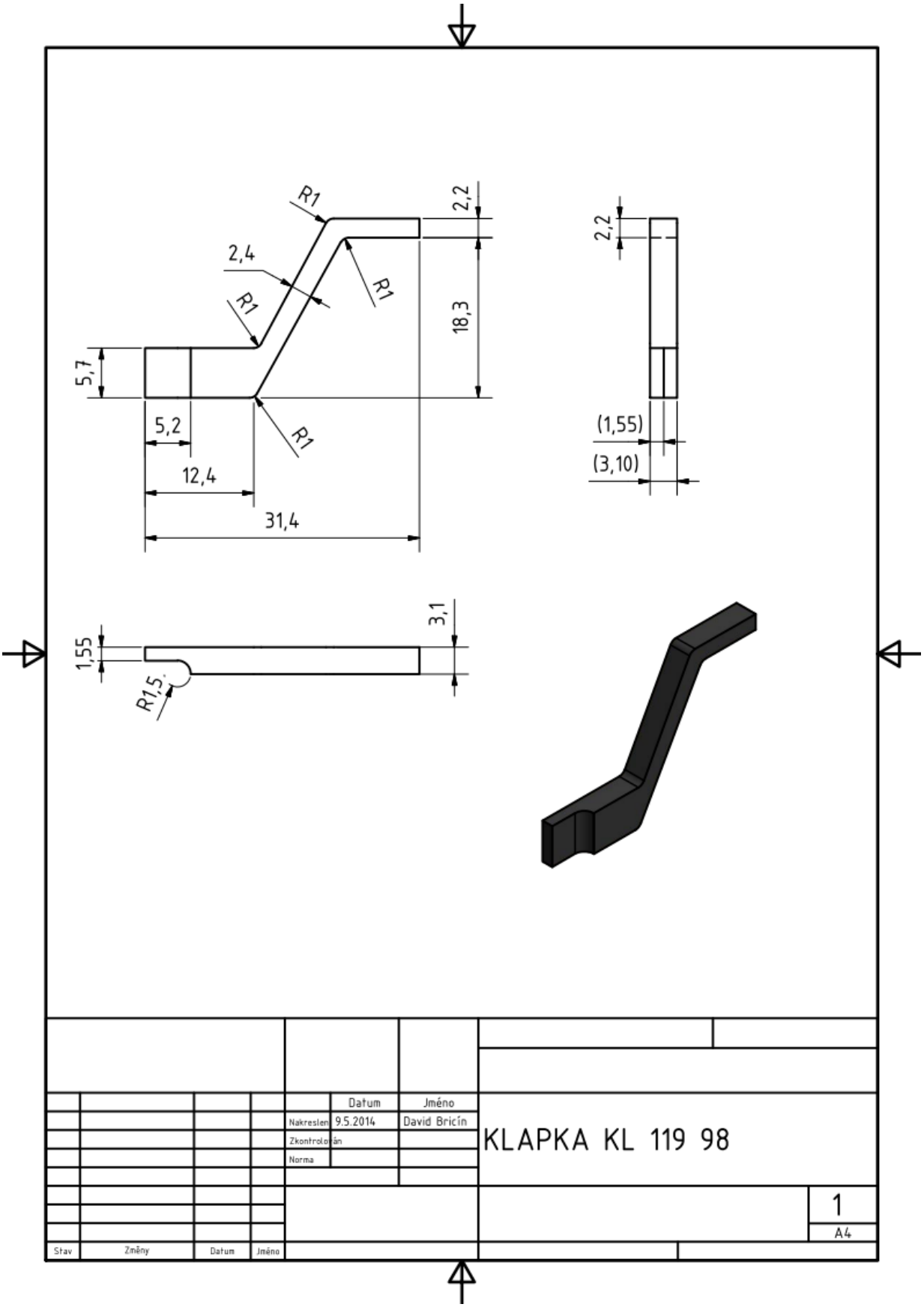
RTG analýza: porovnání slitin dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o., se slitinami odlitými na základě simulačního výpočtu procesu odlévání XXXV

Metalografie: porovnání slitin dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o., se slitinami odlitými na základě simulačního výpočtu procesu odlévání XXXVII

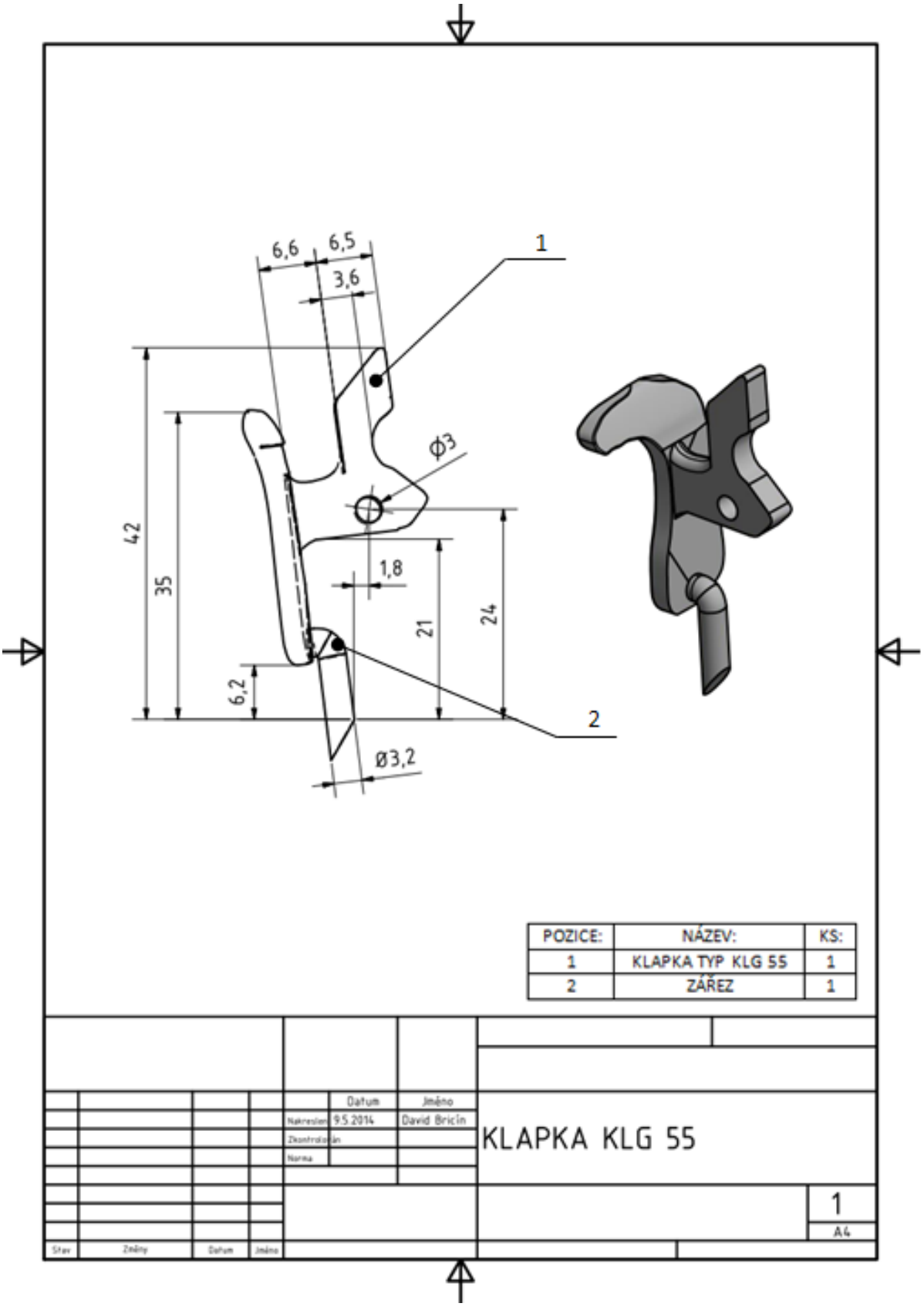
Seznam vzorků a provedených expertíz: XLIII

Příloha I.

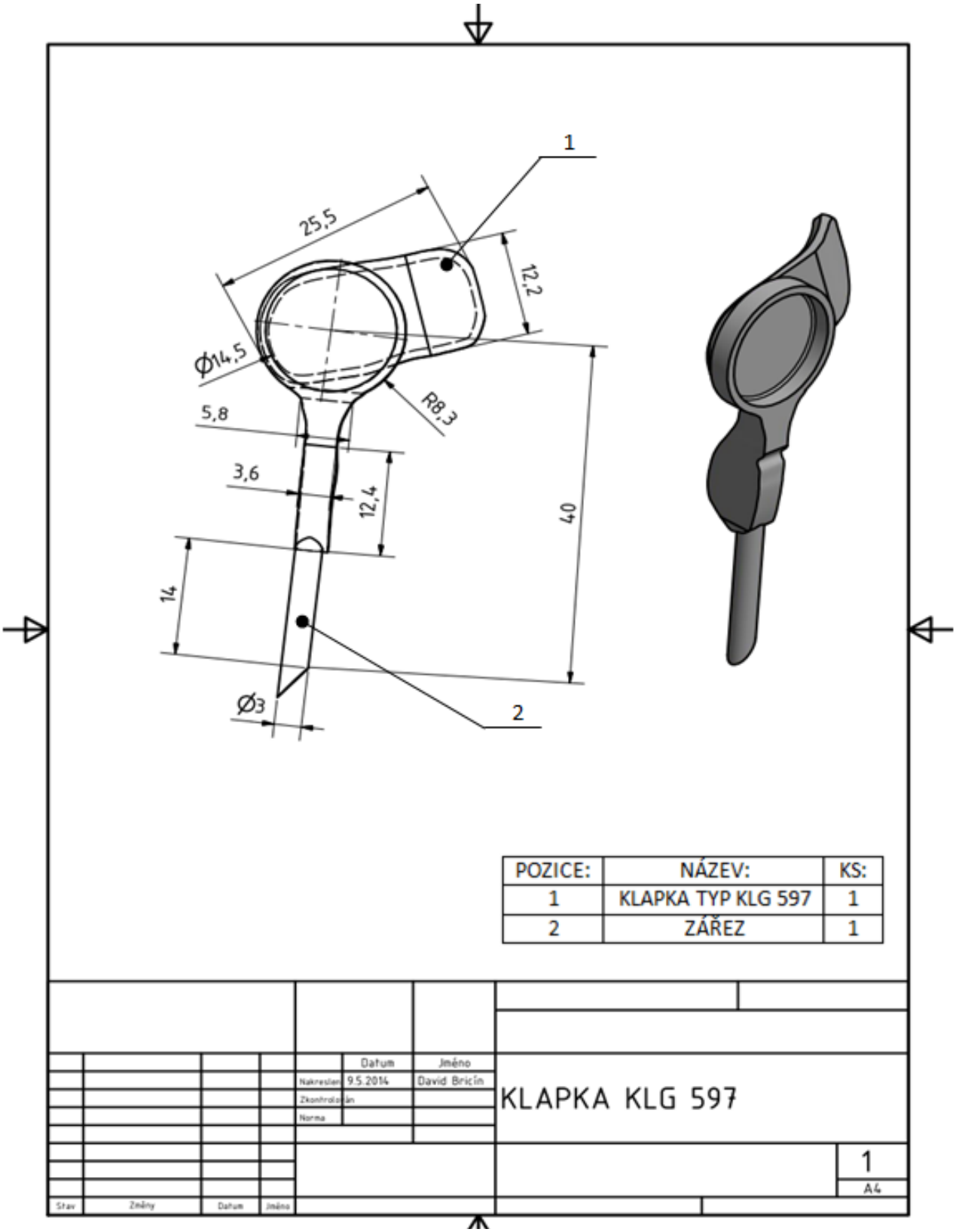
Skici klapek použitých pro simulační výpočet



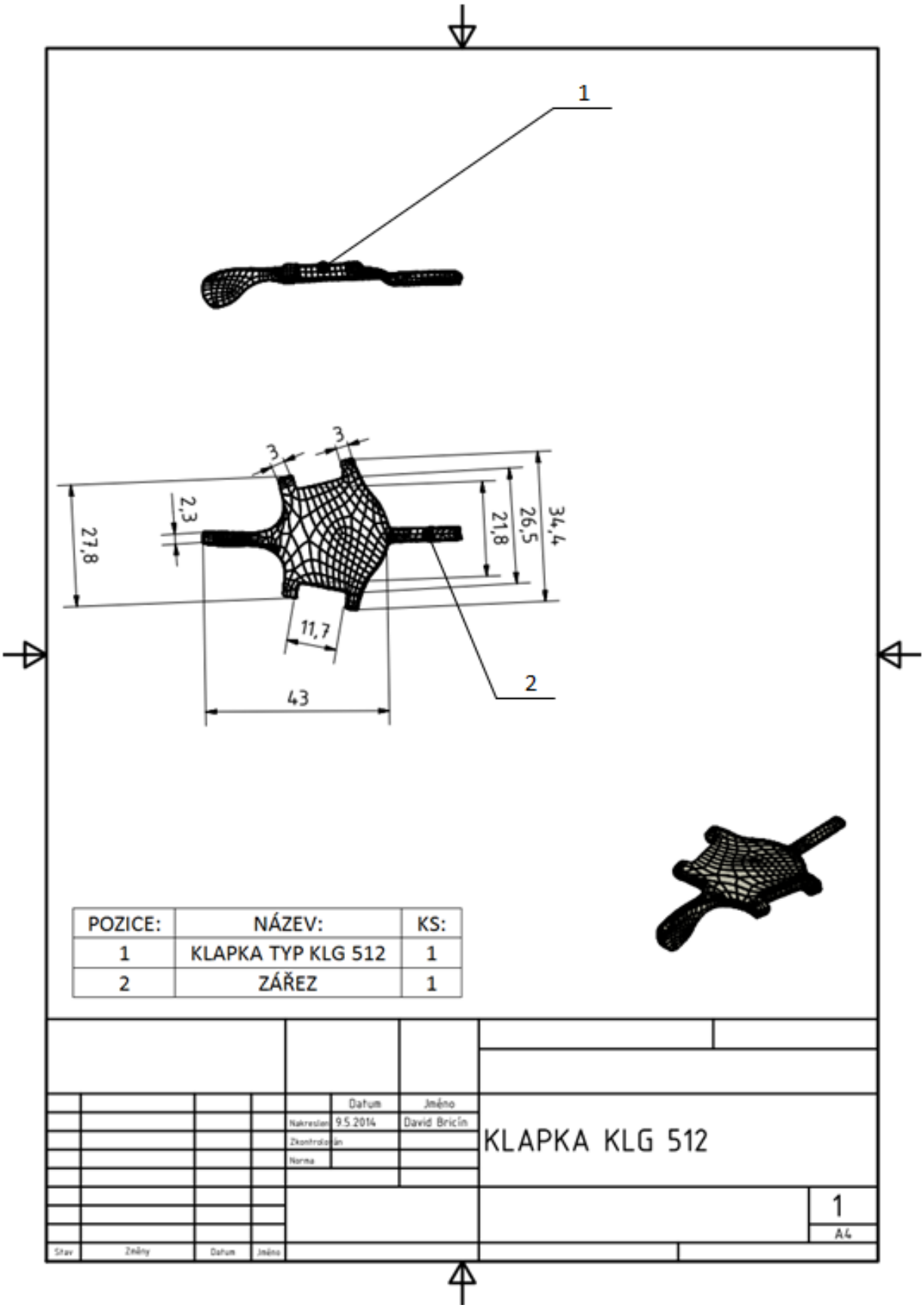
Obrázek 52: Klapka výrobní označení KL 119 98, model byl vytvořen na základě proměření dodané součásti[vlastní zdroje]



Obrázek 53:Klapka výrobní označení KLG 55, model byl vytvořen pomocí 3D scanneru[vlastní zdroje]



Obrázek 54: Klapka výrobní označení KLG 597, model byl vytvořen pomocí 3D scanneru[vlastní zdroje]



Obrázek 55: Klapka výrobní označení KLG 512, model byl vytvořen pomocí 3D scanneru[vlastní zdroje]

Příloha II.

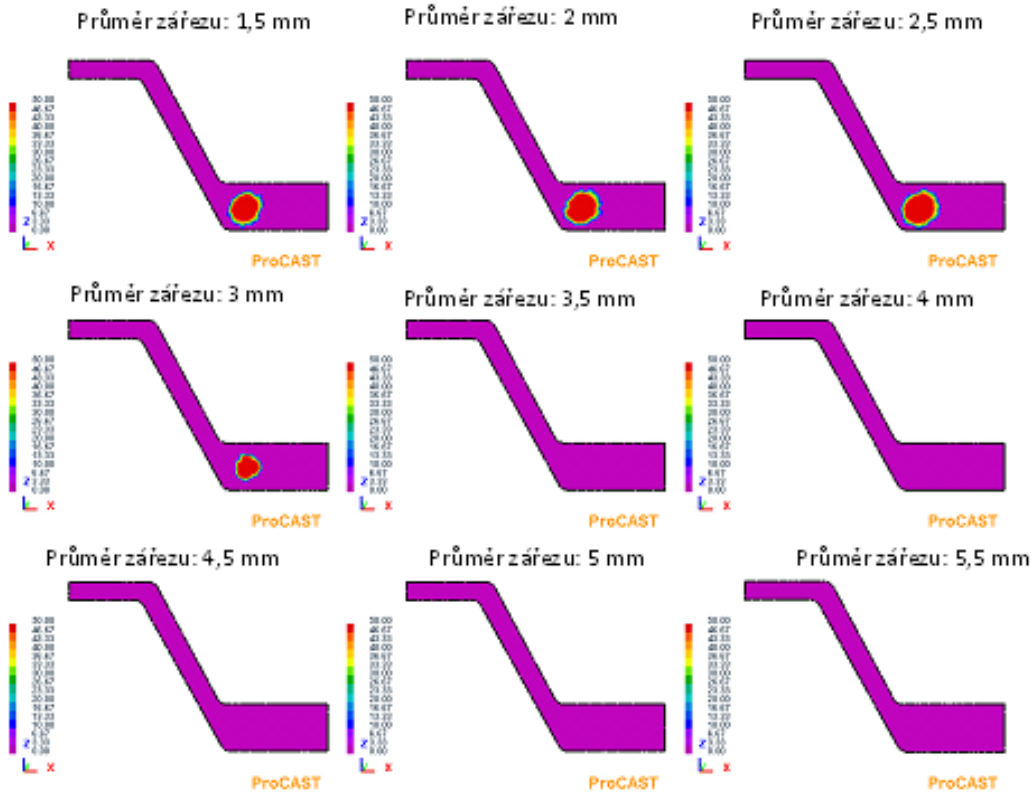
Výsledky simulačních výpočtů

Tato část přílohy diplomové práce pojednává o výsledcích simulačních výpočtů, které nebyly uvedeny v hlavní části práce.

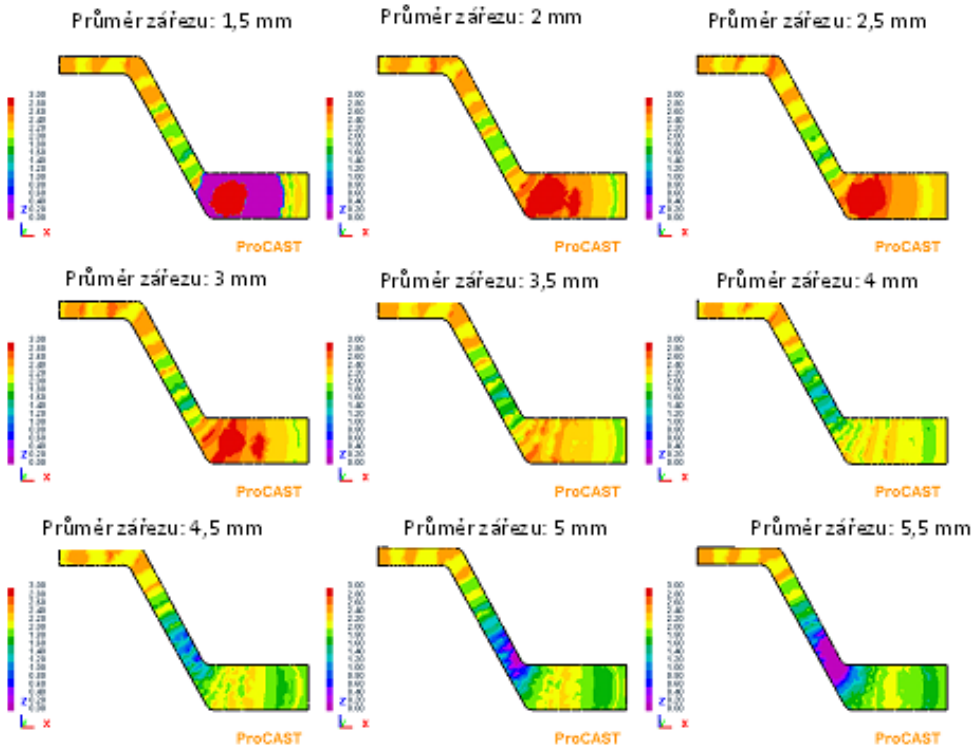
Vliv velikosti zářezu

Tato část se zabývá vlivem tloušťky zářezu, na objemu vnitřní poréznosti odlitku. Zářez byl v tomto případě umístěn do nejširší části odlitku, viz níže uvedený obrázek. Průměr zářezu byl měněn o 0,5 milimetru, z průměru 1,5 milimetru do průměru 5,5 milimetru.

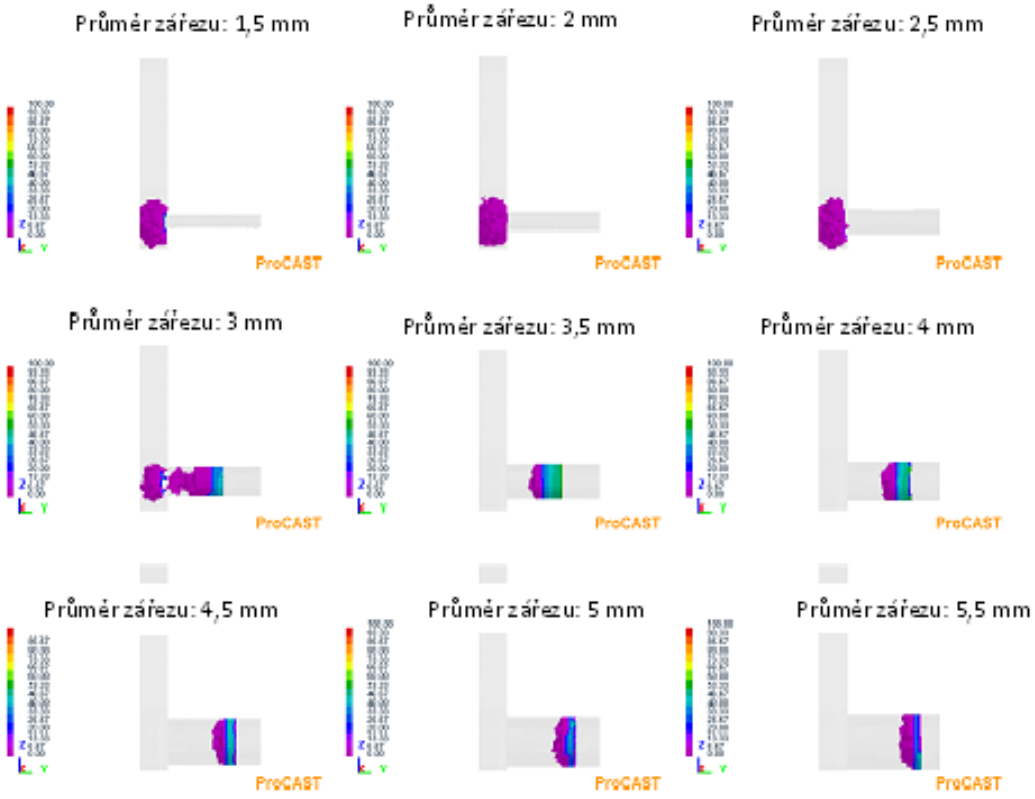
Obrázek 56: Klapka typ KL 119 98- umístění zářezu pro stanovení vlivu tloušťky zářezu na jakost odlitku[vlastní zdroje]



Obrázek 57: Vliv velikosti zářezu na jakost odlitku- červená barva zobrazuje poréznost vyšší jak 50%, ostatní barvy zobrazují nižší poréznost. Z porovnání výsledků simulačního výpočtu plyne, že vysoká vnitřní poréznost odlitku se z jeho objemu ztrácí od průměru 3,5 milimetru. [vlastní zdroje]



Obrázek 58:Vliv velikosti zářezu na jakost odlitku- červená barva zobrazuje místa s porézností vyšší jak 3%, ostatní barvy zobrazují nižší poréznost. Toto porovnání je výhodné při zkoumání mikro-poréznosti v objemu odlitku se zaměřením na povrchovou jakost odlitku. [vlastní zdroje]

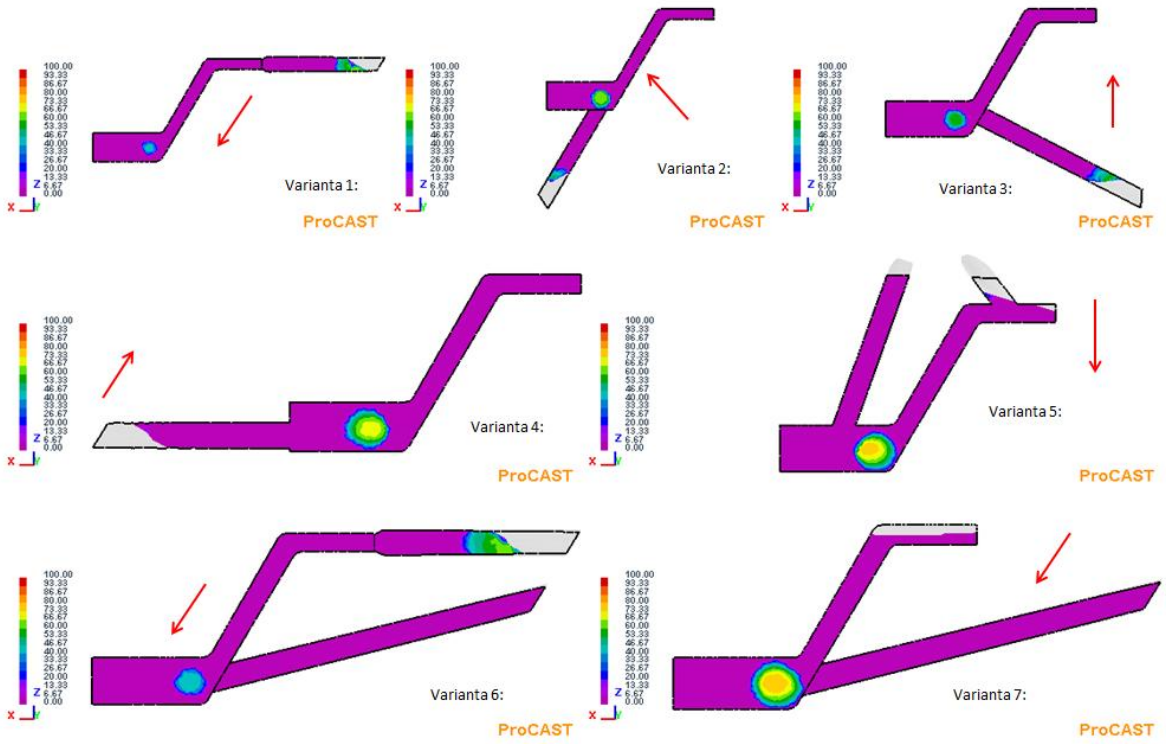


Obrázek 59:Vliv velikosti zářezu na jakost odlitku- Toto porovnání ukazuje jakým způsobem dochází k přesunu poréznosti z objemu odlitku do objemu zářezu. [vlastní zdroje]

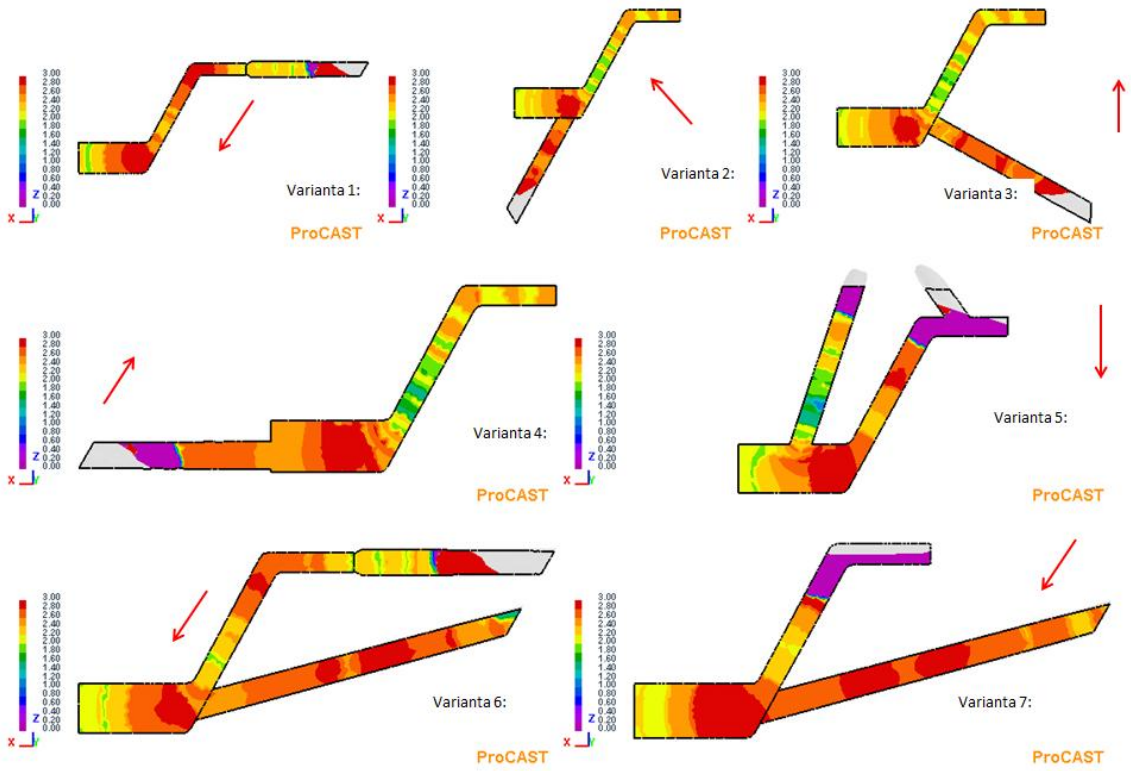
Z výše uvedených výsledků simulačních výpočtů, je patrné, že vnitřní jakost odlitku je do značné míry ovlivněna tloušťkou neboli průměrem zářezu, kdy tedy od určité velikosti zářezu se velké procento poréznosti přesouvá z objemu odlitku do zářezu. V tomto případě je hraničním průměrem zářezu rozměr 3,5 milimetru, kdy při menším průřezu se v objemu odlitku vyskytuje v jeho objemné části vysoká vnitřní poréznost (více jak 50%), zatímco při větším průměru (nad 3,5 milimetru) se tato poréznost přesouvá do objemu zářezu.

Vliv umístění zářezu

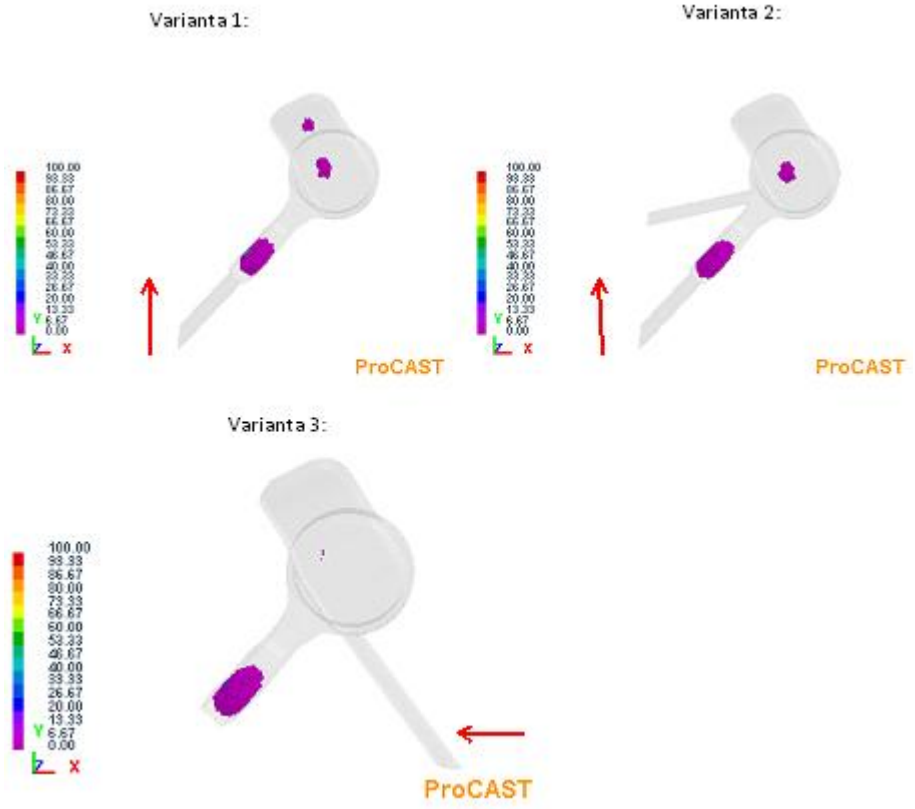
V této části byl sledován vliv umístění zářezu, tedy kanálu přivádějícího kov do odlitku, na jakost odlitku. U jednotlivých variant je šipkou vyznačen přibližný směr působení gravitačního vektoru, který určuje základní orientaci odlitku vůči formě.



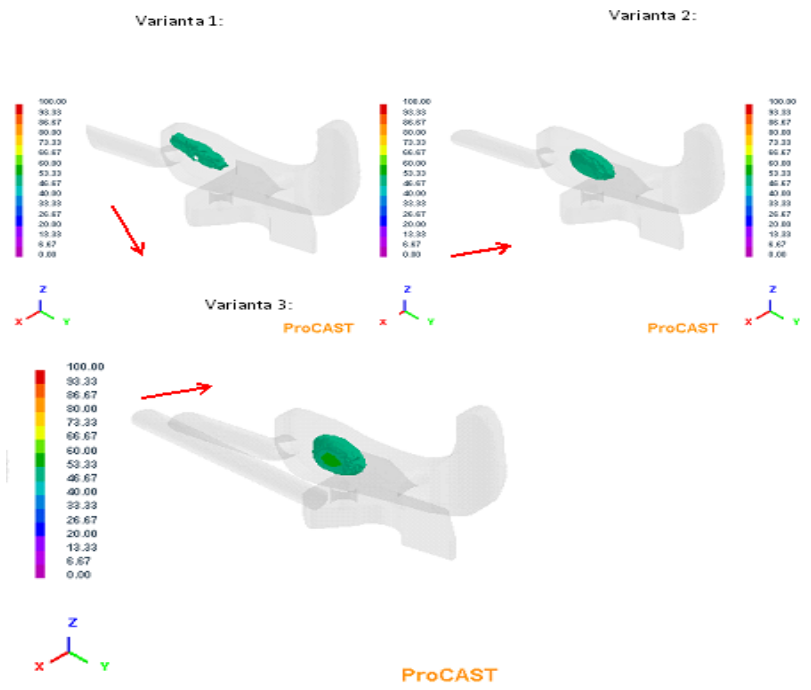
Obrázek 60: Vliv umístění zářezu na jakost odlitku klapka typ KL 119 98- šipka zobrazuje přibližný vliv působení gravitačního vektoru[vlastní zdroje]



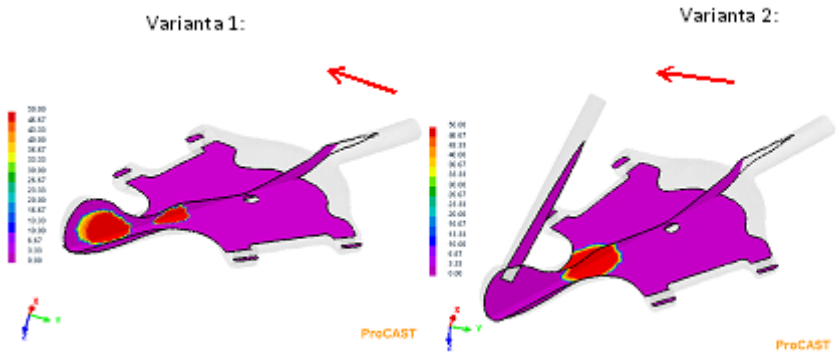
Obrázek 61: Vliv umístění zářezu na jakost odlitku klapka typ KL 119 98- šipka zobrazuje přibližný směr působení gravitačního vektoru[vlastní zdroje]



Obrázek 62:Vliv umístění zářezu na jakost odlitku klapka typ KLG 597- šipka zobrazuje přibližný směr působení gravitačního vektoru[vlastní zdroje]



Obrázek 63:Vliv umístění zářezu na jakost odlitku klapka typ KLG 55- šipka zobrazuje přibližný směr působení gravitačního vektoru[vlastní zdroje]

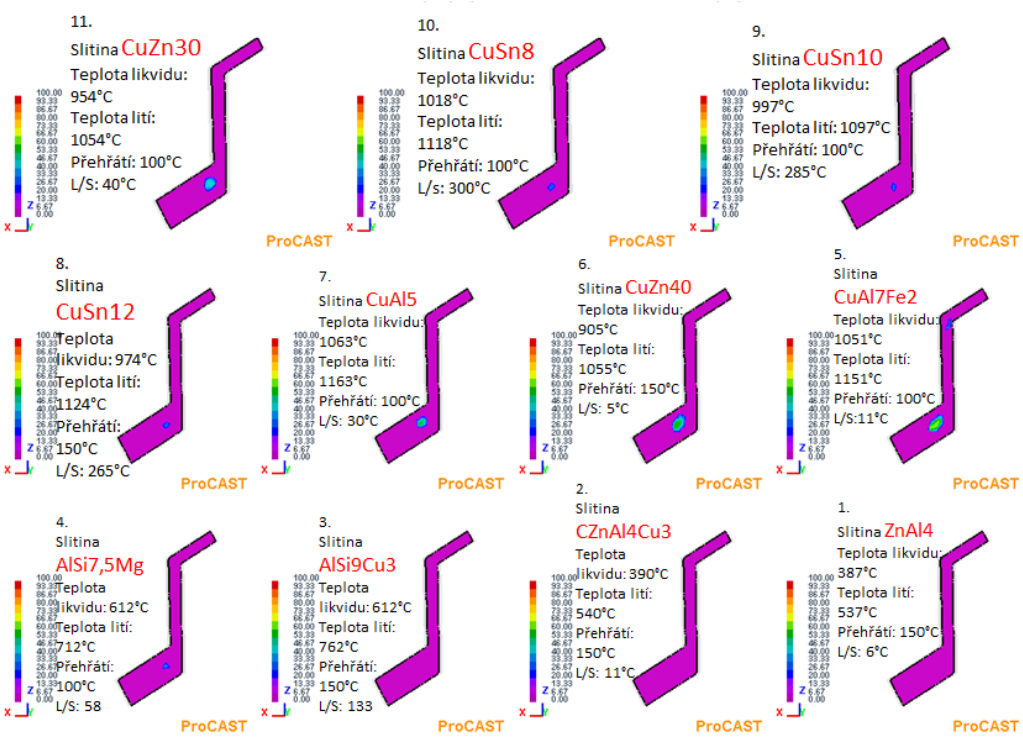


Obrázek 64:Vliv umístění zářezu na jakost odlitku klapka typ KLG 512- šipka zobrazuje přibližný směr působení gravitačního vektoru[vlastní zdroje]

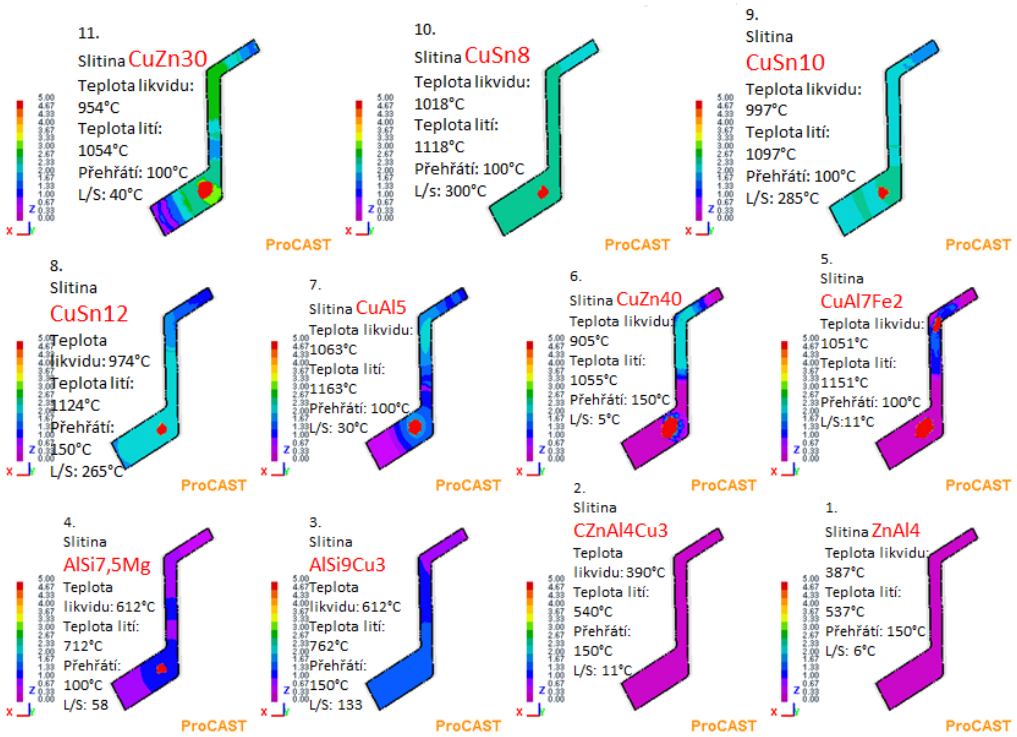
Z výše uvedených výsledků simulačního výpočtu pro různé typy klapek vyplívá podstatný vliv umístění zářezu na vnitřní jakost odlitku. Pro přesnější určení nejvhodnější varianty uložení zářezu je nutné prostudovat výsledky simulačních výpočtů při různě nastavené škále zobrazované poréznosti. Při poréznosti nastavené na nízké hodnoty, nebude možné rozpoznat místa, v kterých je poréznost vysoká a naopak. U součástek pro hudební průmysl, jak bylo uvedeno výše, je kladen důraz na nízkou povrchovou poréznost. Z toho důvodu, je nutné nastavit při zobrazování výsledku simulačního výpočtu zobrazovanou poréznost na co nejnižší hodnotu. Poté například u klapky typu KL 119 98 se jeví jako nejvýhodnější varianty varianta 2 a varianta 3. U těchto dvou variant je nízká poréznost a však při tomto nastavení poréznosti nelze řádně rozlišit, která varianta vykazuje nižší poréznost v objemnější části odlitku. Z toho důvodu je dobré podívat se na výsledky simulačního výpočtu s porézností

nastavenou na vyšší hodnoty například na 100%. Při tomto zobrazení jsou místa bez kovu zobrazena červenou barvou a místa, v kterých se vyskytuje určité procento kovu jinou- dle zvolené stupnice. Pokud tedy mezi sebou budou porovnány výsledky výše zmíněných variant 2 a 3, vyjde výhodněji varianta 3. Obdobným způsobem byly vyhodnoceny výsledky simulačních výpočtů u zbývajících typů klapek KLG 597, KLG 55 a KLG 512. U klapek typu KLG 597 a KLG 55 je poréznost zobrazena pomocí 3D zobrazení. U klapky typu KLG 512 je zobrazena pomocí dvou řezů. U Klapky typu KLG 597, vykazovala tato klapka nejnižší poréznost varianta 3. U klapky typu KLG 55, vykazovala nejnižší poréznost varianta 1 a u klapky typu KLG 512, vykazovala nižší poréznost varianta 2. Kromě polohy- umístění zářezu ústícího do odlitku, hraje významnou roli i jeho tloušťka, kdy při jeho špatně zvoleném průměru nebo počtu, bude vykazovat odlitek vyšší poréznost i při jeho sebelepším umístění.

Vliv odlévané slitiny



Obrázek 65:Výsledky simulačních výpočtů procesu odlévání- porovnání navrhovaných slitin se slitinou CuZn30, červenou barvou jsou zobrazena místa, která zobrazují 100% poréznost, tedy místa bez kovu[vlastní zdroje]



Obrázek 66:Výsledky simulačních výpočtů procesu odlévání- porovnání navrhovaných slitin se slitinou CuZn30, červenou barvou jsou zobrazena místa, která zobrazují 5% a vyšší poréznost slitiny[vlastní zdroje]

Při sledování poréznosti slitin je nutné zaměřit se kromě studia vnitřní poréznosti i na povchovou poréznost, která je pro výrobu hudebních nástrojů podstatná. Od povrchové poréznosti se totiž odvíjí stupeň dalšího zpracování odlitku. Při zobrazené 100% poréznosti jsou vybrány slitiny, které vykazují nejnižší poréznost ve své nejobjemější části. Následně je přihlédnuto k povrchové poréznosti, k jejímuž zobrazení je nutné snížit procento zobrazované poréznosti a to např. na 5% (na hodnotu při které slitiny vykazují rozdíly v zobrazované poréznosti.. Z tohoto porovnání jsou následně vyloučeny slitiny s vysokou povrchovou porézností a ze zbytku jsou vybráni vhodní kandidáti. Jelikož je hlavním hodnotícím faktorem povrchová jakost odlitku, nikoliv středová, jsou do finálního výběru vráceny i slitiny, které vykazují vyší vnitřní poréznost v objemnější části odlitku.

Závěr

Pomocí simulačních výpočtů procesu odlévání v programu PROCAST společnosti MECAS ESI GROUP s.r.o., byly pro společnost AMATI DEMAK s.r.o. navrženy slitiny vhodné pro odlévání klapek hudebních nástrojů. Z těchto návrhů byly vybrány slitiny, které byly následně odlity. Kromě vlivu odlévané slitiny na jakost odlitku, byl pro výše zmíněnou společnost určen vliv velikosti zářezu, vliv umístění zářezu, který přivádí kov do odlitku a vliv vzdálenosti- rozmístění odlitků na licím kůlu.

Příloha III.

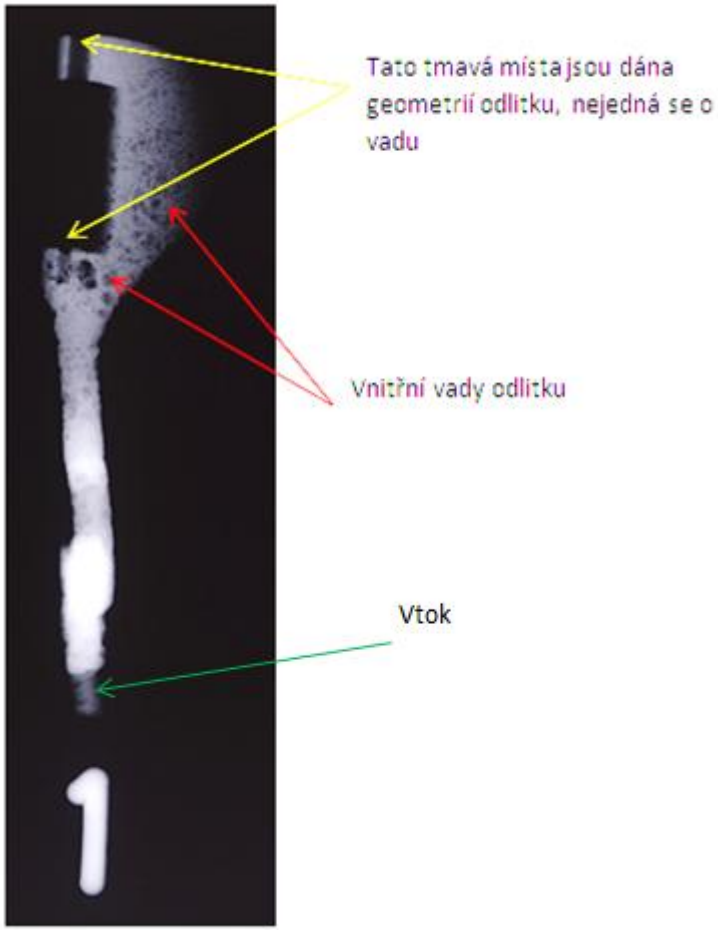
RTG a metalografie

RTG analýza- vzorky dodané společností AMATI

Tato část příloh diplomové práce obsahuje RTG a metalografické snímky, které nebyly použity v hlavní části této práce.

Rentgen- vzorek (CuNi12Zn24), horní část

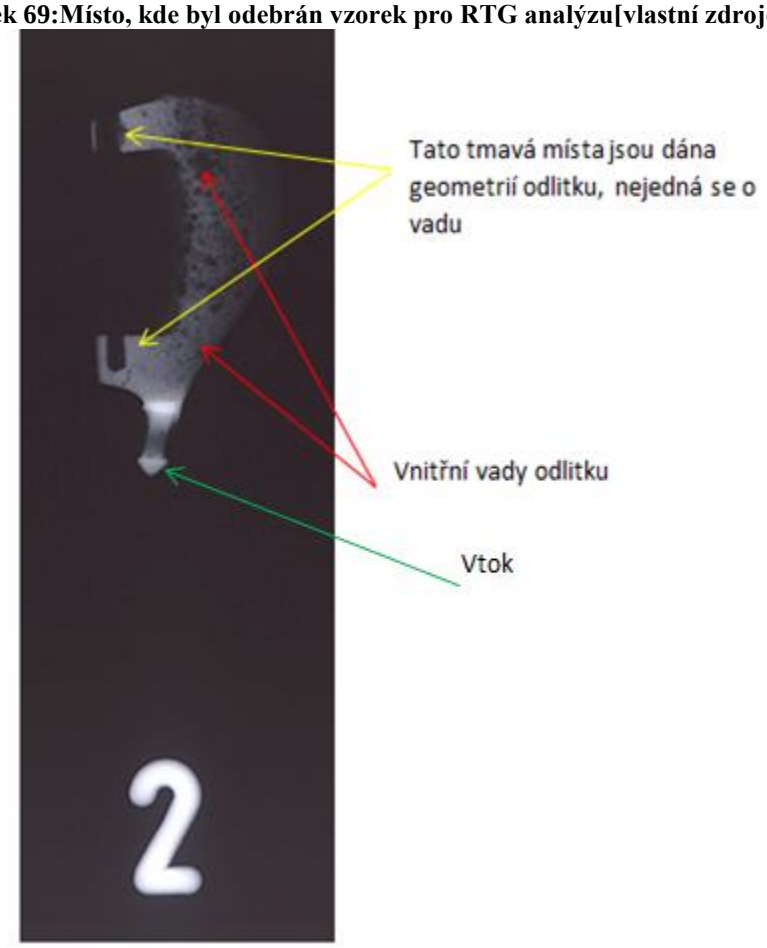
Obrázek 68: Místo, kde byl odebrán vzorek pro RTG analýzu[vlastní zdroje]



Obrázek 67: Rentgenový snímek vzorku CuNi12Zn24 (horní část), shluky vad jsou vidět v rozšířené části dolitku, na druhé straně od vtoku odlitku. V této oblasti má kov zhoršenou dosazovací schopnost, díky čemuž mohou vznikat řediny. Náprava je možná například nálitkováním v blízkosti jejich výskytu popřípadě umístěním dalšího vtoku. [vlastní zdroje]

Rentgen- vzorek (CuNi12Zn24), střední část

Obrázek 69:Místo, kde byl odebrán vzorek pro RTG analýzu[vlastní zdroje]



Obrázek 70:Rentgenový snímek vzorku CuNi12Zn24 (střední část), vady odlitku se nacházejí v rozšiřující se části odlitku, směrem od vtoku. V této oblasti má kov zhoršenou dosazovací schopnost, díky čemuž mohou vznikat řediny. Náprava je možná například nálitkováním v blízkosti jejich výskytu popřípadě umístěním dalšího vtoku. [vlastní zdroje]

Závěr

Pomocí RTG analýzy byly u jednotlivých vzorků objeveny podpovrchové vady- jejich umístění. Analýza těchto vad a jejich popis, byl proveden pomocí metalografického výbrusu viz metalografie. U jednotlivých vzorků byly pozorovány shluky ředin, (např. vzorek N31 KLG 502), samostatně se vyskytující vady (bubliny popřípadě řediny (vzorek CuZn30 KL 119 98)). Tyto vady vznikli v průběhu tuhnutí odlitku a to díky unikajícím plynům a špatné dosazovací schopnosti kovu.

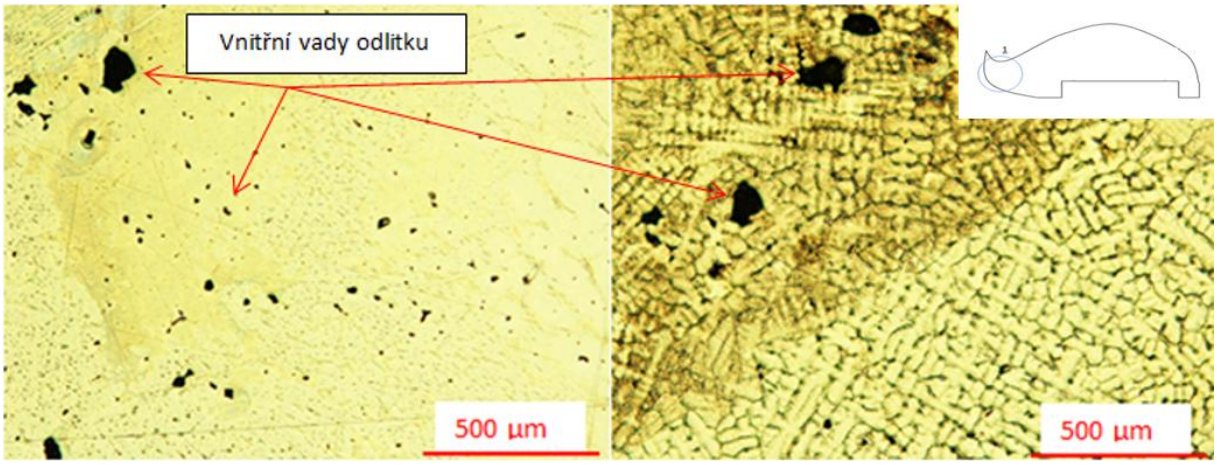
Metalografie- vzorky dodané společností AMATI

Metalografie- vzorek (CuNi12Zn24), horní část

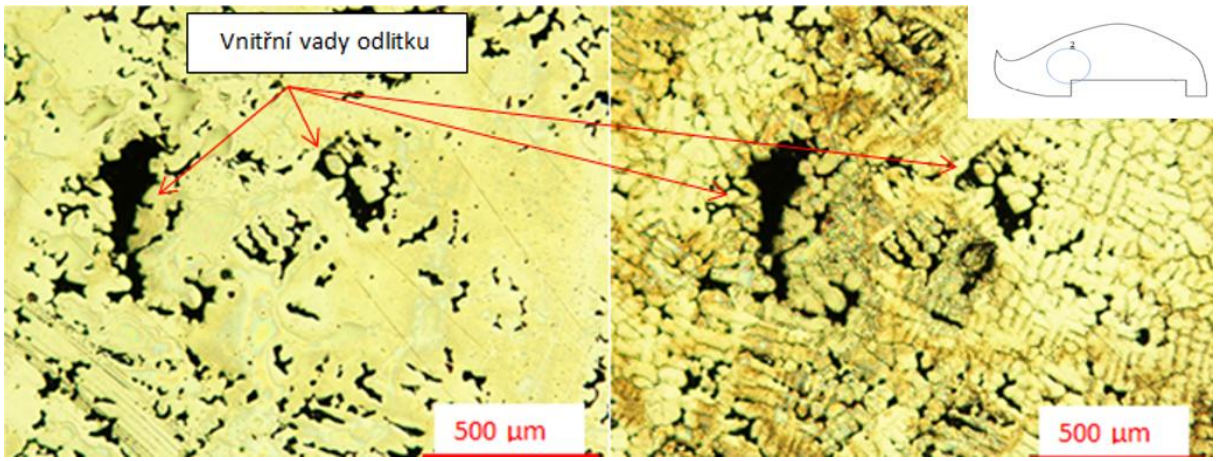
Obrázek 71: Ze stromečku z tavby slitiny CuNi12Zn24, byly odříznuty vzorky z horní, střední a spodní části stromečku. Žlutým kroužkem je označena oblast odebrání prvního vzorku (horní část stromečku). [vlastní zdroje]

Metalografie byla u vzorku provedena na pěti různých místech, tato místa jsou označena na jednoduché skice, umístěné v pravém horním rohu metalografického snímku. Vzorek byl nejprve broušen a následně vyleštěn. Po vyleštění byly na vybraných místech pořízeny první snímky struktury. Poté došlo k naleptání vzorku a to pomocí leptadla Robin, po kterém byly pořízeny další snímky struktury.

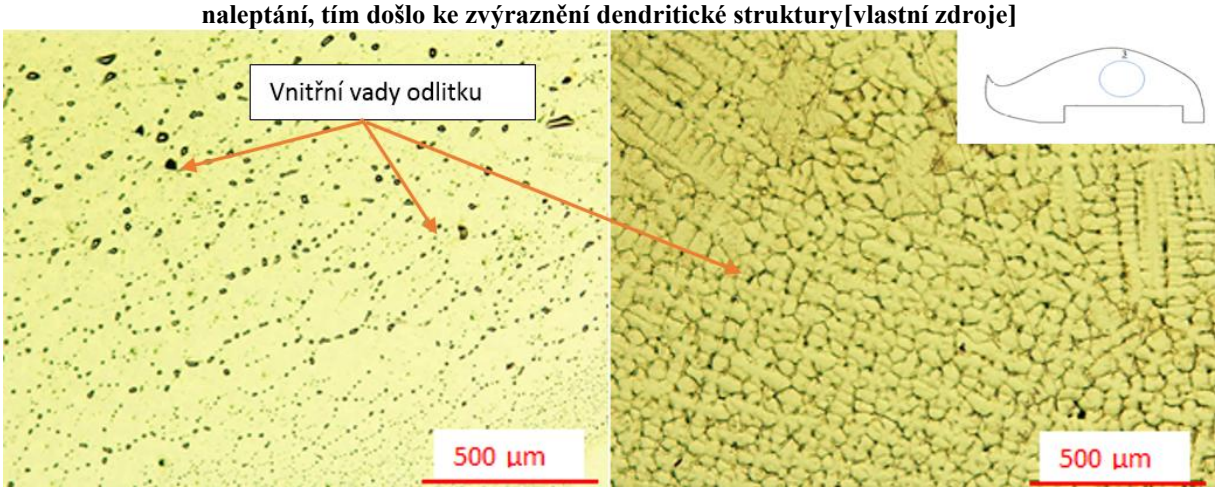
Obrázek 72: Horní část stromečku, po zalití a naleptání připravená pro metalografii a měření mikrotvrdosti[vlastní zdroje]



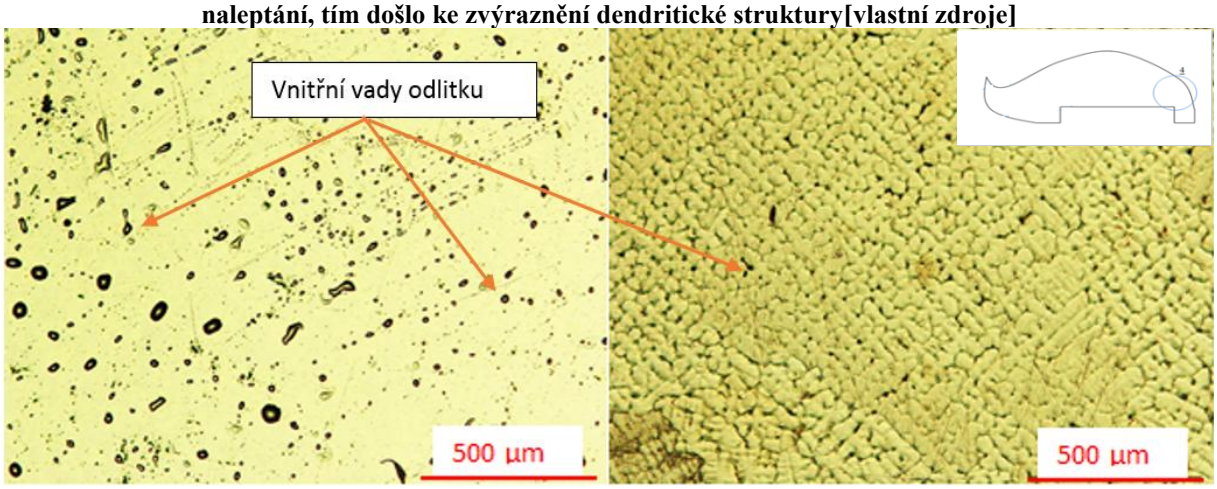
Obrázek 73:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se s velkou pravděpodobností o řediny, nacházející se v tepelné ose odlitku. Zde tuhne kov jako poslední, pokud by tedy došlo k ztuhnutí předchozí zúžené oblasti dříve, zabránilo by to dosazování kovu do této a dalších oblastí odlitku, Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury odlitku. [vlastní zdroje]



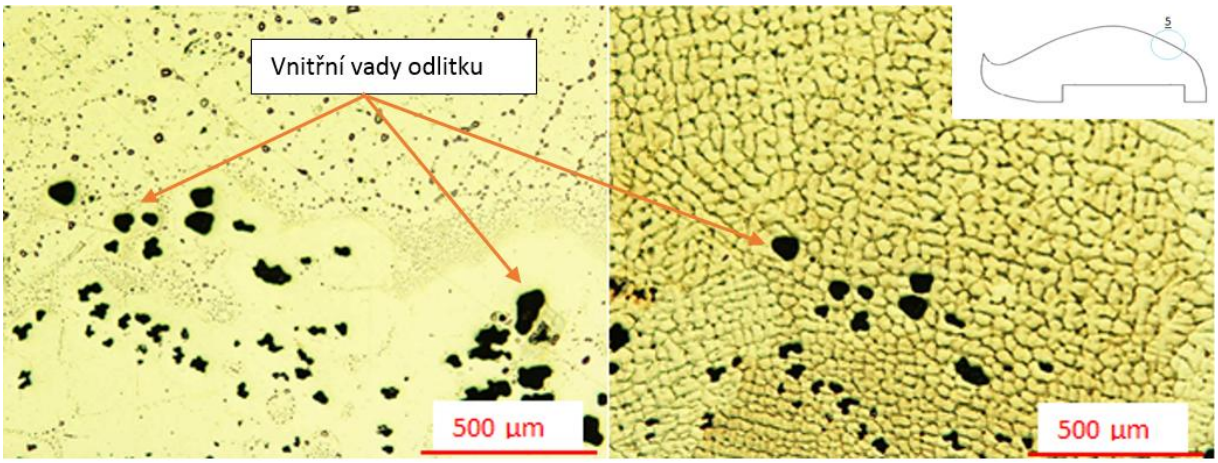
Obrázek 74:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku s největší pravděpodobností se jedná o řediny. . Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 75:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 76:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 77:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]

Mikrotvrdost

Tabulka 8: Naměřená mikrotvrdost u vzorku č. 1, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	85	90	98	91	99	-
Průměrná mikrotvrdost:	92,6	Směrodatná odchylka:	4,72			

Závěr z měření

Při metalografickém studiu struktury byly zaznamenány vady, které jsou zachyceny na výše uvedených snímcích. Jednalo se o podpovrchové bubliny nahodile rozmístěné v objemu vzorku. Tyto vady mohli vzniknout díky unikajícím plynům při tuhnutí odlitku.

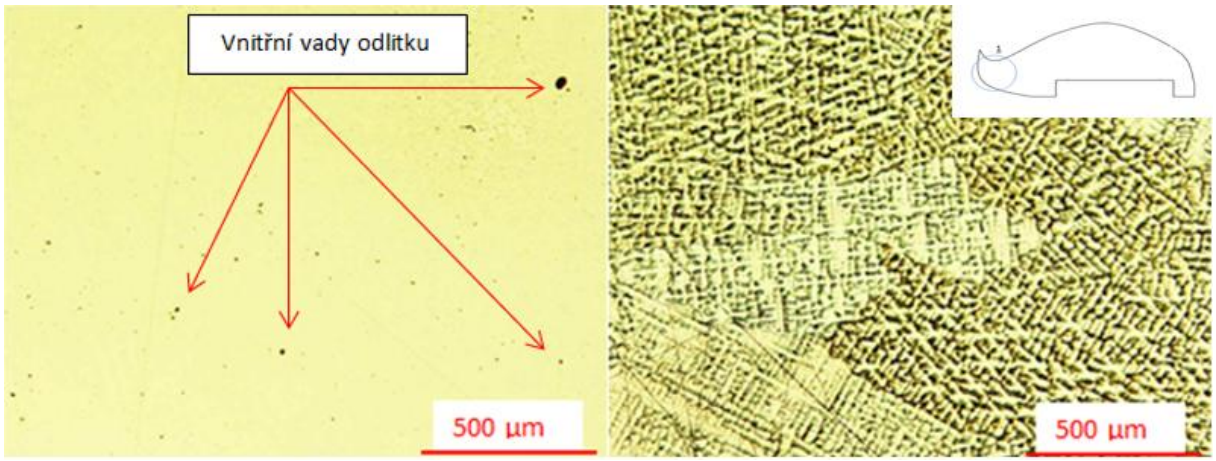
Mikrotvrdost byla měřena napříč vzorkem, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaného vzorku.

Metalografie- vzorek (CuNi12Zn24) střední část

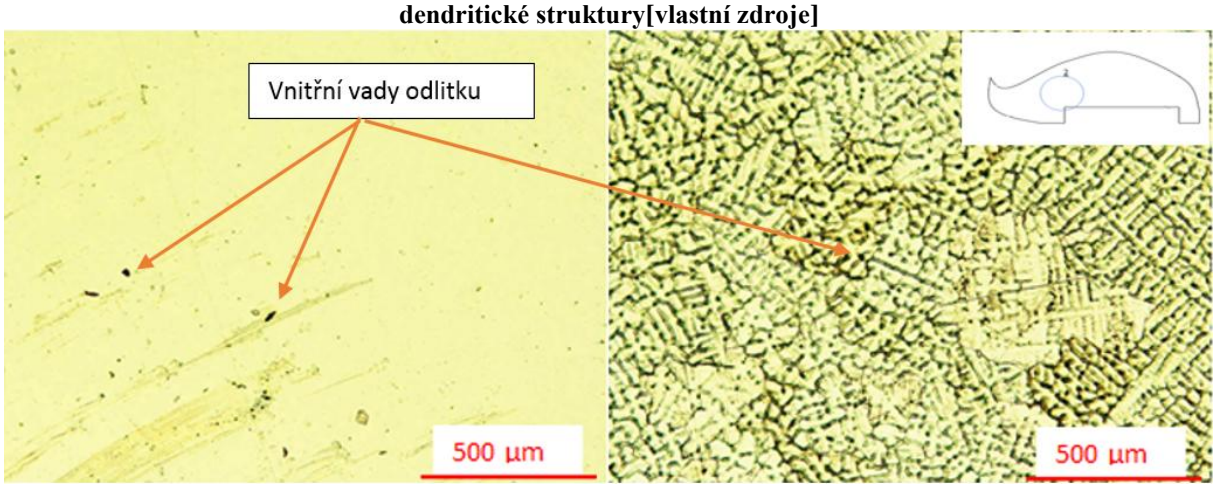
Obrázek 78: Ze stromečku z tavby slitiny CuNi12Zn24, byly odříznuty vzorky z horní, střední a spodní části stromečku. Žlutým kroužkem je označena oblast odebrání druhého vzorku (střední část stromečku). [vlastní zdroje]

Metalografie byla u vzorku provedena na pěti různých místech, tato místa jsou označena na jednoduché skice, umístěné v pravém horním rohu metalografického snímku. Vzorek byl nejprve broušen a následně vyleštěn. Po vyleštění byly na vybraných místech pořízeny první snímky struktury. Poté došlo k naleptání vzorku a to pomocí leptadla Robin, po kterém byly pořízeny další snímky struktury.

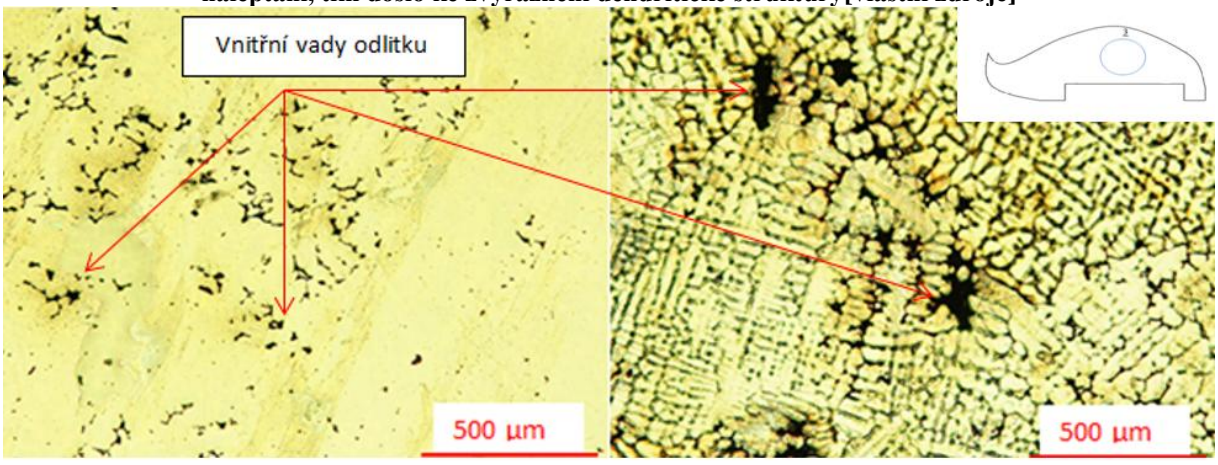
Obrázek 79: Střední část stromečku, po zalití a naleptání připravená pro metalografii a měření mikrotvrdosti[vlastní zdroje]



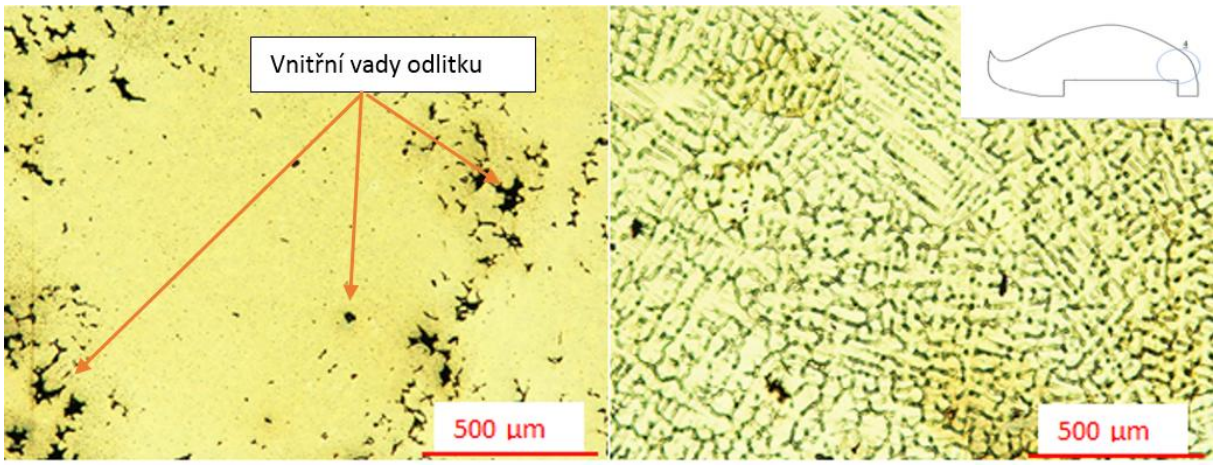
Obrázek 80:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním, v této oblasti se nachází minimum vad. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



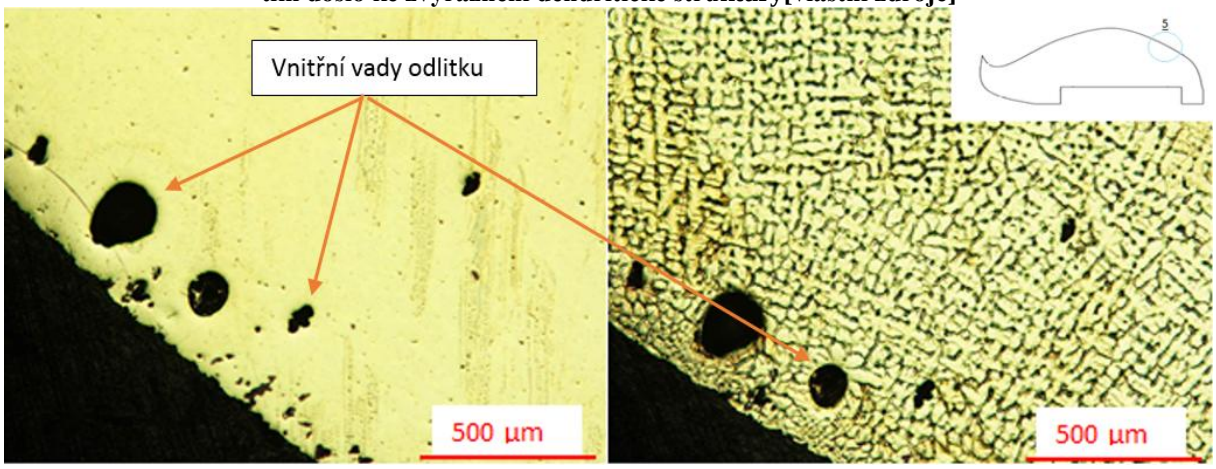
Obrázek 81:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním V této oblasti se nachází minimum vad, jedná se o černé tečky v jeho spodní levé části. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 82:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku, s největší pravděpodobností se jedná o řediny vyskytující se v tepelné ose odlitku, v této oblasti tuhne kov jako poslední, vzhledem k poloze vad (nejširší místo odlitku), zde může mít kov zhoršenou dosazovací schopnost a to díky předešlé zužující se oblasti. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 83:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 84:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]

Mikrotvrdost

Tabulka 9: Naměřená mikrotvrdost u vzorku č. 2, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6	7
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	110	109	113	116	128	129	105
Průměrná mikrotvrdost:	115,7	Směrodatná odchylka:	7,39				

Závěr z měření

Při metalografickém studiu struktury byly zaznamenány vady, které jsou zachyceny na výše uvedených snímcích. Jednalo se o podpovrchové bubliny a řediny. Tyto vady mohli vzniknout díky unikajícím plynům, při tuhnutí odlitku.

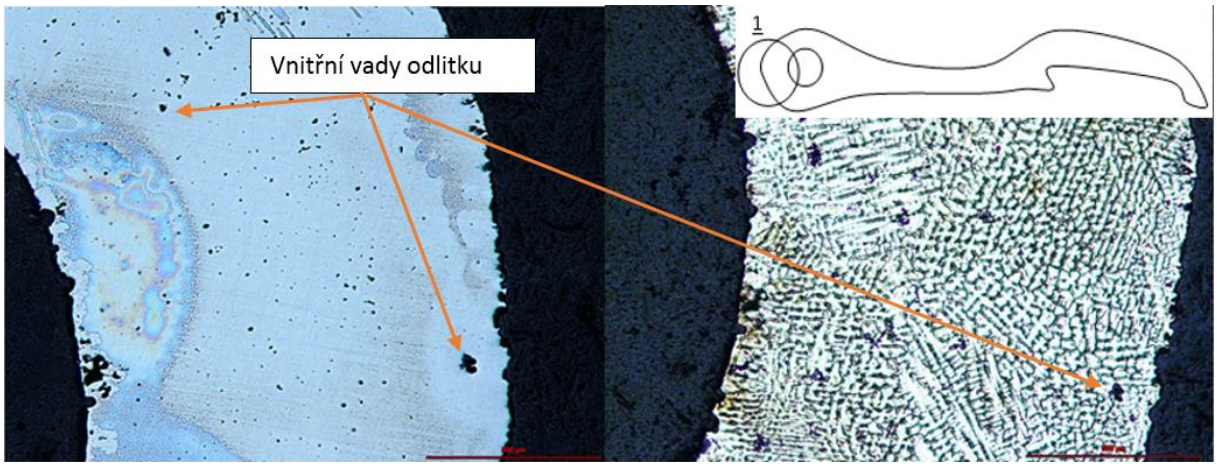
Mikrotvrdost byla měřena napříč vzorkem, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaného vzorku.

Metalografie- vzorek (CuNi12Zn24), spodní část

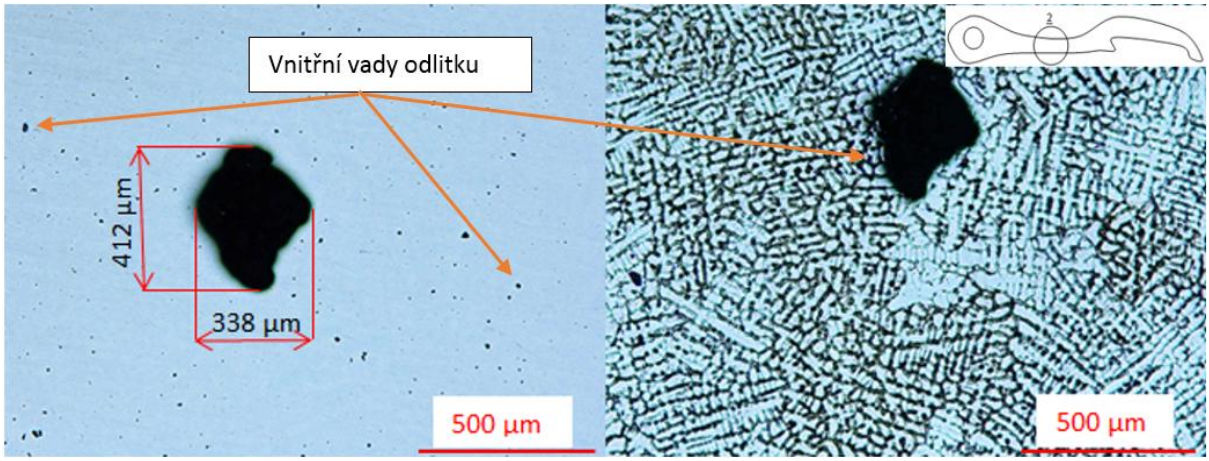
Obrázek 85:Ze stromečku z tavby slitiny CuNi12Zn24, byly odříznuty vzorky z horní, střední a spodní části stromečku. Žlutým kroužkem je označena oblast odebrání třetího vzorku (spodní část stromečku). [vlastní zdroje]

Metalografie byla u vzorku provedena na čtyřech různých místech, tato místa jsou označena na jednoduché skice, umístěné v pravém horním rohu metalografického snímku. Vzorek byl nejprve broušen a následně vyleštěn. Po vyleštění byly na vybraných místech pořízeny první snímky struktury. Poté došlo k naleptání vzorku a to pomocí leptadla Robin, po kterém byly pořízeny další snímky struktury.

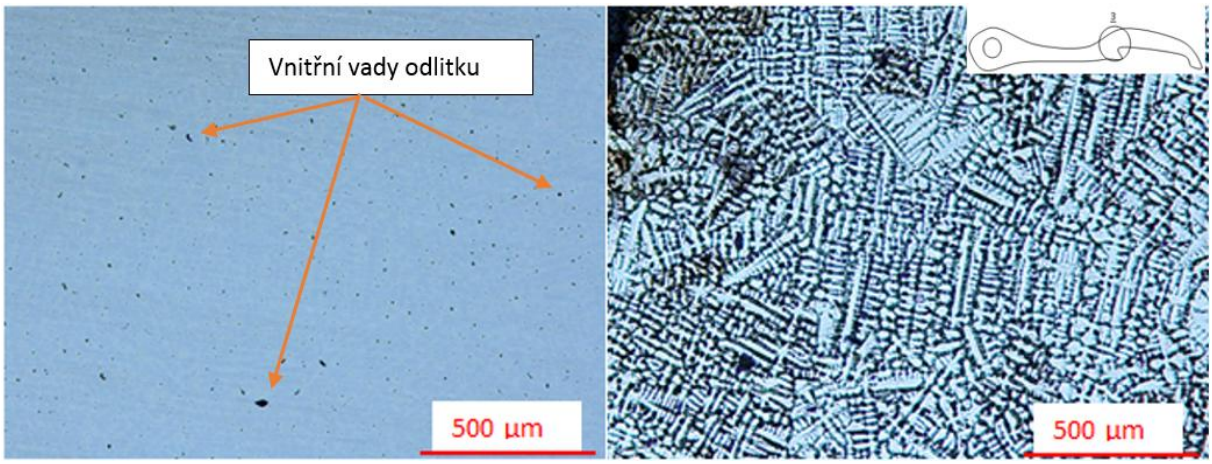
Obrázek 86:Spodní část stromečku, po zalití a naleptání připravená pro metalografii a měření mikrotvrdosti[vlastní zdroje]



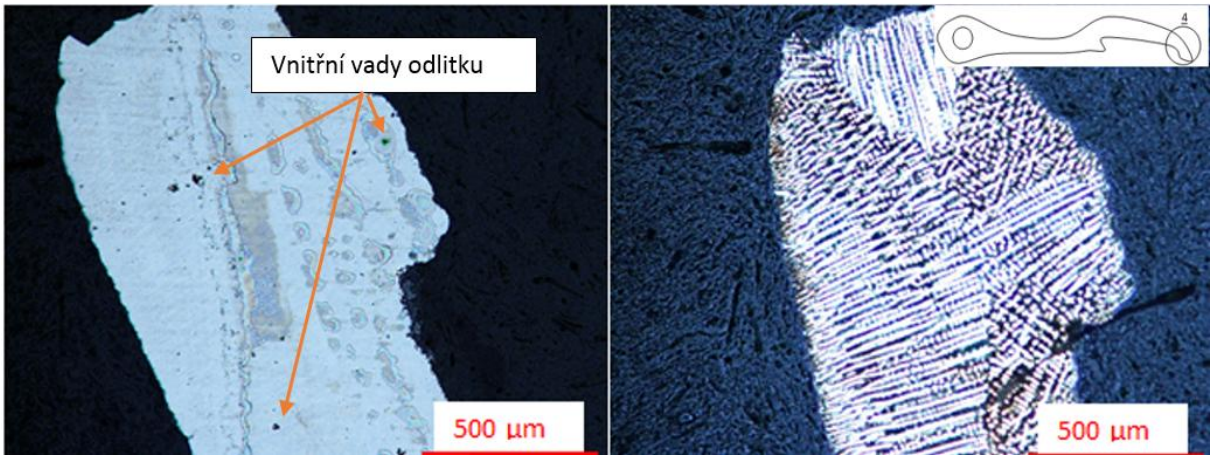
Obrázek 87: Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 88:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o staženinu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 89:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 90:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]

Mikrotvrdost

Tabulka 10: Naměřená mikrotvrdost u vzorku č. 3, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

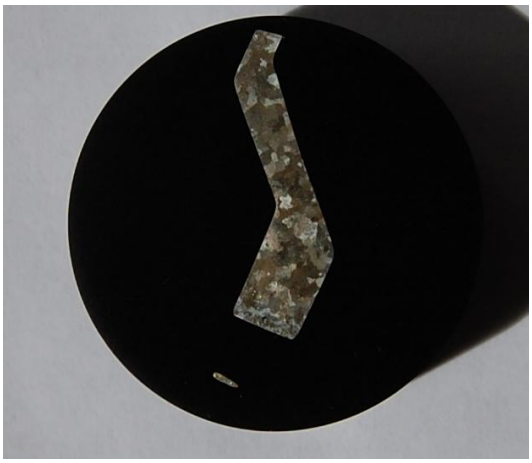
Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	99	95	96	100	109	94
Průměrná mikrotvrdost:	98,8	Směrodatná odchylka:	3,83			

Závěr z měření

Při metalografickém studiu struktury byly zaznamenány vady, které jsou zachyceny na výše uvedených snímcích. Jednalo se o staženinu vznikající díky snížené dosazovací schopnosti kovu a podpovrchové bubliny nahodile rozmístěné v objemu vzorku. Tyto vady mohli vzniknout díky unikajícím plynům při tuhnutí odlitku.

Mikrotvrdost byla měřena napříč vzorkem, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaného vzorku

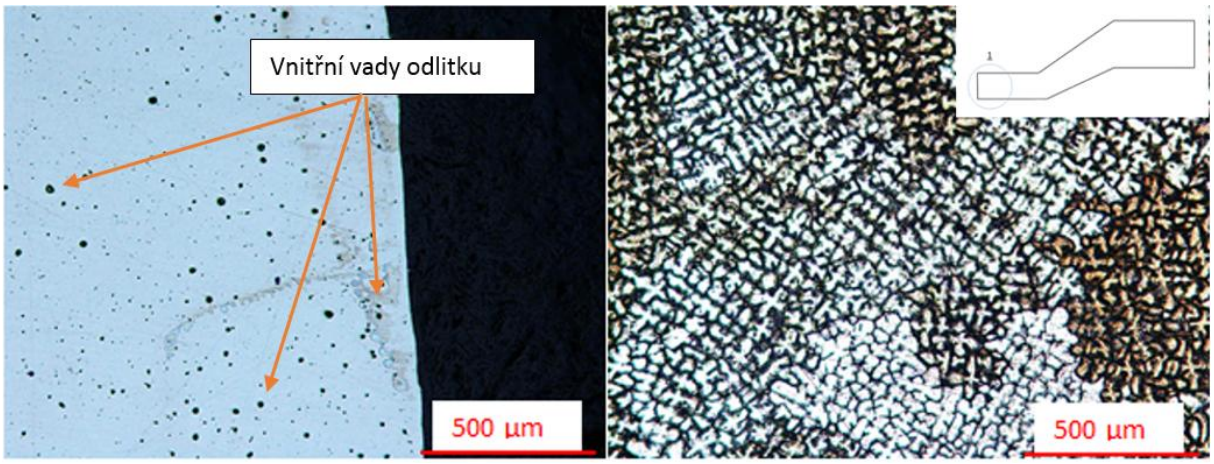
Vzorek N31, klapka typu KL119 98



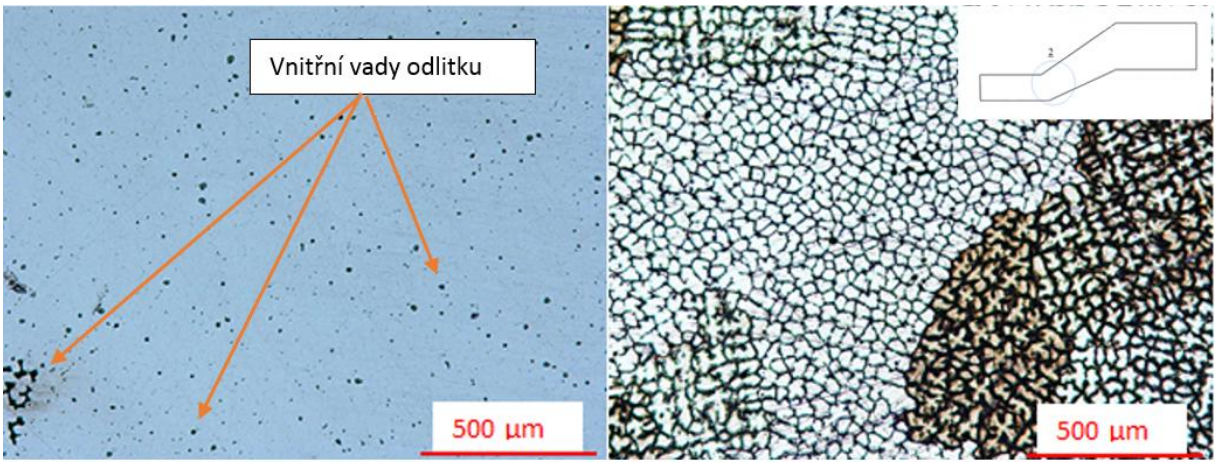
Obrázek 91:Vzorek N31 KL 119 98 po zalití do formovací hmoty a naleptání[vlastní zdroje]

Obrázek 92: Vzorek N31 KL 119 98, učen pro metalografii a měření mikrotvrdosti[vlastní zdroje]

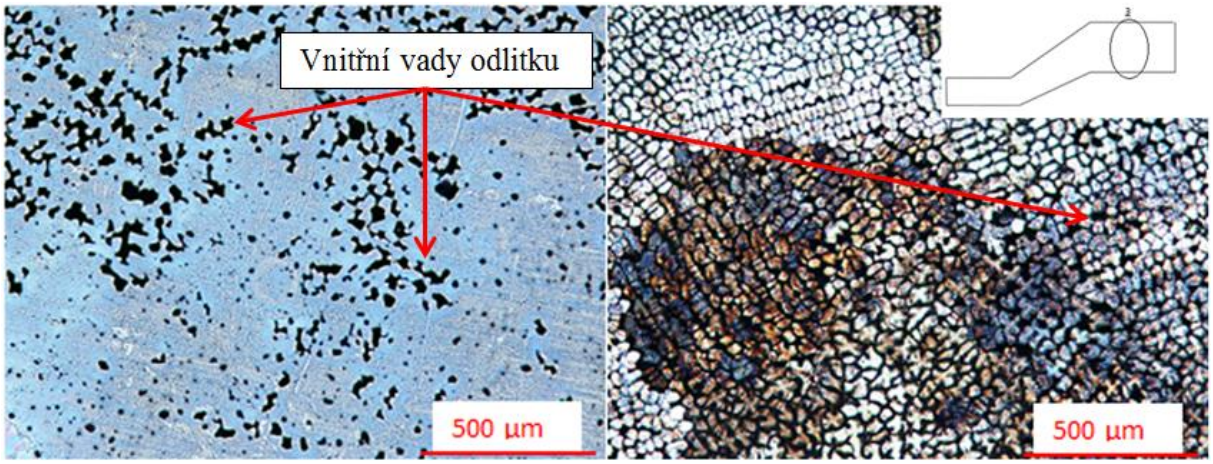
Metalografie byla u vzorku provedena na čtyřech různých místech, tato místa jsou označena na jednoduché skice, umístěné v pravém horním rohu metalografického snímku. Vzorek byl nejprve broušen a následně vyleštěn. Po vyleštění byly na vybraných místech pořízeny první snímky struktury. Poté došlo k naleptání vzorku a to pomocí leptadla Robin, po kterém byly pořízeny další snímky struktury.



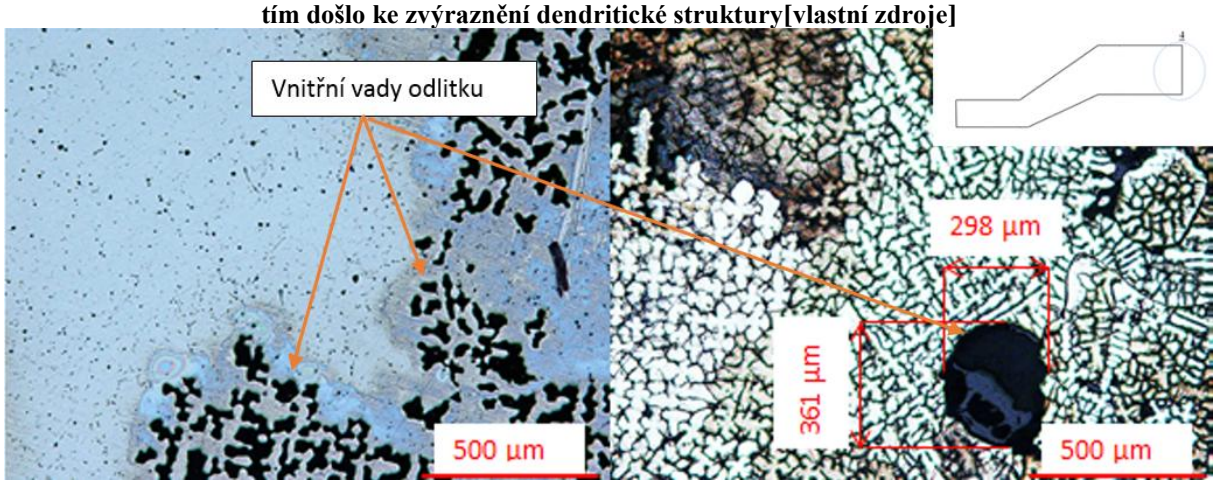
Obrázek 93:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 94:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku jedná se o bubliny nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 95:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]



Obrázek 96:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, tím došlo ke zvýraznění dendritické struktury[vlastní zdroje]

Mikrotvrdost

Tabulka 11: Naměřená mikrotvrdost u vzorku č. 4, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	94	102	109	96	95	99
Průměrná mikrotvrdost:	99,2	Směrodatná odchylka:	4,22			

Závěr z měření

Při metalografickém studiu struktury byly zaznamenány vady, které jsou zachyceny na výše uvedených snímcích. Jednalo se o podpovrchové bubliny a řediny. Tyto vady mohli vzniknout díky unikajícím plynům, při tuhnutí odlitku a díky špatné dosazovací schopnosti kovu.

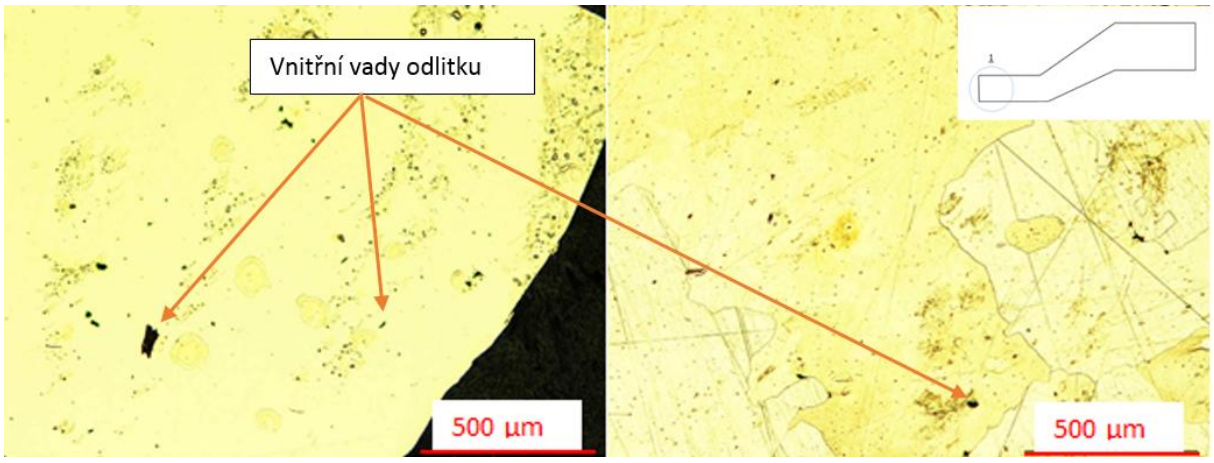
Mikrotvrdost byla měřena napříč vzorkem, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaného vzorku.

Metalografie vzorek CuZn30, klapka typu KL119 98

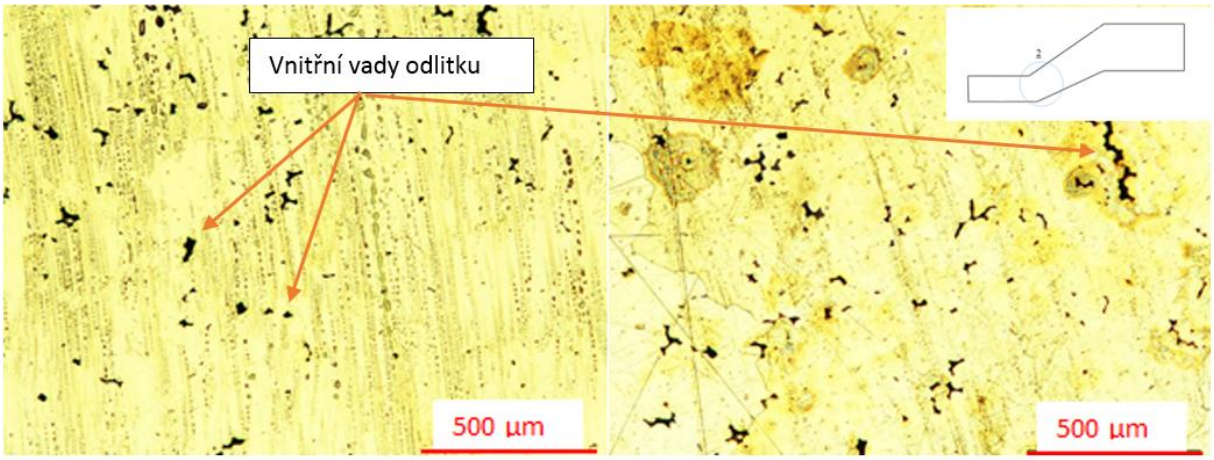
Obrázek 97: Vzorek CuZn30 KL119 98, zalitý do formovací hmoty po naleptání (vzorek určený pro metalografii a mikrotvrdost) [vlastní zdroje]

Obrázek 98: Vzorky CuZn30 KL 119 98 určené pro jednotlivé experimentální analýzy[vlastní zdroje]

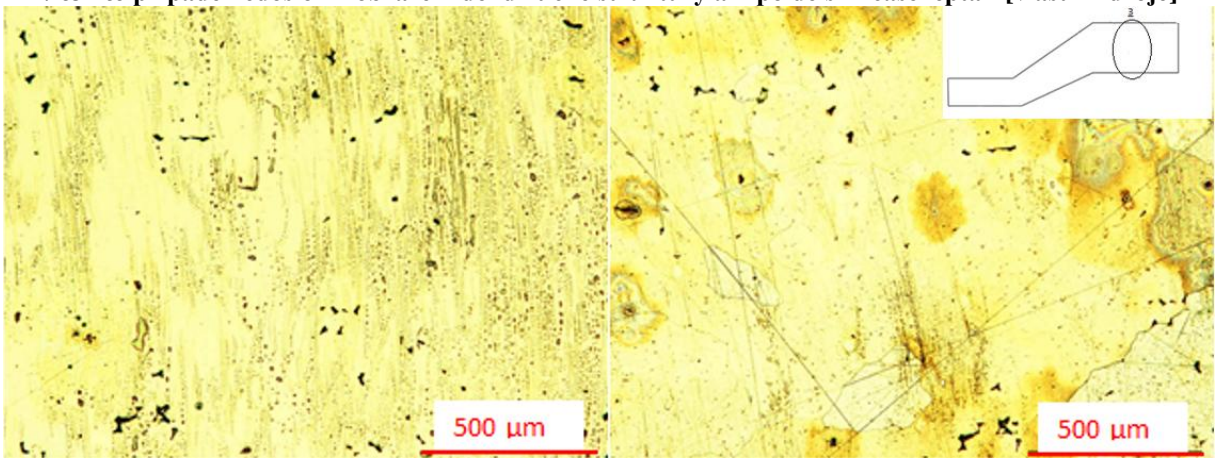
Metalografie byla u vzorku provedena na čtyřech různých místech, tato místa jsou označena na jednoduché skice, umístěné v pravém horním rohu metalografického snímku. Vzorek byl nejprve broušen a následně vyleštěn. Po vyleštění byly na vybraných místech pořízeny první snímky struktury. Poté došlo k naleptání vzorku a to pomocí leptadla Robin, po kterém byly pořízeny další snímky struktury.



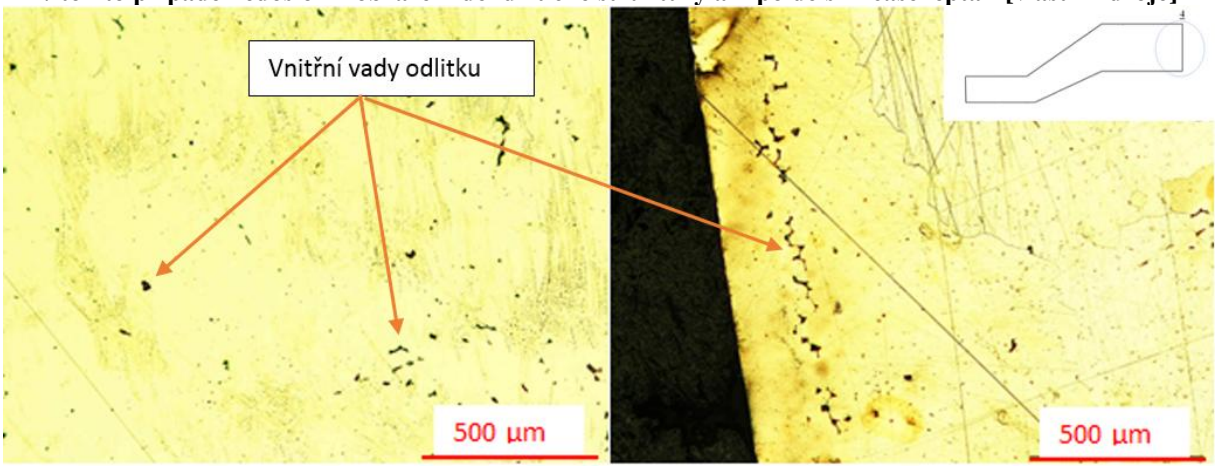
Obrázek 99:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, v tomto případě nedošlo k zobrazení dendritické struktury ani po delším čase leptání. [vlastní zdroje]



Obrázek 100:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, v tomto případě nedošlo k zobrazení dendritické struktury ani po delším čase leptání[vlastní zdroje]



Obrázek 101:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, v tomto případě nedošlo k zobrazení dendritické struktury ani po delším čase leptání[vlastní zdroje]



Obrázek 102:Levá část obrázku ukazuje strukturu před naleptáním. černé oblasti jsou vady odlitku nahodile rozmístěné v objemu materiálu. Pravá část obrázku zobrazuje strukturu vzorku po naleptání, v tomto případě nedošlo k zobrazení dendritické struktury ani po delším čase leptání

Mikrotvrdost

Tabulka 12: Naměřená mikrotvrdost u vzorku č. 4, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	76	79	82	88	77	-
Průměrná mikrotvrdost:	80,4	Směrodatná odchylka:	3,68			

Závěr z měření

Při metalografickém studiu struktury byly zaznamenány vady, které jsou zachyceny na výše uvedených snímcích. Jednalo se o podpovrchové a řediny. Tyto vady mohli vzniknout díky špatné dosazovací schopnosti kovu, při tuhnutí odlitku.

Mikrotvrdost byla měřena napříč vzorkem, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaného vzorku.

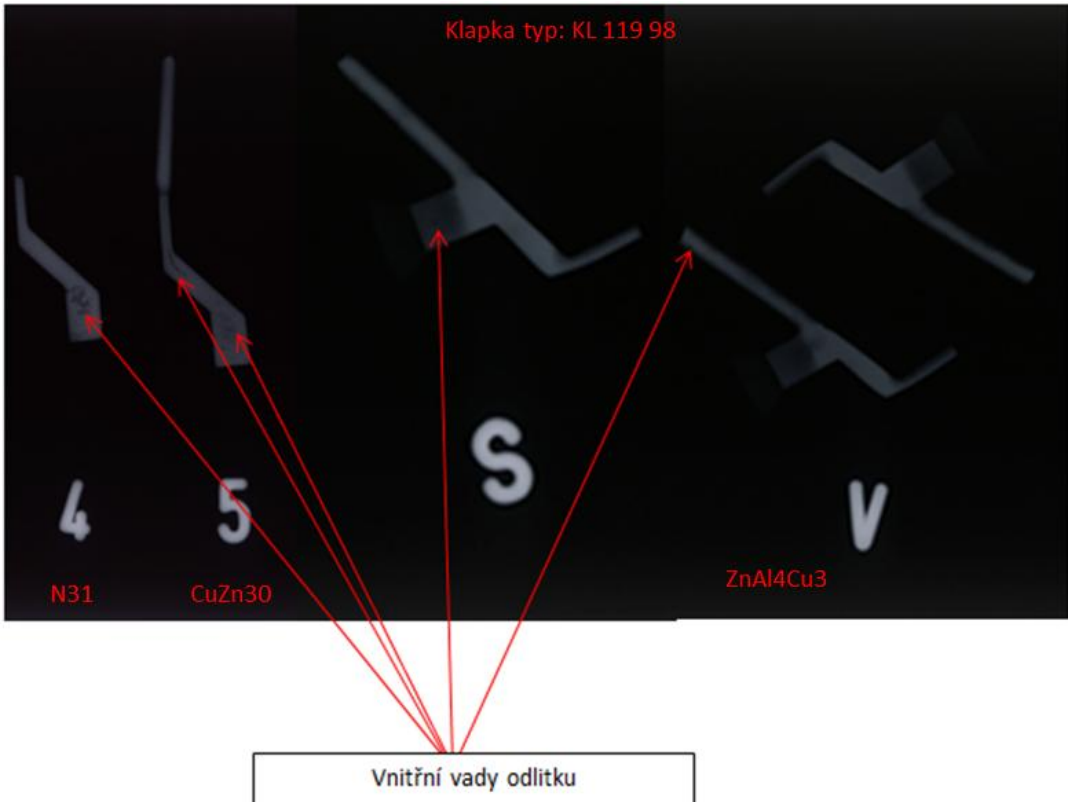
Závěr

Tato část přílohy diplomové práce se zabývá hodnocením struktury odlitků vyráběných formou vytavitelného modelu. První tři vzorky byly odebrány z jednoho stromečku (jedna tavba). Díky tomu bylo možno pozorovat změny struktury a mechanických vlastností v jeho různých částech. Na základě provedené analýzy mikrotvrdosti lze usuzovat na stejné mechanické vlastnosti v jednotlivých částech stromečku. Při metalografickém hodnocení struktury byly u jednotlivých vzorků pozorovány bubliny, které vznikají unikajícím plynem při tuhnutí odlitku, staženiny, které vznikají díky špatné dosazovací schopnosti kovu a řediny. Stejné expertízy byly provedeny i u dalších vzorků vyrobených z odlišných materiálů. Při těchto expertízách byly u všech vzorků zjištěny vady struktury, přičemž měření mikrotvrdosti u jednotlivých vzorků potvrdilo neměnné mechanické vlastnosti napříč jednotlivými vzorky.

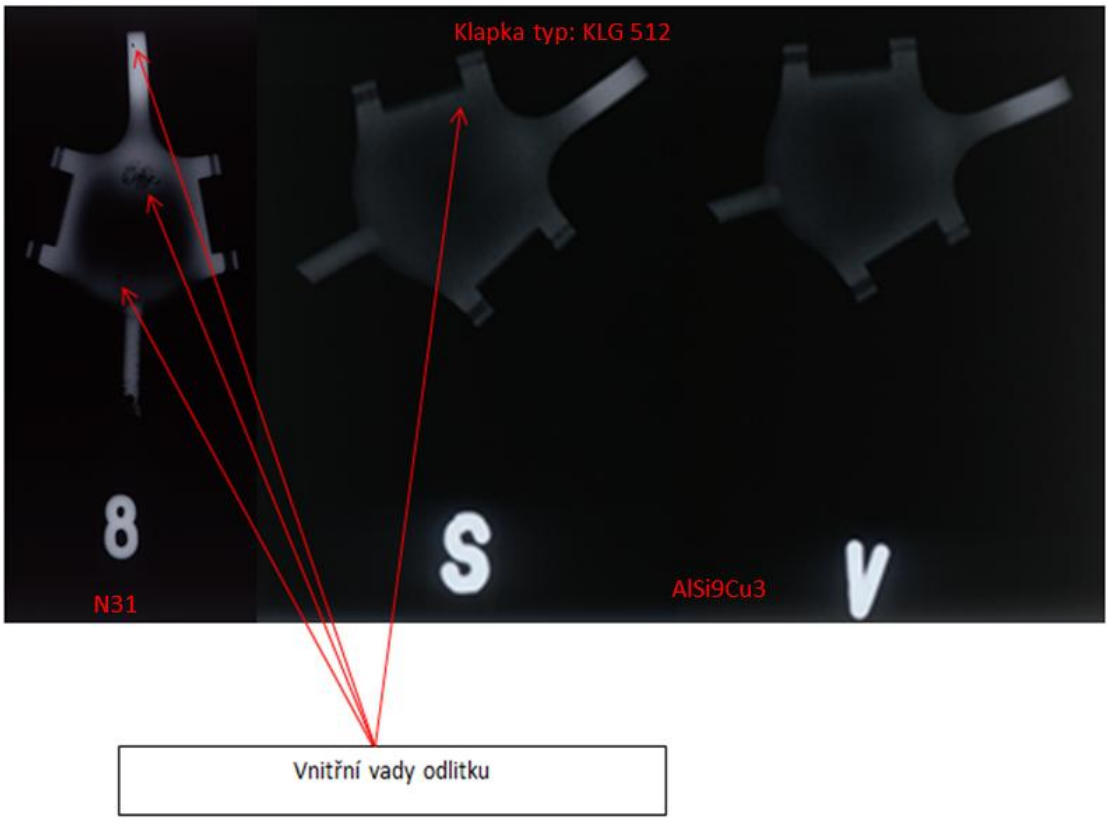
Metalografie a RTG- Porovnání slitin odlitých na základě dat simulačního výpočtu se slitinami dodanými

Tato část příloh diplomové práce obsahuje RTG a metalografické snímky slitin odlitých na základě výsledků simulačního výpočtu. Tyto snímky jsou zde porovnány se vzorky, které dodala společnost AMATI DEMAK s.r.o.

RTG analýza: porovnání slitin dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o., se slitinami odlitými na základě simulačního výpočtu procesu odlévání



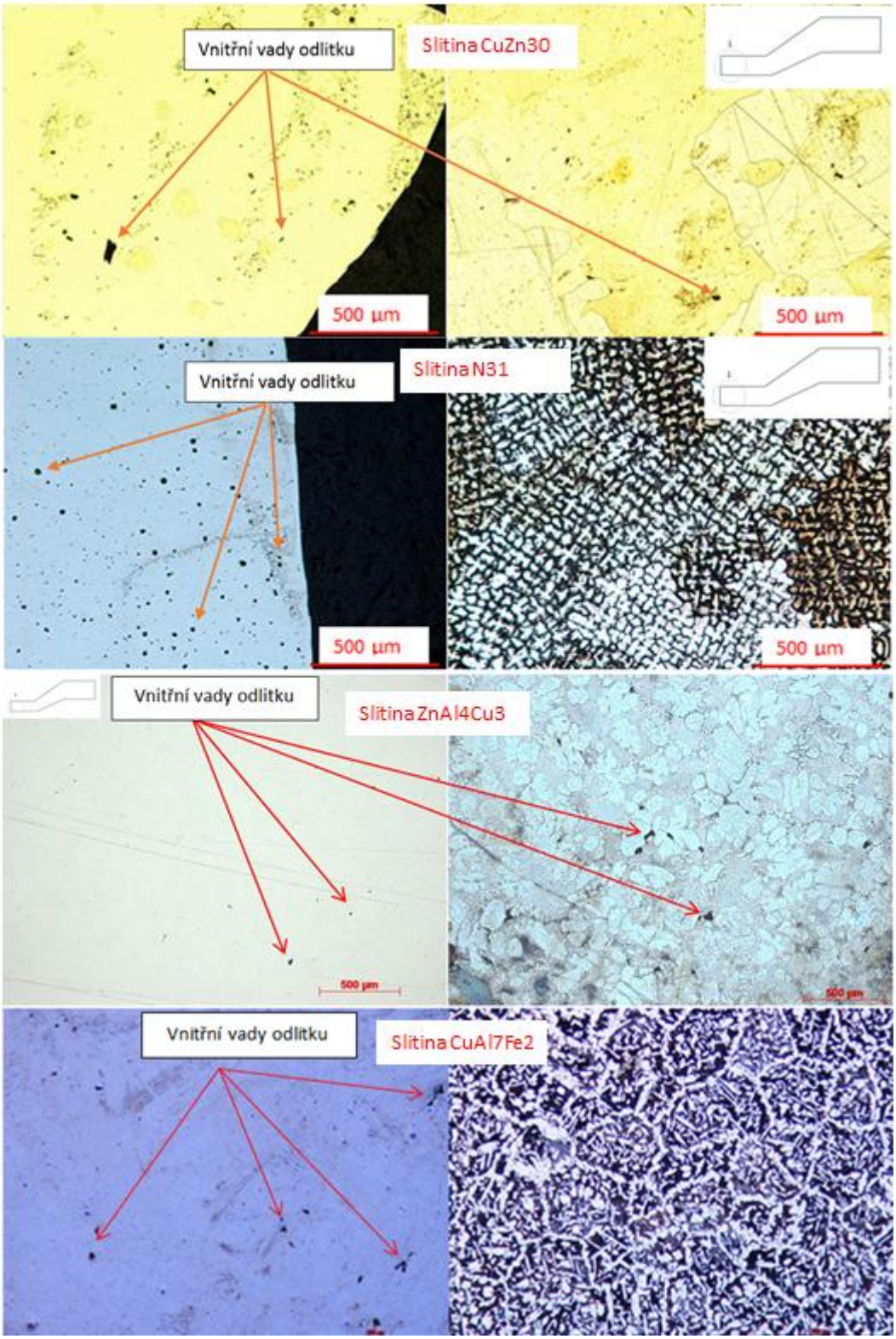
Obrázek 103: Porovnání RTG snímků slitin N31 a CuZn30 se slitinou ZnAl4Cu3, navrženou pomocí simulačního výpočtu[vlastní zdroje]



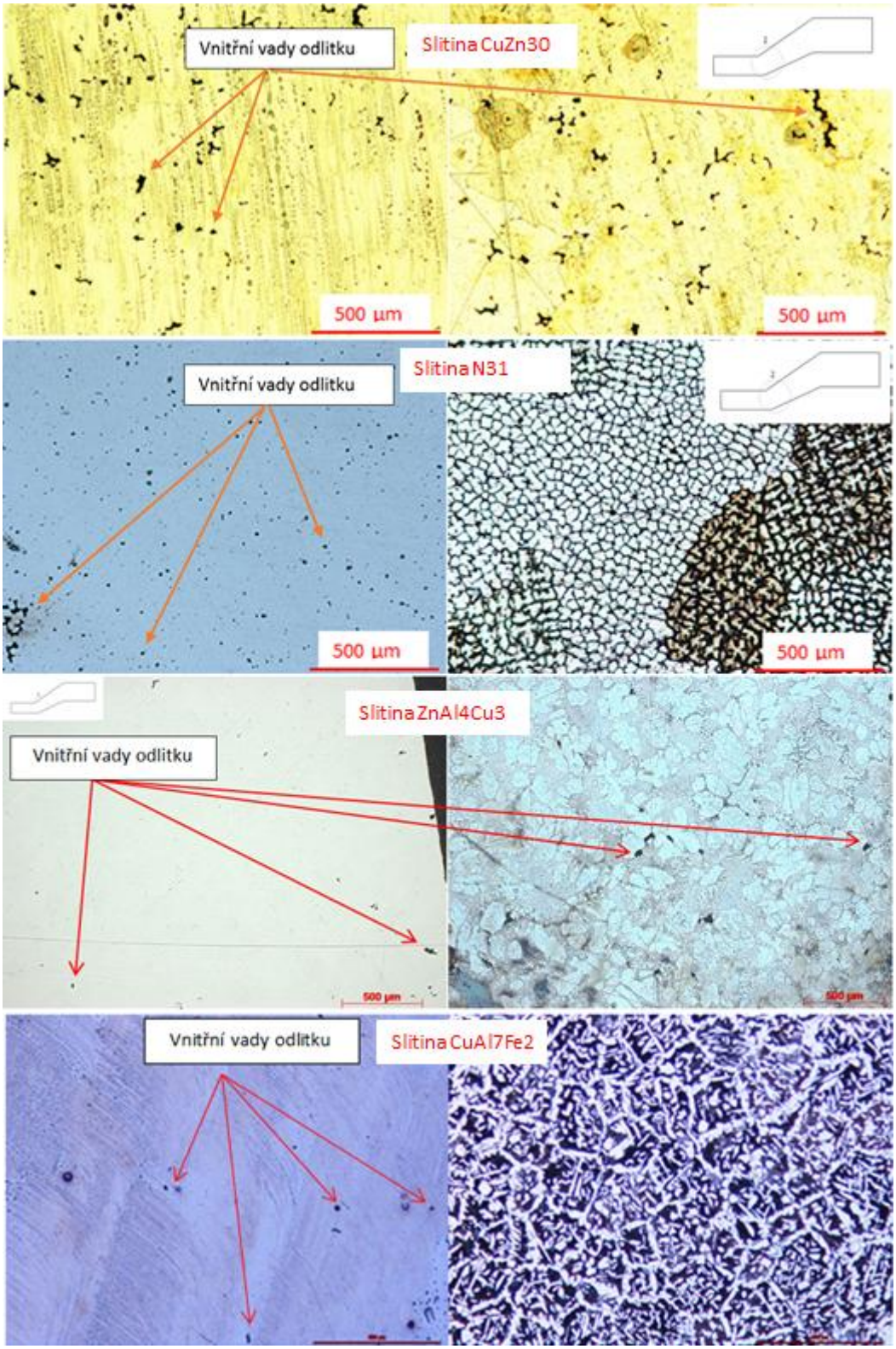
Obrázek 104:Porovnání RTG snímků slitin N31 se slitinou AlSi9Cu3, navrženou pomocí simulačního výpočtu[vlastní zdroje]

Z porovnání RTG snímků vyplívá, že slitiny dodané společností AMATI DEMAK s.r.o. obsahují jasně zřetelnou vnitřní poréznost oproti slitinám, které byly navrženy pomocí simulačního výpočtu procesu odlévání. Místa jejího výskytu jsou na jednotlivých snímcích vyznačena červenou šipkou. Ostatní tmavá místa jsou způsobena geometrií odlitku, kdy tenké plochy se zobrazí tmavě, zatímco objemnější části se zobrazují jako světlejší.

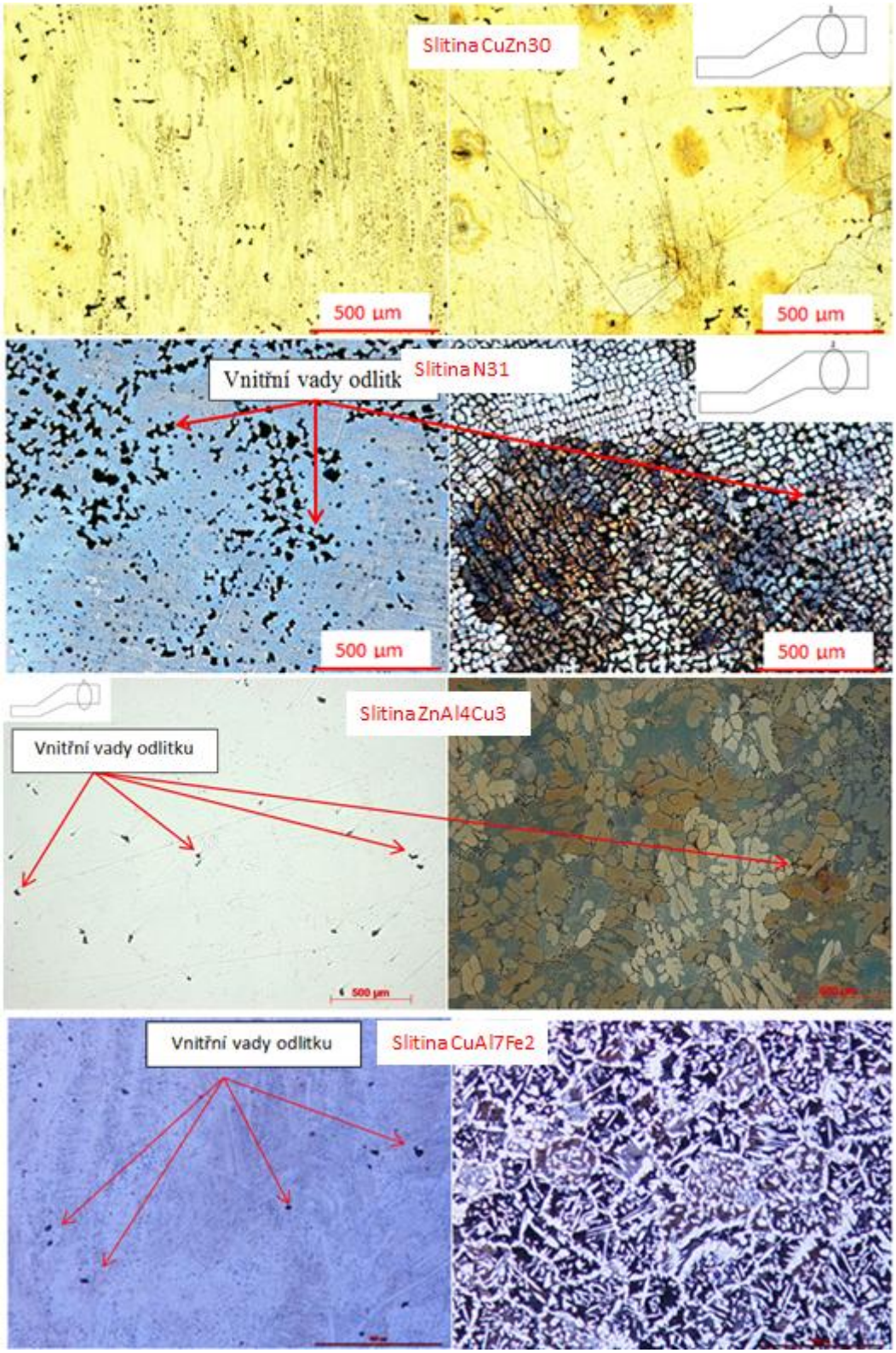
Metalografie, porovnání slitin dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o., se slitinami odlitými na základě simulačního výpočtu procesu odlévání



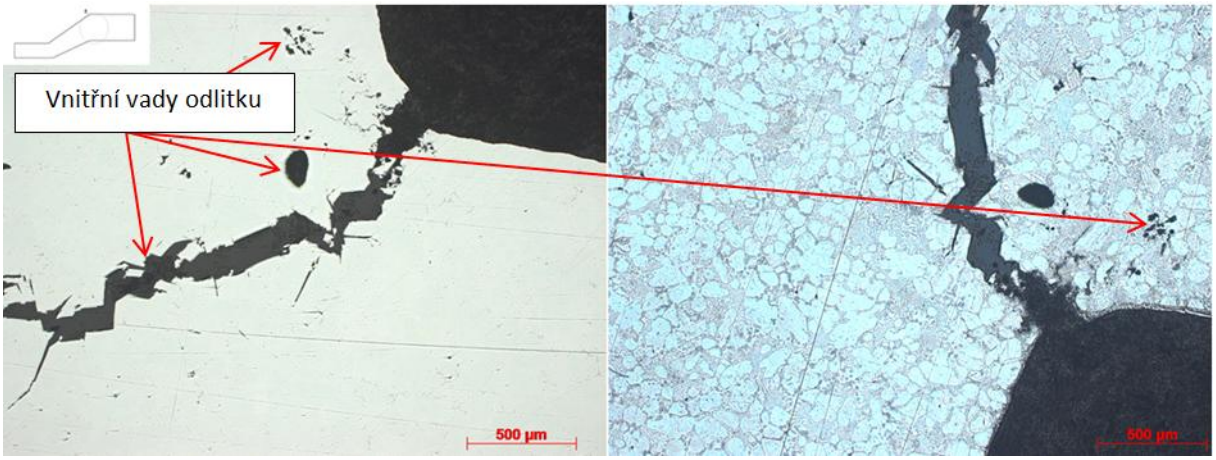
Obrázek 105: Metalografie: porovnání dodaných slitinCuZn30, N31, se slitinami navrženými ZnAl4Cu3 a CuAl7Fe2[vlastní zdroje]



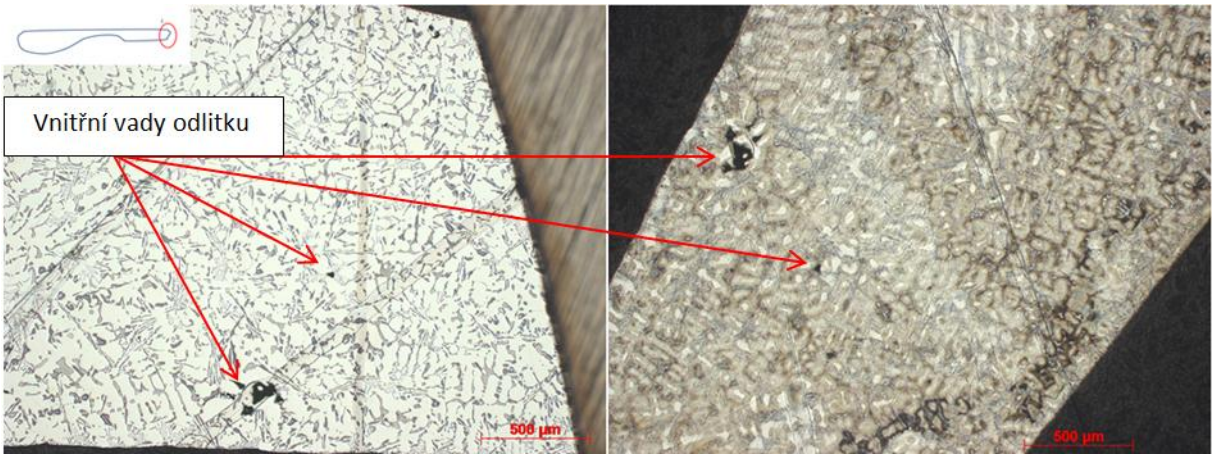
Obrázek 106:: Metalografie: porovnání dodaných slitinCuZn30, N31, se slitinami navrženými ZnAl4Cu3 a CuAl7Fe2[vlastní zdroje]



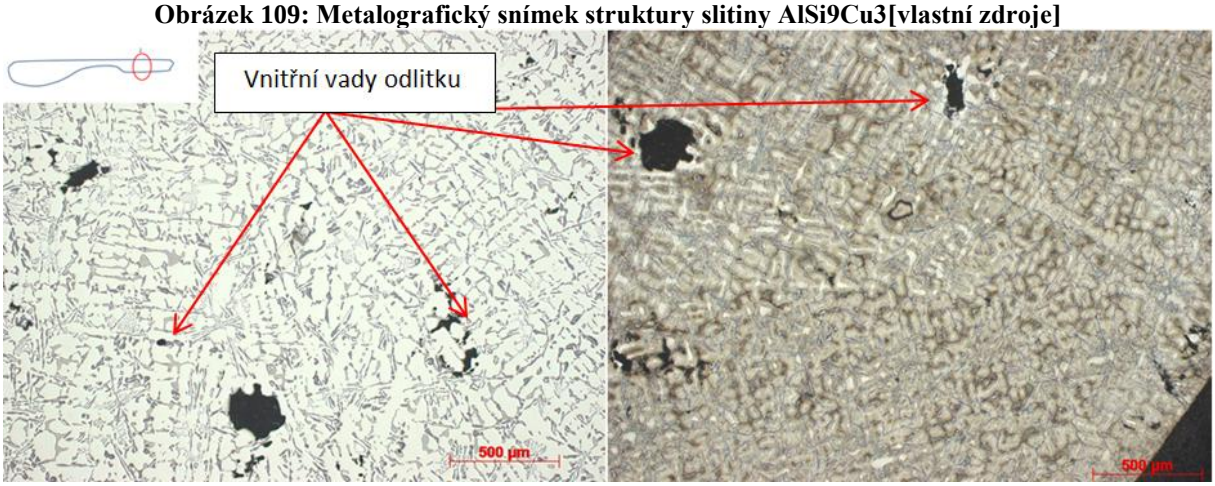
Obrázek 107:: Metalografie: porovnání dodaných slitinCuZn30, N31, se slitinami navrženými ZnAl4Cu3 a CuAl7Fe2[vlastní zdroje]



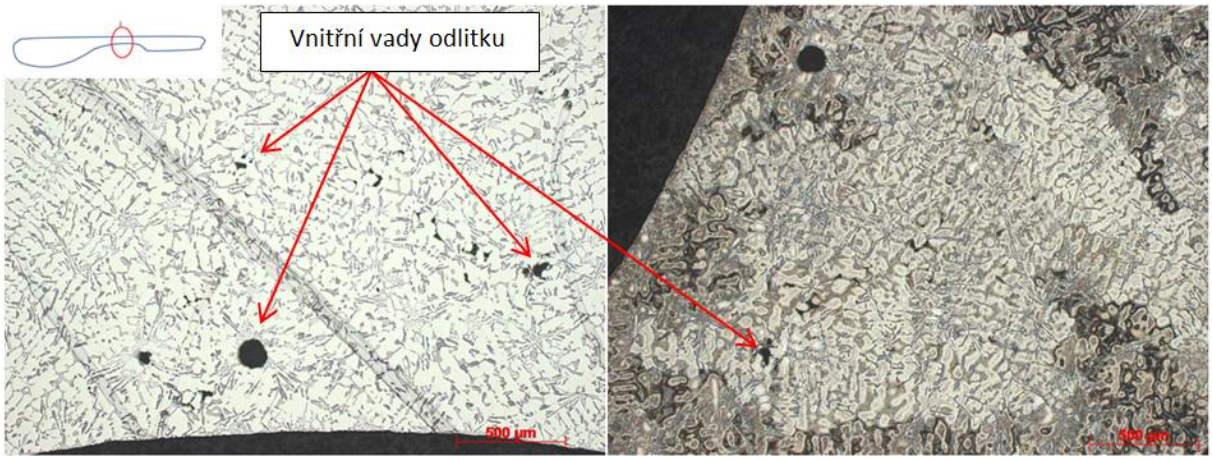
Obrázek 108: Trhlina zaznamenaná u slitiny typu ZnAl4Cu3[vlastní zdroje]



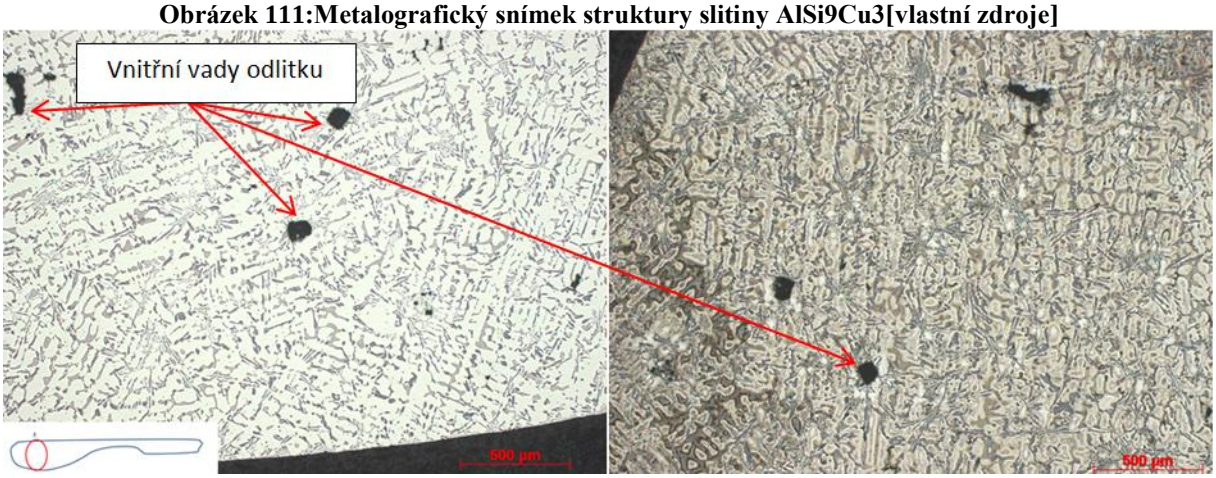
Obrázek 109: Metalografický snímek struktury slitiny AlSi9Cu3[vlastní zdroje]



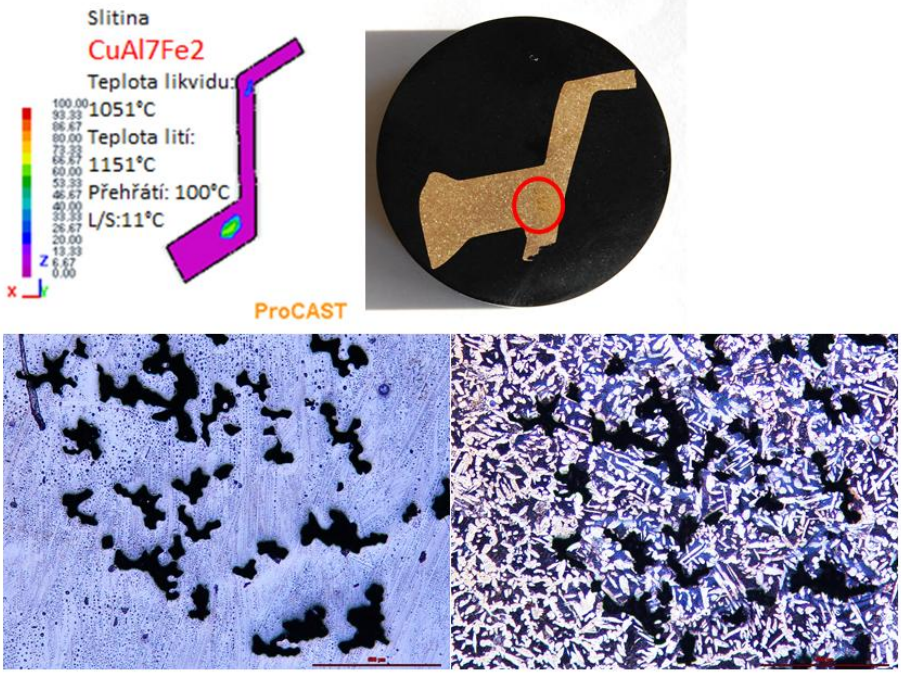
Obrázek 110:Metalografický snímek struktury slitiny AlSi9Cu3[vlastní zdroje]



Obrázek 111:Metalografický snímek struktury slitiny AlSi9Cu3[vlastní zdroje]



Obrázek 112:Metalografický snímek struktury slitiny AlSi9Cu3[vlastní zdroje]



Obrázek 113: Porovnání výsledku simulačního výpočtu u slitiny CuAl7Fe2, s odlitkem z téže slitiny. 4erveným kroužkem je označeno místo okem viditelné poréznosti vystupující na povrch odlitku, což odpovídá simulačnímu výpočtu procesu odlévání [vlastní zdroje]

Závěr z porovnání metalografických snímků

Z výše uvedených metalografických porovnání navrhovaných slitin s dodanými plyne, že slitiny navržené simulačním výpočtem vykazují nižší poréznost oproti slitinám, které dodala společnost AMATI DEMAK s.r.o.

Mikrotvrdost

Tabulka 13: Naměřená mikrotvrdost u navrhované slitiny typu CuAl7Fe2, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	231	254	223	221	231	-
Průměrná mikrotvrdost:	232	Směrodatná odchylka:	8,8			

Mikrotvrdost

Tabulka 14:Naměřená mikrotvrdost u navrhované slitiny typu ZnAl4Cu3, doplněná o průměrnou mikrotvrdost a směrodatnou odchylku (chybu) měření[vlastní zdroje]

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6
Naměřená mikrotvrdost HV 0.05:	128	134	141	124	140	-
Průměrná mikrotvrdost:	133,4	Směrodatná odchylka:	5,92			

Mikrotvrdost byla měřena napříč jednotlivými vzorky, přičemž se její hodnoty vzájemně příliš neliší, z toho lze usuzovat na jednotné mechanické vlastnosti zkoumaných vzorků. Porovnáním naměřené mikrotvrdosti s dříve uvedenými hodnotami a s hodnotami uvedenými v normativech jednotlivých slitin plyne, že tyto slitiny mají přibližně stejné nebo lepší mechanické vlastnosti než skupina vzorků dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o.

Závěr

Tato část přílohy diplomové práce se zabývá hodnocením struktury odlitků vyrobených na základě výsledků simulačního výpočtu a porovnává je s výsledky expertíz, které byly provedeny u vzorků dodaných společností AMATI DEMAK s.r.o. Při metalografickém hodnocení struktury byly u jednotlivých vzorků pozorovány řediny, které vznikají díky špatné dosazovací schopnosti kovu. Měřením mikrotvrdosti u jednotlivých vzorků bylo potvrzeno, že nevykazují změny v mechanických vlastnostech napříč jednotlivými vzorky

Seznam vzorků a provedených expertíz

Tabulka 15: Seznam odebraných vzorků a provedených expertíz

Poř. Číslo:	Typ vzorku:	expertíza:	poč. odebraných vzorků:
1	Klapka KLG 512- voskový model	tvorba modelu pomocí 3D scanneru	1
2	Klapka KLG 597	tvorba modelu pomocí 3D scanneru	1
3	Klapka KLG 55	tvorba modelu pomocí 3D scanneru	1
4	Klapka KL 119 98	tvorba modelu pomocí 3D scanneru	1
5	Stromeček slitina CuNi12Zn23	metalografie, RTG, chemie, mikrotvrdost	3, 3, 3, 3
6	Klapka KL 119 98 slitina N31	metalografie, RTG, chemie, mikrotvrdost	1, 1,1 ,1
7	Klapka KL 119 98 slitina CuZn30	metalografie, RTG, chemie, mikrotvrdost	1, 1 ,1, 1
8	klapka KL 119 98 slitina ZnAl4Cu3	metalografie, RTG, mikrotvrdost	1, 1, 1
9	Klapka KLG 512 slitina AlSi9Cu3	metalografie, RTG	1, 1
10	Klapka KL 119 98 slitina CuAl7Fe2	metalografie, RTG, mikrotvrdost	1, 1, 1