

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**NÍZKOTLAKÉ LITÍ KOBALTOVÝCH SLITIN DO SKOŘEPIN VYROBENÝCH
TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU**

I. Personal and study details

Student's name: **Bartoš Jan** Personal ID number: **501390**
Faculty / Institute: **Faculty of Mechanical Engineering**
Department / Institute: **Department of Manufacturing Technology**
Study program: **Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering**
Branch of study: **No Special Fields of Study**

II. Bachelor's thesis details

Bachelor's thesis title in English:

Low pressure casting technology to shells made by investment casting technology

Bachelor's thesis title in Czech:

Nízkotlaké lití kobaltových slitin do sko epin vyrobených technologií vytavitelného modelu

Guidelines:

Bibliography / sources:

Jagan Nath: Aluminium Castings Engineering Guide, ASM International, 2018, ISBN 9781627082051
Wang, Jun., Shu, Da., Sun, Baode. Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines. N mecko: Springer Nature Singapore, 2021., ISBN 9789813362208

Name and workplace of bachelor's thesis supervisor:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. Department of Manufacturing Technology FME

Name and workplace of second bachelor's thesis supervisor or consultant:

Date of bachelor's thesis assignment: **26.04.2023** Deadline for bachelor thesis submission: **11.08.2023**

Assignment valid until: **31.12.2023**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Supervisor's signature

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Head of department's signature

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
Dean's signature

III. Assignment receipt

The student acknowledges that the bachelor's thesis is an individual work. The student must produce his thesis without the assistance of others, with the exception of provided consultations. Within the bachelor's thesis, the author must state the names of consultants and include a list of references.

Date of assignment receipt

Student's signature

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Hermana Ph.D. a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Jan Bartoš

Poděkování

Úvodem bych rád vyjádřil svůj vděk především vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Alešovi Hermanovi Ph.D. za vedení, odborné konzultace, podnětné připomínky při jejím vypracování a za znalosti, které jsem během tvorby této práce mohl získat. Dále patří dík pracovníkům firmy IEG s.r.o. za to, že umožnili poznat novou technologii všem, co se na projektu podíleli.



Anotace

Autor:	Jan Bartoš
Název:	Nízkotlaké lití kobaltových slitin do skořepin vyrobených technologií vytavitelného modelu
Rozsah práce:	68 stránek, 58 obrázků, 8 tabulek, 7 příloh
Školní rok vyhotovení:	2023
Škola:	ČVUT, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí BP:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Klíčová slova:	Lití na vytavitelný model, nízkotlaké lití, kobaltové slitiny
Anotace:	Tato práce má za úkol porovnat gravitační a nízkotlaké odlévání kobaltových slitin do skořepin. Rešerše této práce mapuje obě technologie z hlediska vývoje, současných trendů a popisu jednotlivých kroků procesu. Experimentální část se zabývá chemickým složením a mikrostrukturou kobaltové slitiny. Byla provedena simulace gravitačního a nízkotlakého lití. Dále odlité vzorky byly podrobeny zkoušce rázem v ohybu a tahové zkoušce. Závěrem jsou porovnány technologie pomocí výsledků z experimentální části.



Annotation

Autor:	Jan Bartoš
Title:	Low-pressure casting of cobalt alloys into shells made by investment casting technology
Extent:	68 pages, 58 figures, 8 tables, 7 attachments
Academic year:	2023
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133- Department of Manufacturing Technology
Supervisor:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Key words:	Precision casting, low-pressure casting, cobalt alloys
Annotation:	<p>The aim of this work is to compare gravity and low-pressure casting of cobalt alloys into shells. The review of this work maps both technologies in terms of development, current trends and description of the individual process steps. The experimental part deals with the chemical composition and microstructure of the cobalt alloy. Simulations of gravity and low-pressure casting have been carried out. Furthermore, the cast samples were subjected to bending impact and tensile tests. Finally, the technologies are compared using the results from the experimental section.</p>



Obsah

1	Úvod a cíl práce	8
2	Lití na vytavitelný model	9
2.1	Historie technologie.....	10
2.2	Současné světové trendy	12
2.3	Popis jednotlivých fází technologie.....	14
2.3.1	Výroba voskového modelu.....	15
2.3.2	Výroba skořepinových forem.....	17
2.3.3	Vypalování a žhání.....	19
2.3.4	Odlévání.....	20
2.3.5	Dokončující operace	21
3	Nízkotlaké lití	22
3.1	Historie technologie.....	23
3.2	Současné světové trendy	23
3.3	Popis jednotlivých kroků procesu.....	24
3.4	Výhody a nevýhody nízkotlakého lití	25
3.5	Faktory ovlivňující proces nízkotlakého lití.....	26
4	Experimentální část.....	27
4.1	Kobaltová slitina.....	27
4.1.1	Chemické složení.....	27
4.1.2	Vnitřní struktura	28
4.1.3	Tvrдость kobaltové slitiny	34
4.2	Nízkotlaký lící stroj	37
4.3	Simulace lití.....	40
4.3.1	Plnění skořepin	46
4.4	Termografie	47



4.5	Tahová zkouška	50
4.6	Zkouška rázem v ohybu	57
5	Závěr	60
	Seznam použité literatury	61
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam tabulek	67
	Seznam příloh.....	69



1 Úvod a cíl práce

Nízkotlaké lití kovů do skořepin je sofistikovaný proces, který umožňuje vytváření komplexních tvarů s vysokou přesností a kvalitou povrchu. Existuje mnoho technik, jak z polotovaru vytvořit finální odlitek a jednou z nich je právě technologie nízkotlakého lití do skořepin.

Současné trendy ve slévárenství se značně věnují zvýšení mechanických vlastností odlitků a jejich spolehlivosti při eliminaci vměstků. Jedná se zejména o oxidické vměstky, které vznikají z důvodu tzv. reoxidačních jevů během procesu odlévání.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na výzkum stroje pro nízkotlaké lití pro speciální slitiny (tzn. slitiny s výrazně vyšší teplotou tavení, než mají slitiny hliníku, kde se tato technologie standardně užívá). Součástí této bakalářské práce je předmětová a reálná studie malého laboratorního nízkotlakého stroje, na kterém bude realizován výzkum technologických podmínek a parametrů pro kobaltové slitiny s cílem dosažení vysoké integrity odlitků (tzn. výrazně vyšší parametry mechanických vlastností díky vyšší čistotě kovu).

První část obsahuje rešerši technologie lití na vytavitelný model. Je zde zmíněna historie technologie, současné světové trendy za účelem zdokonalení procesu a popis jednotlivých fází technologie. Dále se první část zabývá nízkotlakým litím do skořepin. Je zmíněna historie technologie, současné světové trendy, popis jednotlivých kroků procesu, výhody a nevýhody technologie a v poslední řadě faktory ovlivňující proces nízkotlakého lití.

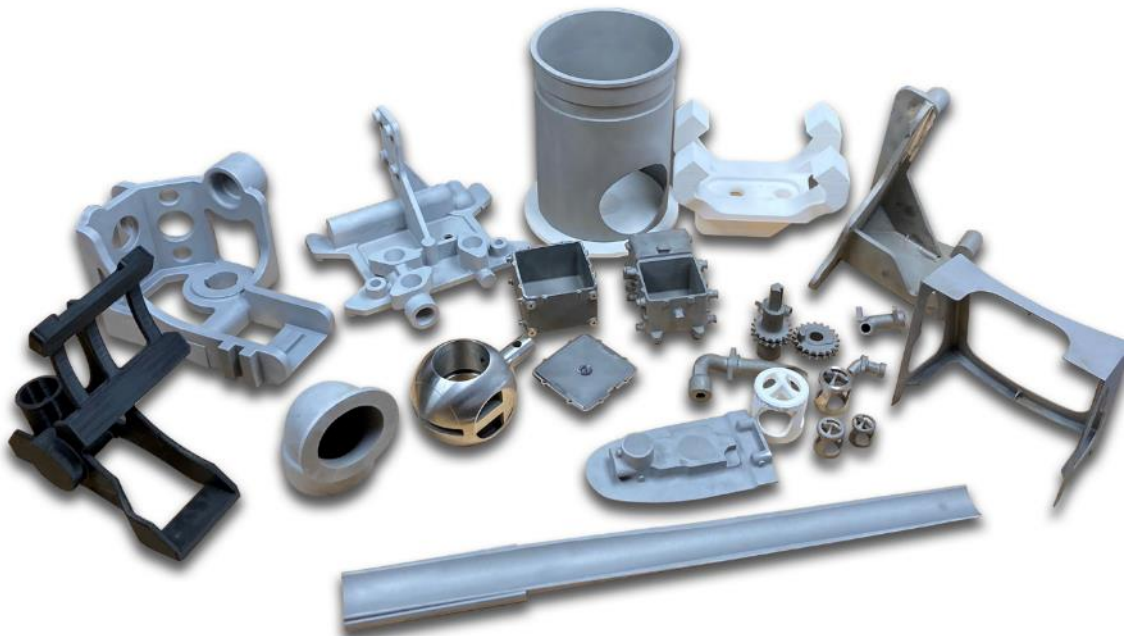
Druhá část se zabývá výzkumem zkoumané kobaltové slitiny. V této části dochází k porovnání a vyhodnocení výsledků, které zodpovídají otázku, zda při gravitačním nebo nízkotlakým litím do skořepin dosáhneme lepších vlastností.

2 Lití na vytavitelný model

Lití na vytavitelný model, známé také jako precision casting nebo investment casting, je pokročilá technika výroby, která se používá pro výrobu složitých tvarů s vysokou přesností a hladkým povrchem [1]. Tato metoda je široce používána v různých průmyslových odvětvích jako je letecký, automobilový, energetický a zdravotnický sektor [2].

Lití na vytavitelný model spočívá ve vytvoření modelu z vytavitelného materiálu, který se následně obalí materiálem pro formu. Po vytvoření formy se model zničí (vytaví nebo spálí), čímž vznikne dutina ve tvaru původního modelu. Do dutiny se poté nalije roztavený materiál, který po ztuhnutí vytvoří odlitek ve tvaru původního modelu [3].

Tuto metodu lze využít k výrobě velmi složitých součástí, které jsou z hlediska konstrukčních důvodů opatřeny nejrůznějšími prvky jako jsou například žebra, výztuhy, odlehčující prvky, negativní úkosy, které by jinými technologiemi byly těžko nebo dokonce nemožné vyrobit.



Obr. 1 Součásti vyrobené metodou přesného lití na vytavitelný model, převzato z lit. [3]

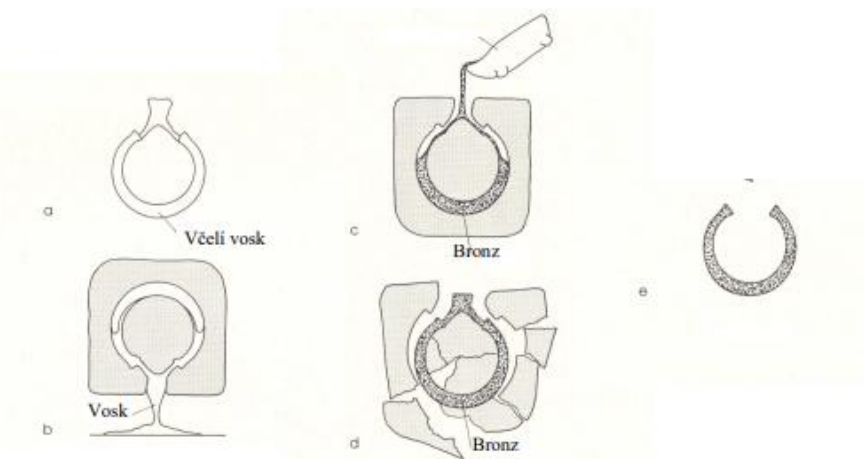
Lití na vytavitelný model nabízí oproti jiným technikám lití několik výhod:

- Vysoká přesnost a důraz na detail: Tato metoda umožňuje vytvoření složitých tvarů s těsnými tolerancemi a vysokou povrchovou kvalitou.
- Flexibilita materiálů: Lití na vytavitelný model je vhodné pro širokou škálu materiálů, včetně slitin na bázi železa, niklu, kobaltu, hliníku a dalších kovů [4].
- Snížení nákladů na zpracování: Díky vysoké přesnosti a kvalitě povrchu odlitků je často potřeba méně dodatečného zpracování, což snižuje náklady na výrobu.
- Je možné vyrábět odlitky velmi blízké hotovým výrobkům „téměř na hotovo“ („near net shape“). Důsledkem toho je minimalizace následných operací.

2.1 Historie technologie

Lití na vytavitelný model je jedna z nejstarších technik výroby kovových předmětů. Jeho počátky sahají do starověkých civilizací, kde byla tato metoda používána k vytváření uměleckých i praktických předmětů. Model se vyráběl ze včelího vosku a skořepina byla z vhodné hlíny. [5]

První důkazy o použití lití na vytavitelný model pocházejí z období kolem 3 700 př. n. l. z Mezopotámie. Tato technika se později rozšířila do starověkého Egypta, kde byla používána k vytváření zlatých šperků a amuletů [8]. Podobně tomu bylo i ve starověké Číně a Indii, kde ji využívali pro výrobu bronzových soch, zbraní a nástrojů [5].



Obr. 2 Postup zhotovení bronzového náramku, převzato z lit. [6]

Během středověku a renesance byla metoda lití na vytavitelný model v Evropě používána k vytváření náboženských soch, zvonů a dalších uměleckých děl. Tuto techniku využívali i významní umělci jako například Donatello a Cellini. [7]

S nástupem průmyslové revoluce se lití na vytavitelný model začalo více užívat pro výrobu průmyslových součástí, jako jsou ventily, čerpadla a turbíny [11].

V 19. a 20. století byly vyvinuty nové materiály a technologie, které umožnily zlepšení kvality a přesnosti odlitků [8].



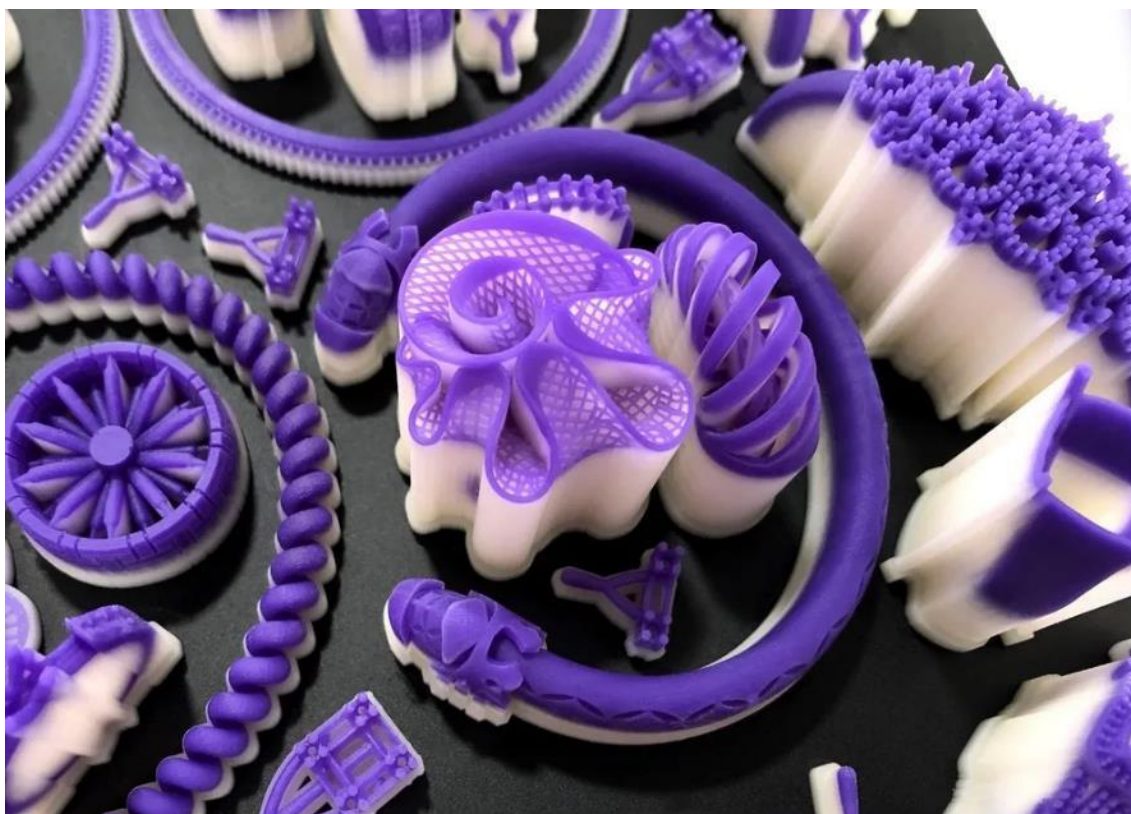
Obr. 3 Bronzová socha Persea s hlavou medúzy (Cellini-1540), převzato z lit. [35]

2.2 Současné světové trendy

V současné době se technologie lití na vytavitelný model neustále vyvíjí a zlepšuje, aby vyhověla rostoucím požadavkům průmyslu a trhu. Některé z nejnovějších trendů v této oblasti zahrnují:

3D tisk

3D tisk se stává stále populárnější pro vytváření vytavitelných modelů pro lití na vytavitelný model. Použití 3D tisku umožňuje rychlejší a přesnější vytváření složitých tvarů a snižuje náklady na výrobu modelů. Navíc se díky 3D tisku otevírají nové možnosti pro výrobu součástí s interními strukturami a komplexními geometriemi [9]. Tisková hlava nanáší v celé tiskové ploše tiskový materiál a současně i podpůrný materiál na bázi vosku [10]. Tato technologie se hlavně využívá při prototypování.



Obr. 4 3D tisk pružných materiálů, převzato z lit. [11]

Automatizace a robotizace

Automatizace a robotizace jsou stále více integrovány do procesů lití na vytavitelný model, což zlepšuje efektivitu a snižuje náklady na výrobu. Robotické systémy mohou být použity pro automatizaci úkolů jako je vytváření modelů, obalování modelů a ořezávání odlitků.

Inovace ve vytavitelných materiálech

Výzkum a vývoj nových vytavitelných materiálů umožňuje výrobu modelů s lepšími vlastnostmi, jako je snížená smrštitivost, lepší pevnost a vyšší teplotní odolnost. Tyto inovace mohou vést ke zlepšení kvality a přesnosti odlitků.

Pokroky v materiálech pro formy

Vývoj nových materiálů pro formy, jako jsou keramické materiály s vylepšenou teplotní odolností a pevností, umožňuje vytváření odlitků s lepšími vlastnostmi a sníženým rizikem vad [12]. Uplatňuje se čím dál více 3D tisk těchto materiálů.



Obr. 5 3D tisk keramických materiálů, převzato z lit. [13]

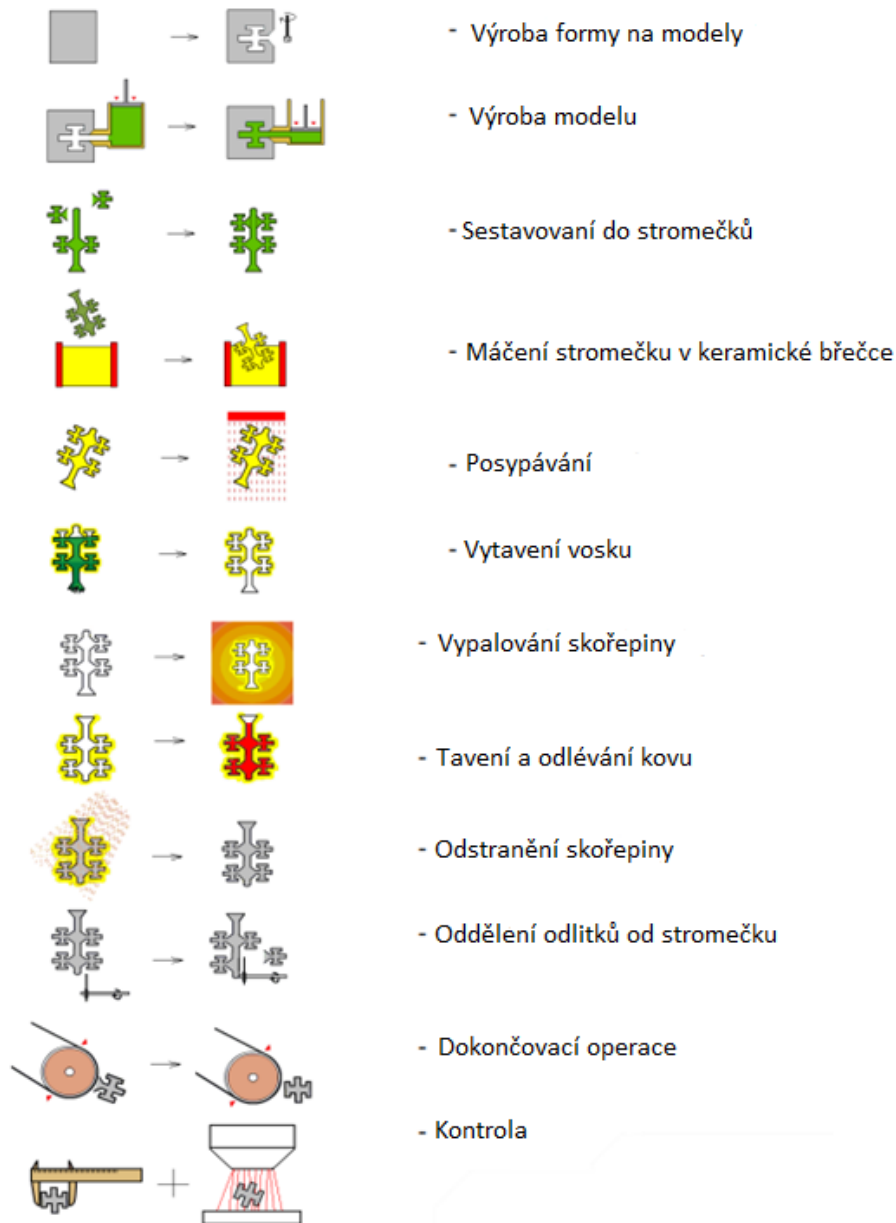
Navíc se zkoumají nové metody pro zlepšení povrchové úpravy odlitků jako například povlakování formy tenkými vrstvami [12].

Environmentální udržitelnost

Vzhledem k rostoucímu důrazu na environmentální udržitelnost se v oblasti lití na vytavitelný model hledají způsoby, jak snížit dopad na životní prostředí. Tento trend zahrnuje vývoj ekologičtějších materiálů pro modely a formy, snižování emisí a recyklaci materiálů [14].

2.3 Popis jednotlivých fází technologie

Tato technologie se vyznačuje použitím vytavitelných modelů, které se tvoří ve tvaru požadovaného odlitku a poté se obalí formovací hmotou. Během procesu se model vytaví a nahradí se roztaveným kovem, který ztuhne a vytvoří finální odlitek. Tento proces se skládá z několika klíčových fází, které jsou vyznačeny na Obr.6, které jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 6 Jednotlivé fáze lití na vytavitelný model, převzato z lit. [15]

2.3.1 Výroba voskového modelu

Klíčovou součástí technologie lití na vytavitelný model je vytvoření voskového modelu. Zde je vyžadována přesnost a pečlivost zpracování, jelikož kvalita voskového modelu určuje kvalitu finálního odlitku.

Existuje několik metod pro výrobu voskového modelu, mezi které patří:

Ruční modelování

Ruční modelování zahrnuje tvarování vosku do požadovaného tvaru pomocí rukou a nástrojů. Tato metoda je časově náročná a vyžaduje značné dovednosti a zkušenosti. Vosk se při ní přehřívá, aby měl správnou konzistenci a teplotu, což následně umožňuje snazší tvarovatelnost [16].

Vstřikování vosku

Tato metoda zahrnuje vstřikování roztaveného vosku do formy, která má tvar požadovaného modelu. Po ztuhnutí vosku se forma otevře a voskový model se vyjme. Vstřikování vosku je rychlejší a přesnější než ruční modelování a umožňuje vytváření složitých tvarů a detailů. Následuje podrobnější popis procesu voskového vstřikování:

- **Příprava formy**

Před zahájením procesu vstřikování vosku je třeba připravit formu, která bude použita pro vytvoření voskového modelu. Forma může být vyrobena z různých materiálů, jako je hliník, ocel nebo silikon. Navržena by měla být tak, aby umožňovala snadné otevírání a vyjímání modelu. Forma se skládá ze dvou nebo více částí, které se složí před vstřikováním vosku [17].



Obr. 7 Forma na vstřikování vosku

1

¹ Neoznačené obrázky jsou vlastního zdroje autora

- Tavení vosku

Pro vstřikování je třeba roztavit vosk, který bude použit pro vytvoření modelu. Vosk se zahřeje na správnou teplotu, aby byl dostatečně tekutý pro vstřikování do formy. Teplota tavení závisí na typu použitého vosku a může se pohybovat od 60 °C do 100 °C [17].

- Vstřikování vosku

Roztavený vosk se vstřikuje do formy pomocí vstřikovacího zařízení, které může být manuální nebo automatické. Vstřikovací zařízení zahrnuje zásobník na roztavený vosk, čerpadlo nebo píst pro vstřikování vosku a trysku pro přívod vosku do formy. Vstřikování probíhá pod tlakem, který zajišťuje, že vosk vyplní všechny detaily a prostory ve formě [8].

- Ztuhnutí vosku a vyjmutí modelu

Po vstřikování vosku do formy se nechá ztuhnout a vychladnout. Doba ztuhnutí závisí na velikosti a složitosti modelu a teplotě vosku a formy. Jakmile je vosk ztuhlý, forma se otevře a voskový model se vyjme. Model může být následně očištěn od přebytečného vosku a případných vad.



Obr. 8 Karuselový vstřikovací stroj

- **Kontrola a úprava modelu**

Voskové modely vytvořené vstřikováním mohou mít drobné nedostatky, jako jsou švy z formy, povrchové nerovnosti nebo nepřesnosti v rozměrech. Tyto nedostatky lze ručně opravit. Po dokončení úprav se model může použít pro další fáze technologie lití na vytavitelný model jako je sestavení stromečku a vytvoření formy. [8].



Obr. 9 Voskový model

2.3.2 Výroba skořepinových forem

Skořepinové formy jsou vytvořeny obalením voskových modelů vrstvami keramického materiálu, který po zatuhnutí tvoří pevnou a odolnou formu s požadovanými vlastnostmi.

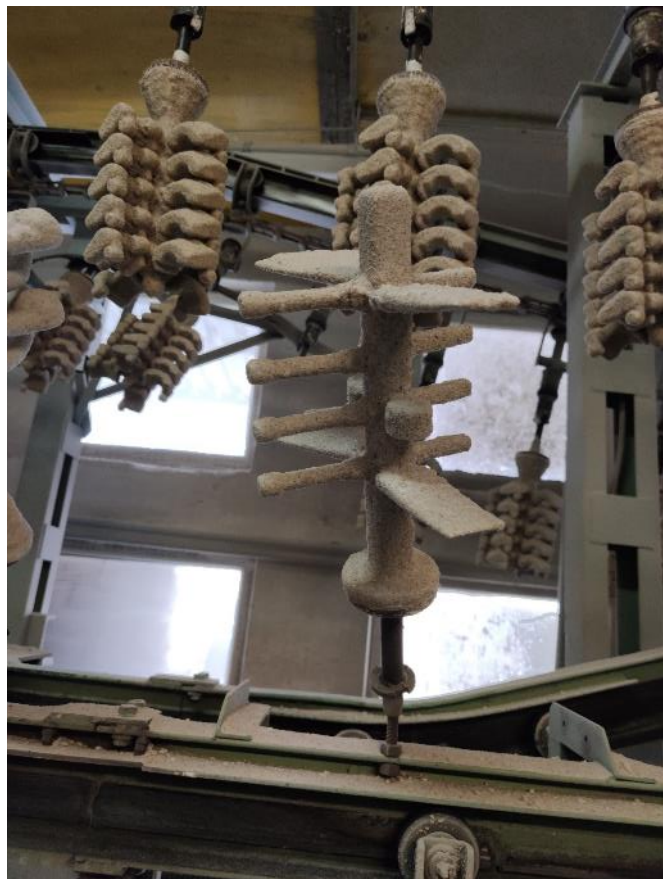
Před vytvořením skořepinové formy je třeba nejprve sestavit stromeček z voskových modelů. Stromeček se skládá z jednoho nebo více voskových modelů, které jsou připevněny k centrálnímu licímu kůlu. Sestavení stromečku umožňuje lití více kusů najednou a minimalizuje materiálové a energetické náklady.

Keramický materiál pro výrobu skořepinových forem se skládá z jemného keramického prášku (obvykle zirkonu nebo křemíkového písku) a pojiva. Materiál se smíchá s vodou (alkoholem), aby vytvořil hustou suspenzi, která se nazývá keramická břečka. První vrstva se nanáší na stromeček ručně nebo pomocí máčení. Tato vrstva by měla být co nejtenčí a měla by pokrýt celý povrch modelů a stromečku.

Po nanesení první vrstvy se stromeček nechá zaschnout, obvykle po dobu 1-2 hodin. Po zaschnutí první vrstvy se na stromeček nanáší další vrstvy břečky, které se střídají s vrstvami jemného prášku. Tyto vrstvy zajišťují pevnost a odolnost formy. Počet vrstev závisí na velikosti a složitosti modelů a může se pohybovat od třech a více. Mezi nanášením jednotlivých vrstev se stromeček nechá zaschnout. [4].



Obr. 11 Sestavení stromečku



Obr. 10 Výroba skořepinových forem



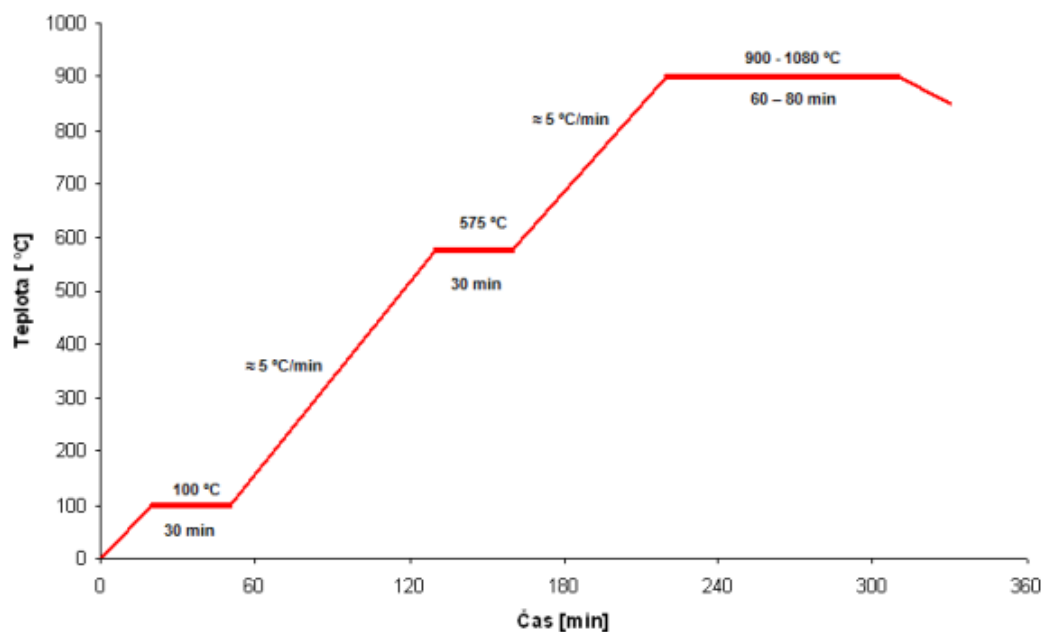
Obr. 12 Výrobní linka na nanášení keramické břechky

2.3.3 Vypalování a žíhání

Po vytavení vosku se skořepinové formy umístí do žíhací pece. Pec musí být schopna dosáhnout a udržet teploty v rozmezí 900-1200 °C, v závislosti na použitém keramickém materiálu a požadavcích na vlastnosti formy [8].

Teplota v peci se postupně zvyšuje na požadovanou žíhací teplotu. Rychlost zvyšování teploty by měla být pomalá (obvykle 50-100 °C za hodinu) a kontrolovaná, aby se zabránilo praskání nebo deformaci formy v důsledku teplotních napětí.

Po dosažení žíhací teploty se formy na této teplotě udržují po dobu několika hodin. Tento krok umožňuje dostatečný čas pro odstranění zbývajících vosku, vypálení organických složek z pojiva a zpevnění keramického materiálu.



Obr. 13 Příklad žhání, převzato z lit. [18]

2.3.4 Odlévání

Roztavený materiál se většinou lije do skořepin o teplotě v rozmezí 900-1000 °C ihned po vytažení z žhací pece. Tím se zmenší teplotní šok při lití, zamezí se vzniku vnitřních pnutí ve skořepinových formách a zmenší se nebezpečí prasknutí. Před litím je také možné vkládat do forem filtry [15].



Obr. 14 Skořepina těsně po odlití

2.3.5 Dokončující operace

Ztuhnutý odlitý stromeček se nejčastěji očišťuje od keramické formy úderem do vtokového systému, vibracemi nebo pískováním. Jednotlivé modely se ze stromečku odřezávají a plochu je třeba obrousit, nebo obrobit dle přání zákazníka.



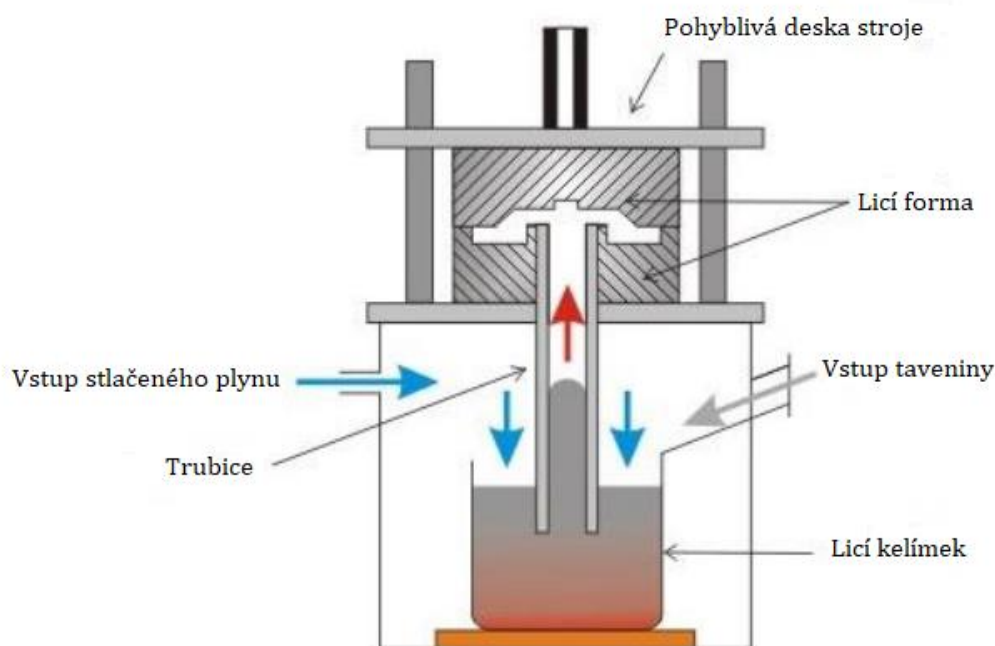
Obr. 15 Stroj odstraňující skořepiny vibracemi

3 Nízkotlaké lití

Technologie nízkotlakého lití funguje na principu přivádění taveniny do dutiny formy pomocí tlaku plynu. Konstrukce licího stroje je oproti vysokotlakému lití odlišná [19], [20].

Před naplněním formy se tavenina nachází v kelímku umístěném pod licí formou v udržovací peci. Skrze trubici je tavenina za pomoci tlaku plynu přiváděna do dutiny formy. Tlak plynu musí být volen tak, aby nedocházelo k deformacím jako u gravitačního lití a aby zajišťoval plynulé vyplnění formy. Tlak plynu působí na taveninu ve formě po celou dobu licího cyklu až do úplného zatuhnutí. Hodnota tohoto tlaku se pohybuje přibližně v rozmezí 0,02 až 0,04 MPa, přičemž se mění v závislosti na hustotě taveniny [19], [20].

Dnes je metoda využívána především pro odlitky ze slitin hliníku a hořčíku. Z hlediska výrobních nákladů je technologie nízkotlakého lití výrazně výhodnější než technologie gravitačního lití a umožňuje lepší využití materiálu. Nízkotlaké lití je vhodné zejména pro výrobu malých a středních sérií odlitků z neželezných kovů, které mají osovou symetrii [19], [20].



Obr. 16 Nízkotlaké lití, převzato z lit. [21]



3.1 Historie technologie

Průmyslová revoluce v 18. a 19. století přinesla značný pokrok v technikách tavení a lití kovů. Stoupající poptávka po vysoce kvalitních odlitcích vedla k vývoji modernějších a efektivnějších technik. Avšak, metoda nízkotlakového lití, jak ji známe dnes, nebyla ještě rozvinuta [22].

První patent na nízkotlakové lití byl udělen ve Spojených Státech v roce 1920. Jednalo se o metodu, která původně sloužila k výrobě hliníkových a hořčíkových součástek. Od té doby se technika rychle ujala zejména v automobilovém průmyslu, kde se hodila k výrobě dílů jako jsou bloky motorů, válce a kola [22].

Dnes je nízkotlakové lití základní technologií v mnoha průmyslových odvětvích. Neustále se vyvíjejí nové materiály a procesy, které dále posouvají hranice možností technologie. Díky široké škále aplikací a schopnosti generovat složité geometrie dílů s vysokou kvalitou povrchu se nízkotlakové lití stalo stěžejním procesem ve výrobních řetězcích.

3.2 Současné světové trendy

Tak jako všechny technologie se i nízkotlakové lití vyvíjí a pokračuje v inovacích. Současné trendy se zaměřují na zvyšování efektivity, snižování nákladů a zlepšování kvality výrobků.

Automatizace procesu

Automatizace je jedním z hlavních trendů v průmyslu a nízkotlakové lití není výjimkou. Moderní systémy využívají pokročilé ovládací panely a robotiku pro zautomatizované řízení tavení, napouštění formy a manipulaci s hotovými výrobky. Tento přístup zvyšuje efektivitu a minimalizuje lidské chyby [23].

Optimalizace parametrů

Důkladný výzkum parametrů nízkotlakového lití, jako je tlak, teplota nebo rychlost napouštění, umožňuje značné zlepšení kvality odlitků a minimalizaci vad. Společnosti stále více používají pokročilý simulační software pro testování a optimalizaci těchto parametrů [24].

Nové slitiny a materiály

Vývoj nových slitin otevírá možnosti pro nové aplikace a zlepšení vlastností odlitků. Například slitiny hliníku s jinými kovy se stávají stále populárnějšími pro jejich schopnost poskytnout lepší tepelnou vodivost, pevnost a odolnost proti korozi [25].



Ekologické trendy

Za zmínku stojí rostoucí důraz na trvale udržitelnou výrobu. Průmysl se zaměřuje na snížení energetické náročnosti procesu, recyklaci a minimalizaci odpadu, i na vývoj metod pro recyklaci odlitků.

3.3 Popis jednotlivých kroků procesu

Příprava forem

Nejprve je nutné připravit formy, do kterých bude tavenina litá. Formy jsou obvykle vyrobeny z vysoce legované oceli a mají dutiny, které odpovídají tvaru a rozměrům požadovaného výrobku. Formy jsou také vybaveny vstupy pro přívod taveniny [26].

Příprava taveniny

Kovový materiál, který bude sloužit jako tavenina, je připraven a zahřát na potřebnou teplotu v peci. Tavenina musí dosáhnout tekutého stavu a být připravena k převedení do forem.

Příprava kelímků:

Kelímky, které slouží jako zásobníky taveniny, jsou připraveny a umístěny pod formami. Tyto kelímky jsou obvykle vyrobeny z keramiky a jsou schopné odolávat vysokým teplotám.

Plnění forem

Při plnění forem se tavenina přivádí z kelímků do forem pomocí tlaku plynu. Tlak plynu vytváří pohyb taveniny. Ta postupně proudí trubicemi a vstupuje do dutiny formy, kde postupně vyplňuje požadovaný tvar.

Přetlaková doba

Po vyplnění formy taveninou je po určitou dobu udržován tlak plynu, který se nazývá dotlak. Tento tlak zajišťuje udržení taveniny ve formě a umožňuje její vyplnění bez deformací a dutin [26].

Vyjmutí hotových odlitků

Po úplném ztuhnutí a vytvrzení taveniny jsou formy otevřeny a hotové odlitky jsou vyjmuty. Ty jsou následně zbaveny přebytečného materiálu a podrobeny dalšímu zpracování, jako například broušení, leštění či jiná povrchová úprava.



3.4 Výhody a nevýhody nízkotlakého lití

Nízkotlaké lití nabízí spoustu výhod z hlediska kvality a přesnosti. Ale tak jako u každé technologie, i tato metoda má své výhody a nevýhody.

Mezi výhody patří:

- Vysoká kvalita odlitků

Nízkotlakové lití produkuje odlitky s malým množstvím vnitřních defektů, což vede k lepším mechanickým vlastnostem hotových výrobků [27].

- Vysoce přesné díly

Proces nízkotlakového lití umožňuje dosáhnout vysoké úrovně přesnosti a reprodukovatelnosti rozměru odlitků. Tato metoda je schopna produkovat díly s jemnými detaily a složitými tvarovými konfiguracemi [27].

- Nižší pracovní náklady

Proces může být také poměrně snadno automatizován, což snižuje pracovní náklady na jednotku produktu.

- Velká využitelnost materiálu

Nevýhody:

- Vysoké počáteční náklady

Náklady na výrobu stálých forem a náklady na zařízení na nízkotlakové lití mohou být poměrně vysoké, což může omezovat použití této technologie u menších objemů produkce [27].

- Nízká rychlost lití

Rychlost lití může být nižší než u jiných procesů jako je vysokotlakové lití, což může vést k nižší produktivitě.

- Omezení materiálu

Některé materiály nemohou být použity v nízkotlakovém lití kvůli jejich vlastnostem, jako je viskozita nebo teplota tavení.



3.5 Faktory ovlivňující proces nízkotlakého lití

Teplota taveniny

Správná teplota taveniny je nezbytná pro dosažení správné viskozity a proudění taveniny do forem. Teplota musí být řízena a udržována v přesných hodnotách v závislosti na použitém materiálu a konkrétních požadavcích lití.

Tlak plynu

Tlak plynu je klíčový pro správné naplnění forem taveninou. Tlak plynu je řízen tak, aby zajišťoval plynulé a dokonale vyplněné formy. Správné nastavení tlaku plynu závisí na konkrétním materiálu, jeho hustotě a geometrii výrobku [28].

Konstrukce a tvar forem

Správný design forem je nezbytný pro úspěšné nízkotlaké lití. Formy musí být navrženy tak, aby umožňovaly správné proudění taveniny a minimalizovaly riziko vzniku vad [28].

Materiál forem

Materiál použitý pro výrobu forem musí být dostatečně odolný vůči vysokým teplotám a tlakům. Zvolený materiál forem ovlivňuje jejich životnost, tepelnou stabilitu a schopnost udržet požadovaný tvar a přesnost výrobku [27].

Dotlak

Správně stanovený dotlak je důležitý pro dokončení vyplnění forem taveninou a minimalizaci vad. Přetlaková doba závisí na konkrétním materiálu, tlaku plynu a geometrii forem.

Chladicí systém:

Efektivní chlazení forem je nezbytné pro rychlé a rovnoměrné ztuhnutí taveniny. Správný chladicí systém, který zahrnuje vhodné umístění chladicích kanálů a správné chladicí médium, pomáhá minimalizovat vnitřní napětí v odlitcích a zajišťuje jejich kvalitu [29].

4 Experimentální část

4.1 Kobaltová slitina

Slitina S-816 je tepelně odolná. Má vysoké mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách a je rezistentní vůči oxidaci a korozi. Jednou z klíčových vlastností slitiny je schopnost reagovat na tepelné zpracování pro zvyšování pevnosti a tvrdosti [30]. Chemické složení slitiny lze vidět v Tab.1.

Slitina nalezne široké využití v průmyslových aplikacích, které vyžadují odolnost materiálů proti vysokým teplotám a dobrým mechanickým vlastnostem. Možné aplikace slitiny S-816 zahrnují komponenty pro plynové turbíny, kosmické aplikace a zařízení pro vysoké teploty. Díky svým vlastnostem se rozsáhle používá v situacích, kde se vyžaduje kombinace tepelné odolnosti, pevnosti a životnosti [30]. Vysoké teploty a agresivní podmínky mohou použití této slitiny omezit. To znamená, když jsou přítomny silné oxidační nebo koroze uvádějící prostředky, slitina se pro vysokoteplotní aplikace nedoporučuje [30].

Vzhledem k nadstandardním fyzikálním vlastnostem a schopnosti reakce na tepelné zpracování pro zvyšování pevnosti a tvrdosti je slitina S-816 jedním z neúčinnějších materiálů v průmyslových aplikacích, kde se vyžadují vysoké teploty a dobré mechanické vlastnosti [30].

4.1.1 Chemické složení

V rámci našeho experimentu bylo provedeno měření prvků ve slitině s využitím ručního spektrometru Delta professional s maximální chybou do 0,1 %.

Ruční spektrometr je přenosné zařízení, které umožňuje analyzovat spektrum světla, které prochází nebo je emitováno zkušebním vzorkem. Toto zařízení nám poskytuje podrobné informace o vlastnostech vzorku, jako je jeho chemické složení. Díky jeho přenosnosti a snadnému použití je ruční spektrometr ideální pro rychlou a efektivní analýzu vzorků v laboratoři nebo v terénu [31].



Obr. 17 Ruční analyzátor kovů s označením delta, převzato z lit. [31]



Tab. 1 Jednotlivé materiály ve slitině

Prvky	Požadavek [%]	Ingot-řez [%]	Tavba1 řez [%]	Tavba 1 povrch [%]	Tavba 4 řez [%]	Tavba 4 povrch [%]
Co	43-45	42.6	42.7	43.1	42.8	42.2
Ni	19-21	21.8	21.5	21.7	21.5	21.8
Mo	3.5-4.5	3.6	2.2	3.5	3.5	3.6
Nb	1.8-2.2	2.1	2	2.2	2.1	2.2
Cr	24-36	25.2	24.8	24.2	24.1	23.9
Fe	< 3	2.3	2.24	3.8	2.2	3.2
W	1.8-2.2	2.1	2.2	2.1	2.1	2
Mn	< 0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
Zr	-	-	-	0.3	-	0.9

Všechny zkoušky v následujících kapitolách se věnují téhle slitině. V Tab.1 je znázorněn poměr jednotlivých prvků obsažených ve slitině. Lze si povšimnout, že slitina je složena z Co, Ni a Cr z více než 90 %. Dále že se po první tavbě objevil na povrchu slitiny Zr. To je zapříčineno z důvodu, že skořepina byla posypávána zirkonovým práškem před litím. Cr má degradační trend na nabývajících tavbami, což by mohl dělat problém s opakovanou recyklací materiálu.

4.1.2 Vnitřní struktura

Vnitřní struktura slitiny, často označovaná jako mikrostruktura, je klíčová pro pochopení jejích fyzikálních a mechanických vlastností.

Příprava vzorku kovu pro mikroskopickou analýzu, často nazývanou metalografickou analýzou, zahrnuje několik kroků:

- Zařízení vzorku

Vzorek se obvykle zařízne na menší kus, aby se dal snadno manipulovat a umístit pod mikroskop. Toto zařízení by mělo být provedeno tak, aby se minimalizovalo poškození struktury kovu.



Obr. 18 Řezací stroj

- Broušení a leštění

Zaříznutý vzorek se poté obrousí a vyleští, aby se odstranily veškeré povrchové nerovnosti a získal se hladký povrch pro mikroskopickou analýzu. Tento krok se obvykle provádí v několika fázích. Začíná se hrubým broušením a postupuje se k jemnějšímu leštění. V našem případě se brousilo a leštilo na stroji Saphir 250 A2-ECO (viz Obr. 19).



Obr. 19 Saphir 250 A2-ECO

- Leptání

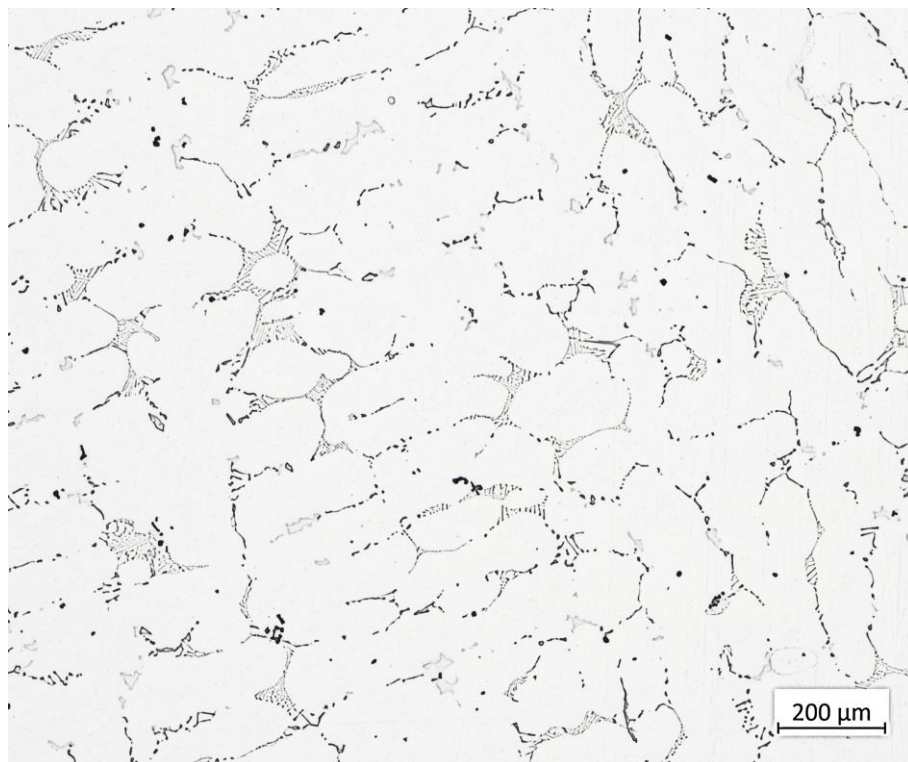
Po leštění se vzorek obvykle leptá, což je proces, při kterém se na vzorek aplikuje chemická látka, která reaguje s povrchem kovu a zvýrazňuje jeho mikrostrukturu. V našem konkrétním případě bylo pro proces leptání použito leptadlo, které bylo složeno z 50 % peroxidu vodíku a 50 % kyseliny chlorovodíkové. Toto řešení poskytlo efektivní prostředí pro leptání, které vyhovovalo specifikacím našeho projektu.

- Analýza

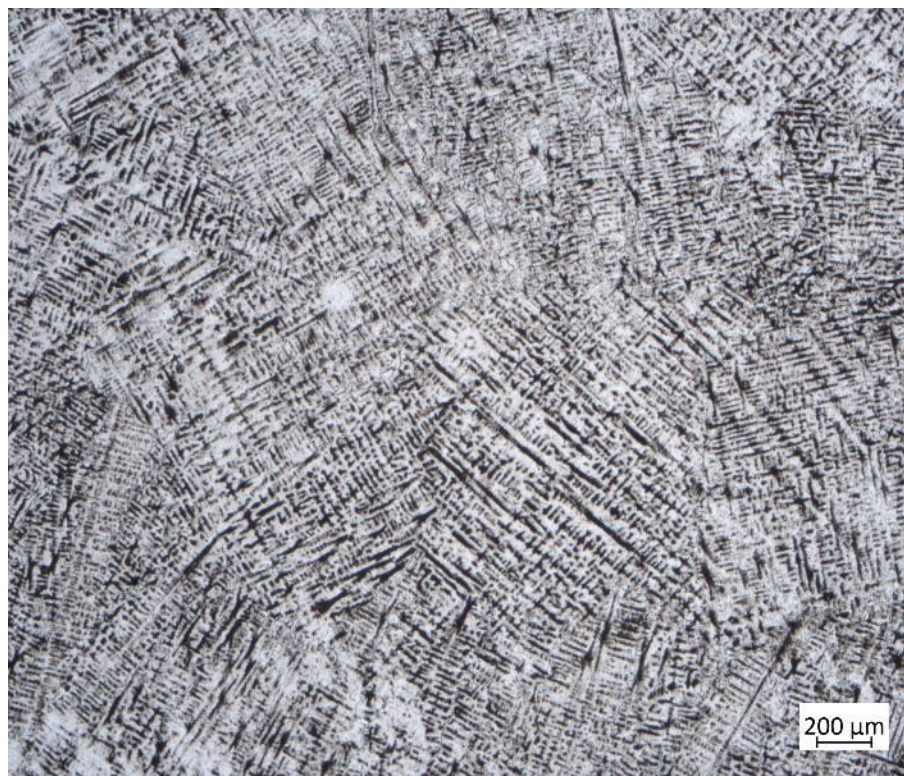
Po leptání je vzorek připraven k mikroskopické analýze. Vzorek se umístí pod mikroskop a zkoumá se jeho vnitřní struktura. Analýza byla provedena na dvou vzorcích. Jeden je slitina před odlitím a druhý je vzorek po odlití.



Obr. 20 Zkušební vzorky



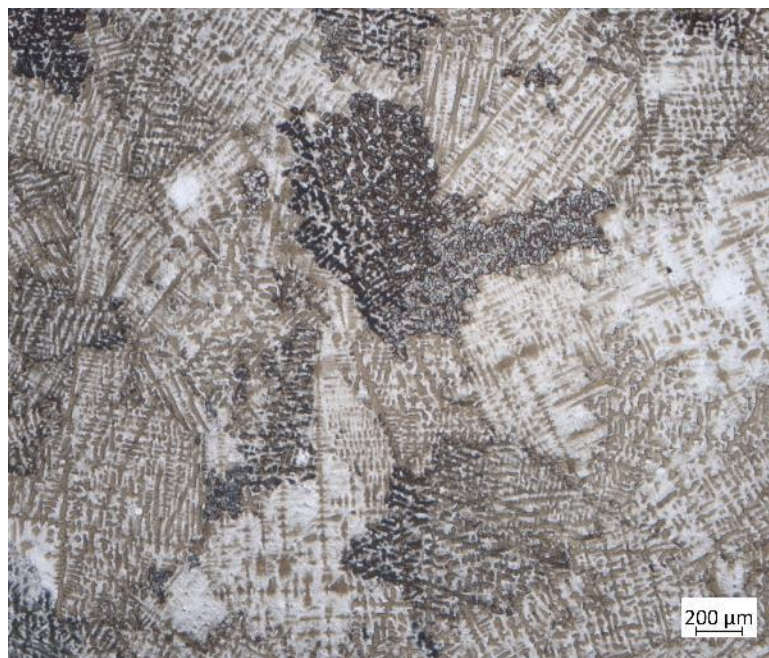
Obr. 21 Vnitřní struktura před odlitím (neleptáno)



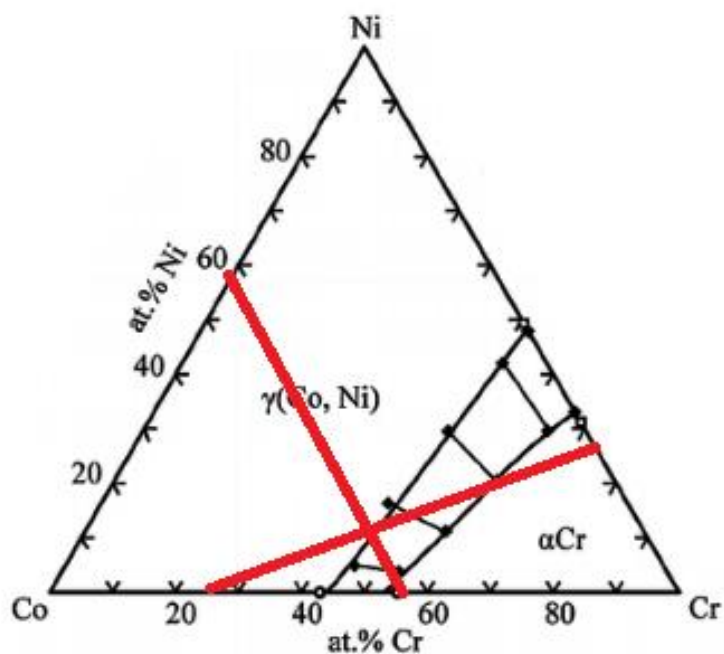
Obr. 22 Vnitřní struktura před odlitím (leptáno)



Obr. 23 Vnitřní struktura po odlití (neleptáno)



Obr. 24 Vnitřní struktura po odlití (leptáno)



Obr. 25 Termální diagram Co, Cr, Ni, převzato z lit. [32]

Z Obr. 25 je patrné, že ve slitině převažuje γ (gamma) fáze znázorněna tmavší plochou. Bílé plochy zastupují sloučeniny Cr, Co a Ni. Velikost zrn je ovlivněna způsobem lití. Ingot byl tvaru válce o průměru 80 mm a délce 200 mm, který tuhnul výrazně déle než odlitek

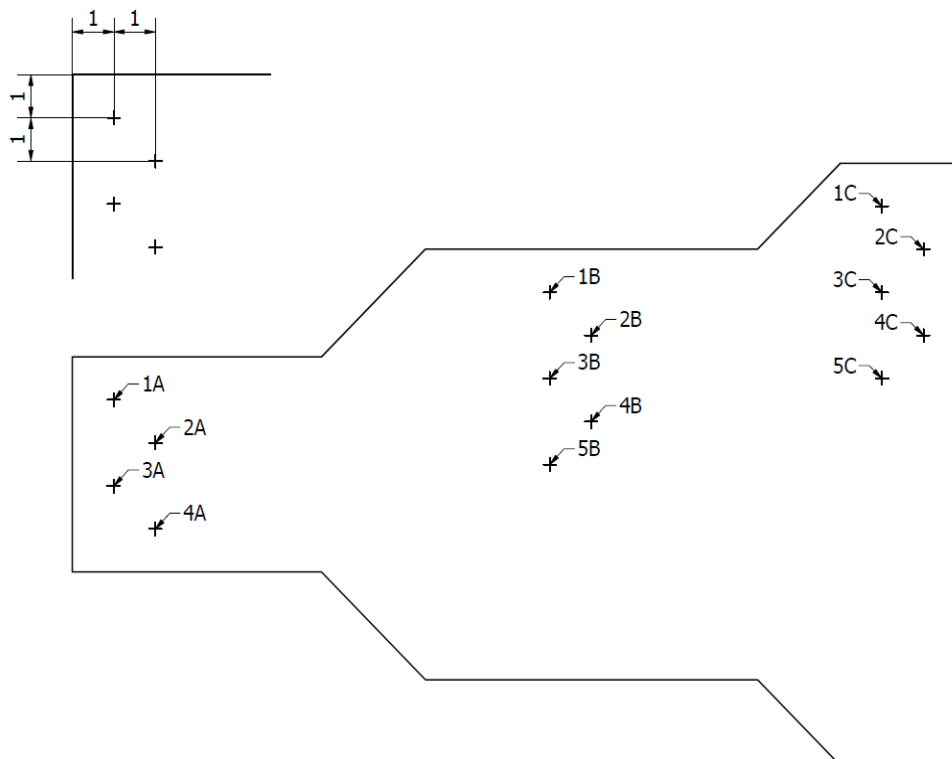
(vzorek pro rázovou zkoušku s rozměry 10x10x50 mm). To je důvod proč se struktura na obrázcích před odlitím a po odlití tak výrazně liší.

4.1.3 Tvrdość kobaltové slitiny

Měření tvrdosti bylo provedeno na metalografickém vzorku elektrolyticky leptaném v kyselině šťavelové podle Vickerse.

Vickersova zkouška tvrdosti je typem statického testu tvrdosti materiálu. Procedura jejího provádění je standardizována dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Základní princip spočívá v tom, že se zkušební těleso (tzv. indentor) zatlačí do zkoumaného materiálu a následně se vyhodnotí stupeň deformace daného materiálu. Jako indentor se v tomto případě využívá diamantový pyramidový jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Míra tvrdosti materiálu se pak stanovuje na základě měření délek dvou diagonál vytištěného jehlanu [33].

Tvrdość



Obr. 26 Schéma měření tvrdosti

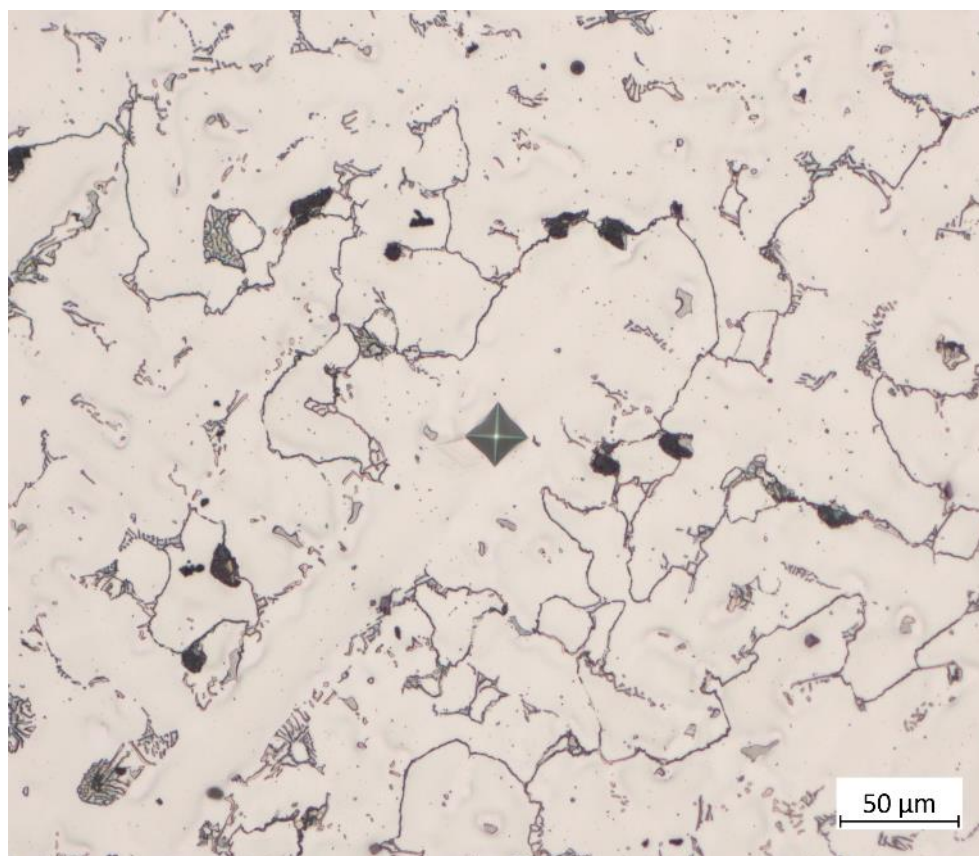
Tab. 2 Hodnoty tvrdosti v jednotlivých místech

Místo vpichu	Tvrdost [HV1]	Místo vpichu	Tvrdost [HV1]	Místo vpichu	Tvrdost [HV1]
1A	277.1	1B	272.5	1C	257.0
2A	274.4	2B	264.7	2C	254.3
3A	281.2	3B	249.6	3C	261.6
4A	270.9	4B	252.2	4C	262.1
		5B	250.4	5C	249.0

Mikrotvrdost

Mikrotvrdost HV 0,1 podle Vickerse je specifický typ zkoušky tvrdosti, který je zaměřen na velmi malé objemy materiálu. Tato metoda je zvláště užitečná pro materiály s velmi jemnou strukturou nebo pro měření povrchových vrstev.

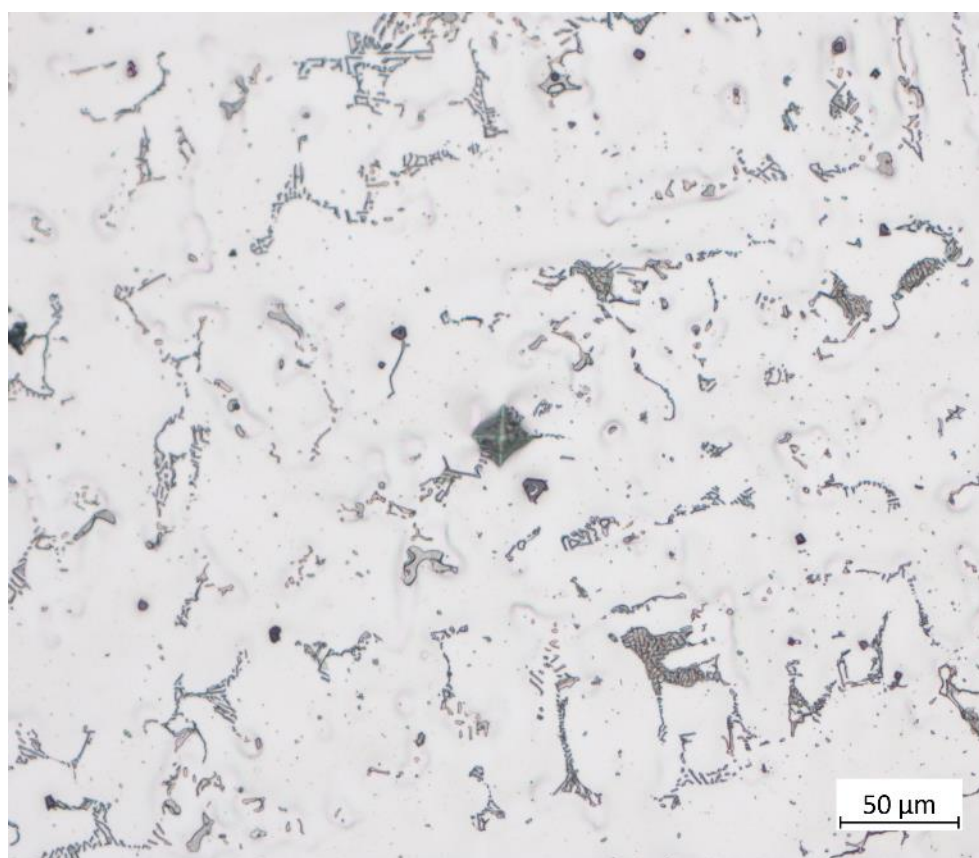
HV 0,1 znamená, že test je proveden s velmi malým zatížením, konkrétně 0,1 kilogramové síly. Toto zatížení je dostačující k vytvoření stopy na materiálu, ale je dostatečně malé, aby se předešlo poškození materiálu [33].



Obr. 27 Měření mikrotvrdosti matrice

Tab. 3 Mikrotvrдость matrice

Místo vpichu	Tvrđost [HV 0.1]
Vpich 1	249.7
Vpich 2	257.2
Vpich 3	248.8
Průměr	251.9



Obr. 28 Měření mikrotvrđosti eutektika

Tab. 4 Mikrotvrđost eutektika

Místo vpichu	Tvrđost [HV 0.1]
Vpich 1	326.0
Vpich 2	314.0
Vpich 3	293.2
Průměr	311.1



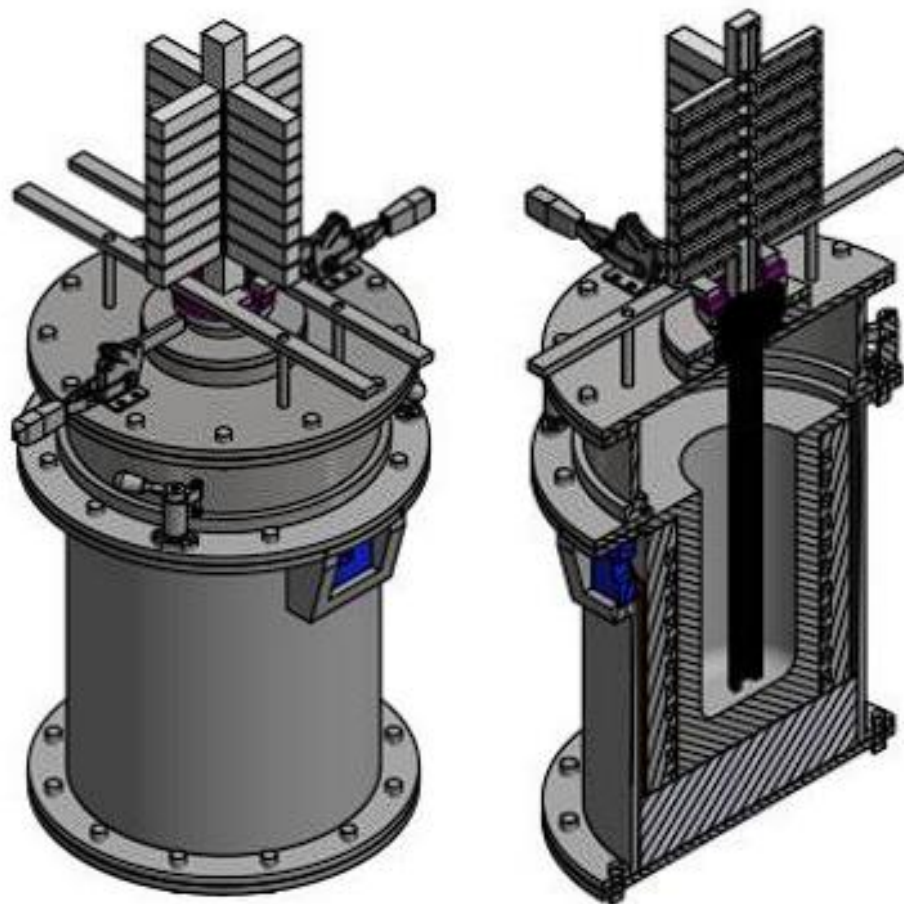
4.2 Nízkotlaký licí stroj

Cílem projektu je výzkum a vývoj stroje pro nízkotlaké lití pro speciální slitiny, tedy slitiny s výrazně vyšší teplotou tavení, než mají slitiny hliníku, kde se nízkotlaké lití standardně používá.

Hlavním cílem je vyvinutí nekonvenční technologie výroby přesných odlitků z hořčíkových slitin zejména pro letecký a automobilový průmysl, optické přístroje, součásti zdravotnických pomůcek, komponenty pro hobby aplikace, dále pro odlitky součástí využívaných při výrobě tvarově velmi složitých biodegradabilních implantátů tak, aby bylo dosaženo kvality a parametrů srovnatelných s předními světovými výrobci.

Komponenty, které stroj obsahuje:

- Tavicí pec pro vsázku 20 kg oceli je nutno vyrobit tak, aby byla tlakotěsná
- Trubice, kterou bude tavenina vytlačována, pravděpodobně přehřívána, ideálně i vystavená vzduchu, bude muset odolat vysoké teplotě
- Systém kontroly tlaku v komoře s taveninou pomocí vysokoteplotních čidel a regulátorů
- Systém pro regulaci naplnění a rychlosti plnění skořepin
- Uzavírání forem po naplnění lze řešit např. mechanicky zatažením jednorázového plechového hradidla
- Systém upnutí skořepiny k licímu stroji před naplněním bude realizováno stabilním přitlakem



Obr. 29 CAD model vyvíjeného NTL (nízkotlakého) stroje pro lití do skořepin

Čeho by tento systém měl dosáhnout v porovnání s klasickou technologií lití na vytavitelný model:

- Kvalita povrchu odlitku – srovnatelná či lepší
- Kvalita materiálu – odhaduje se výrazně lepší
- Náročnost odlitků – působením dotlaku se dá eliminovat řada vad a dá se ovlivnit i počátek krystalizace materiálu.



Obr. 30 Plnění stroje materiálem určeného k roztavení

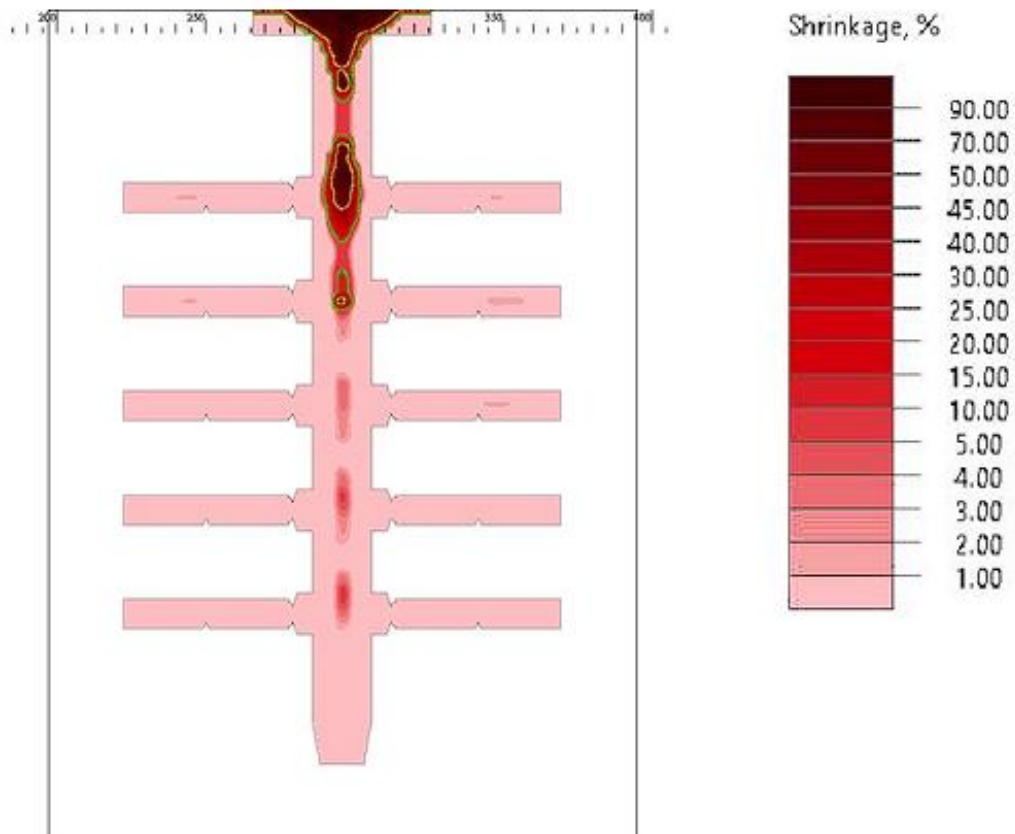


Obr. 31 NTL stroj

4.3 Simulace lití

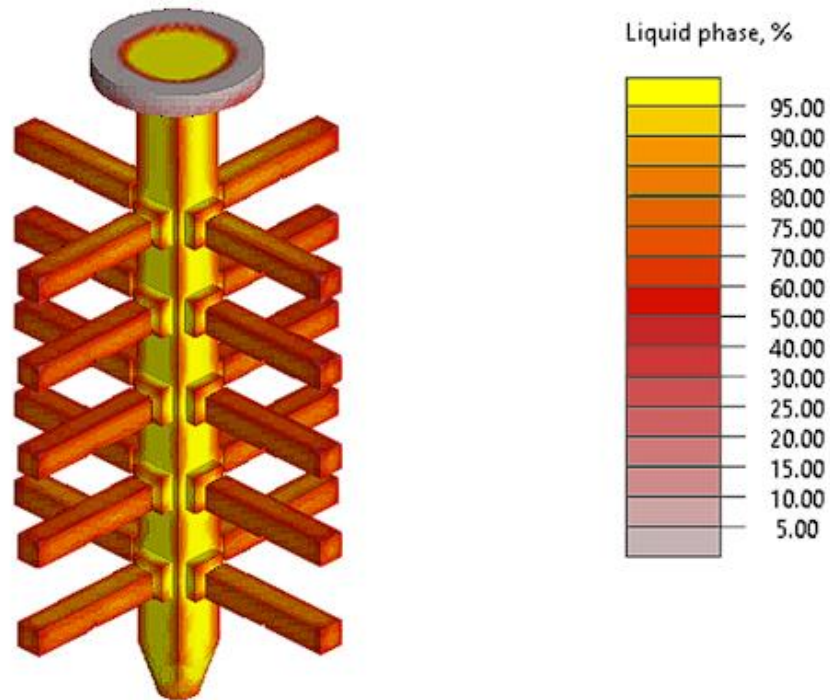
Simulace lití provedená pomocí softwaru NovaFlow&Solid představuje podrobnou analýzu a vizualizaci procesu odlévání kovů. Tento proces poskytuje cenné informace pro vylepšení kvality výsledného produktu a optimalizaci výrobních postupů. Software NovaFlow&Solid, vyvíjený s cílem maximalizovat efektivitu a přesnost v procesu odlévání, je vybaven širokou škálou funkcí pro simulaci různých aspektů lití.

V našem případě byla provedena simulace lití s cílem identifikovat potenciální problémy, analyzovat teplotní profil materiálu během procesu a posoudit celkovou kvalitu odlitku. Využití softwaru NovaFlow umožnilo nejen předvídat chyby a nepravidelnosti, které by mohly během procesu vzniknout, ale také navrhnout opatření k jejich eliminaci ještě před samotným odléváním. Tento přístup nám umožňuje výrazně snížit výrobní náklady, zkrátit dobu výroby a zvýšit kvalitu výsledných odlitků.



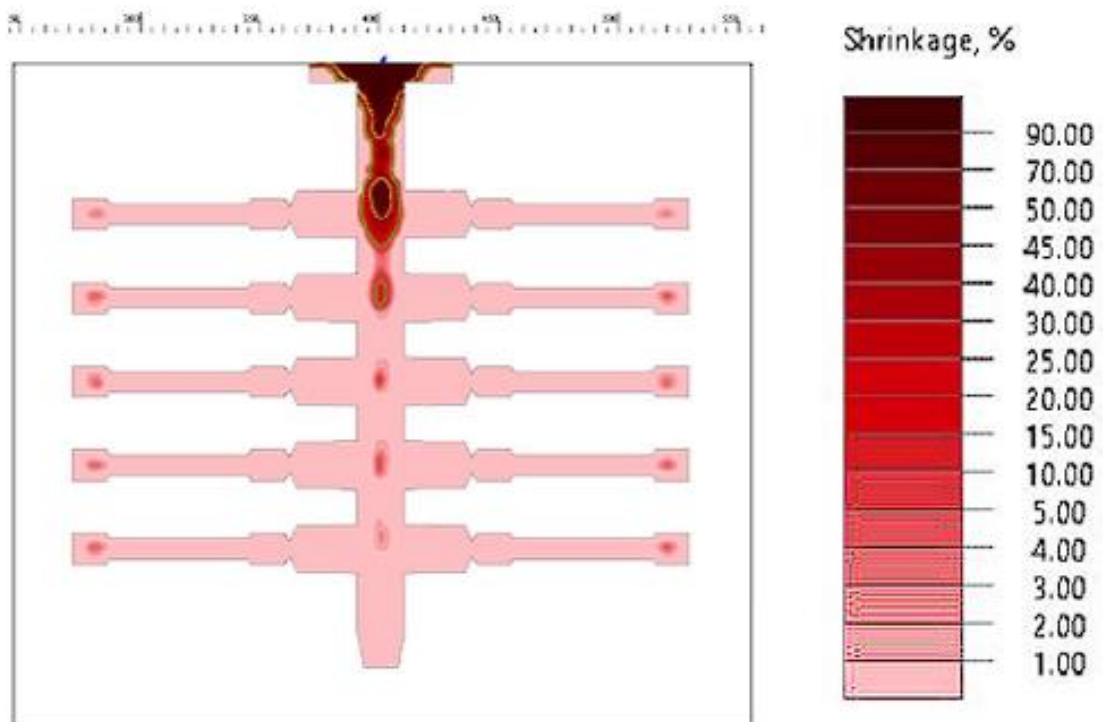
Obr. 32 Simulace smrštění při gravitačním lití vzorků určených na rázové zkoušky

U Obr. 32 je vidět pole objemových změn (staženin) v gravitačně litém stromečku, kde se staženiny projevily pouze v oblasti licího kůlu.



Obr. 33 3D simulace gravitačního lití vzorků určených na rázové zkoušky

Na Obr. 33 je znázorněn přechod z tekuté fáze do pevné fáze. Lze si povšimnout, že vzorky určené na rázové zkoušky tuhnou jako první. To je zapříčiněno tím, že licí kůl je podstatně objemnější, a tudíž bude chladnout pomaleji.

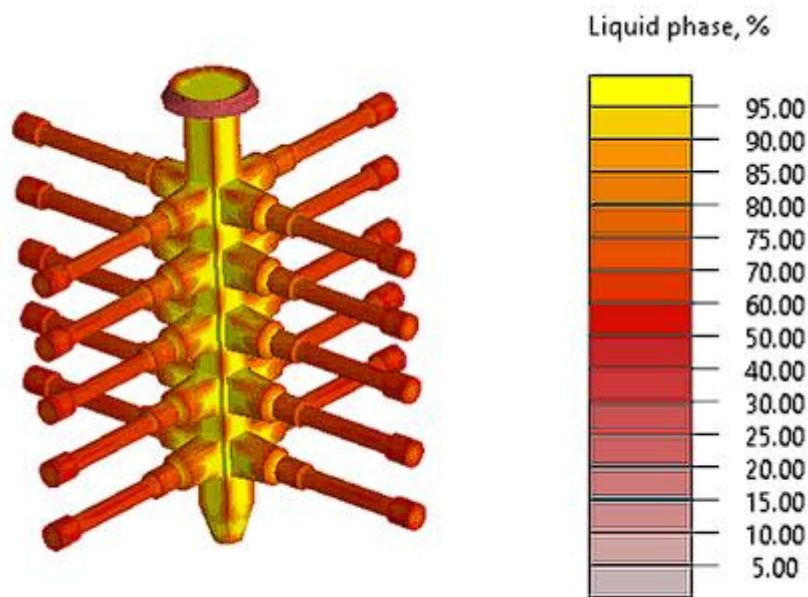


Obr. 34 Simulace smrštění při gravitačním lití vzorků určených na tahové zkoušky

U Obr. 34 se obdobně jako u Obr. 32 objevily staženiny v licím kůlu. Navíc se objemové změny objevily i u konců vzorků určených na tahovou zkoušku (viz Obr. 35).

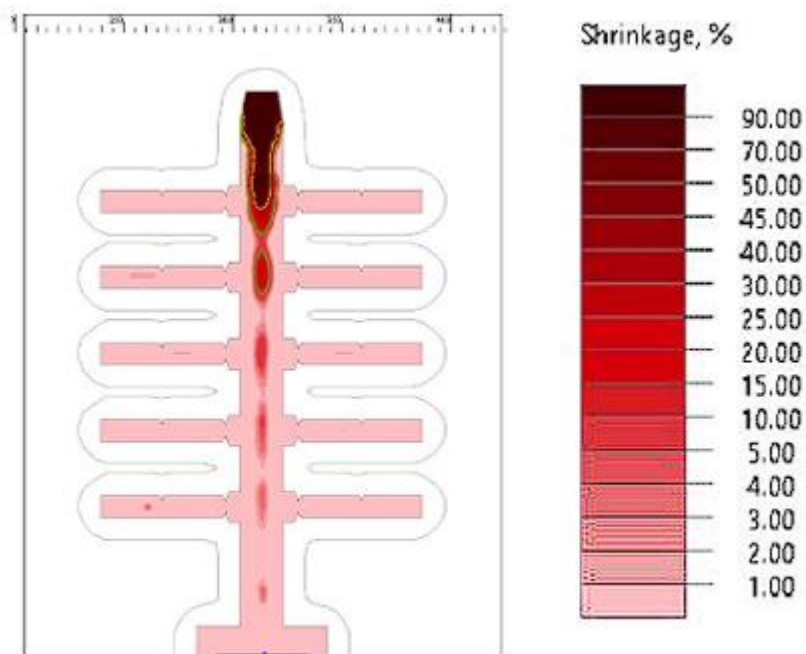


Obr. 35 Detail na smrštění vzorku vyrobeným gravitačním litím



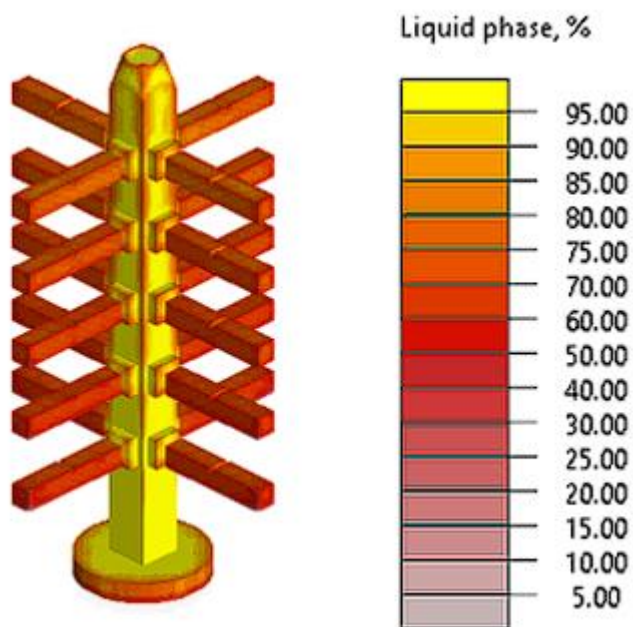
Obr. 36 3D simulace gravitačního lití vzorků určených na tahové zkoušky

Tak jako u Obr.33 i na Obr. 36 tuhnout nejdříve vzorky. Zde navíc můžeme uvažovat, že vzorky určené na tahovou zkoušku budou tuhnout o něco rychleji než vzorky určené na rázovou zkoušku. Je to z důvodu, že vzorky jsou podstatně delší a mají větší plochu na kterou bude působit teplota okolí.

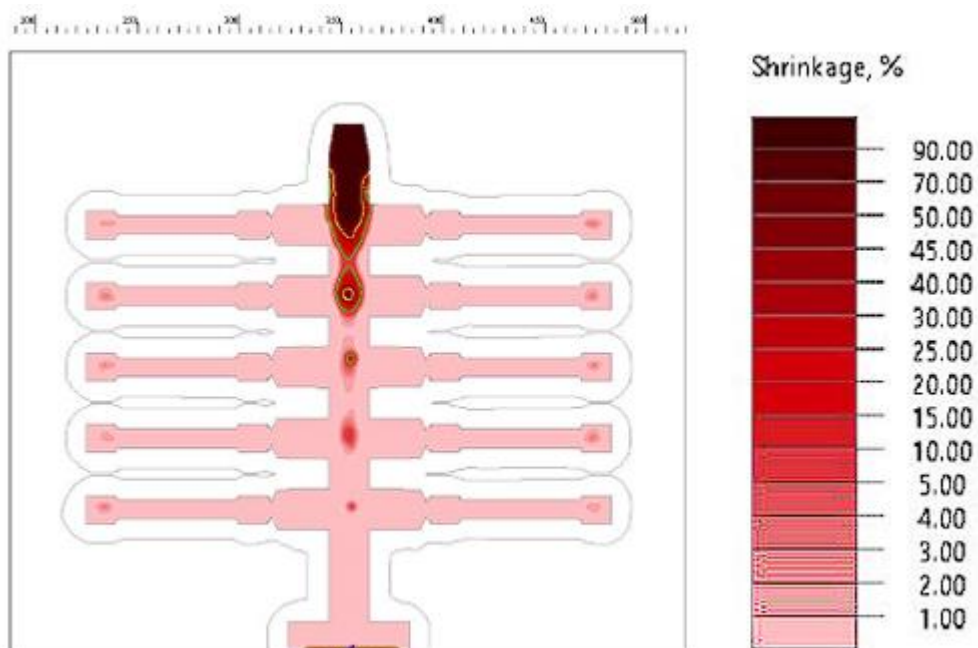


Obr. 37 Simulace smrštění při nízkotlakém lití vzorků určených na rázové zkoušky

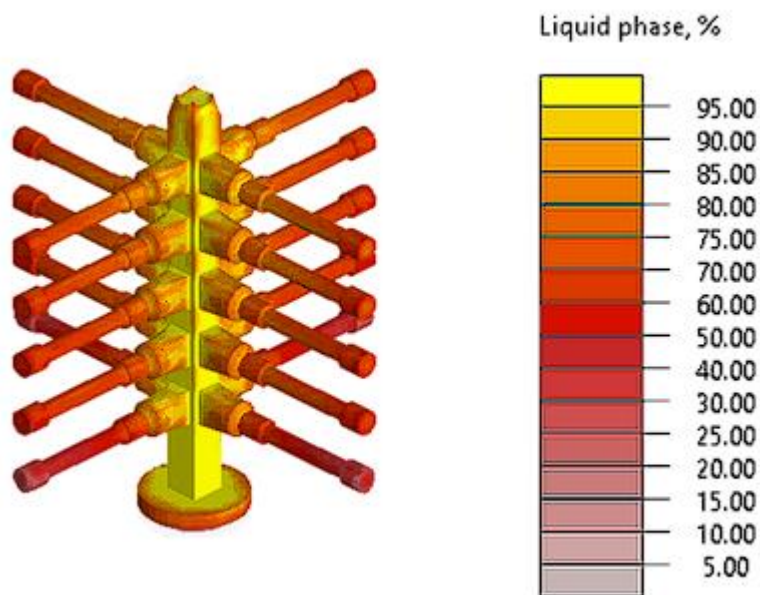
Staženiny na Obr. 37 se vyskytují nejvíce na konci licího kůlu, ale nezasahují do vzorků, takže by to neměl být problém.



Obr. 38 3D simulace nízkotlakého lití vzorků určených na rázové zkoušky

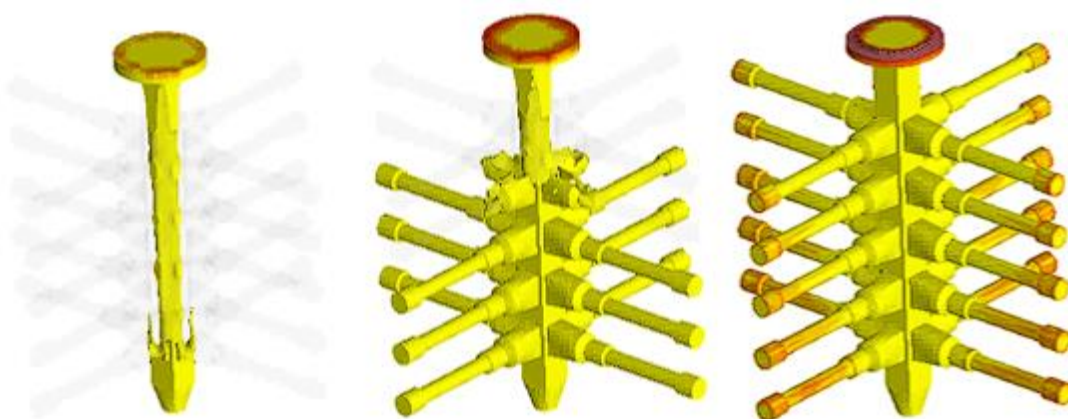


Obr. 39 Simulace smrštění při nízkotlakém lití vzorků určených na tahové zkoušky

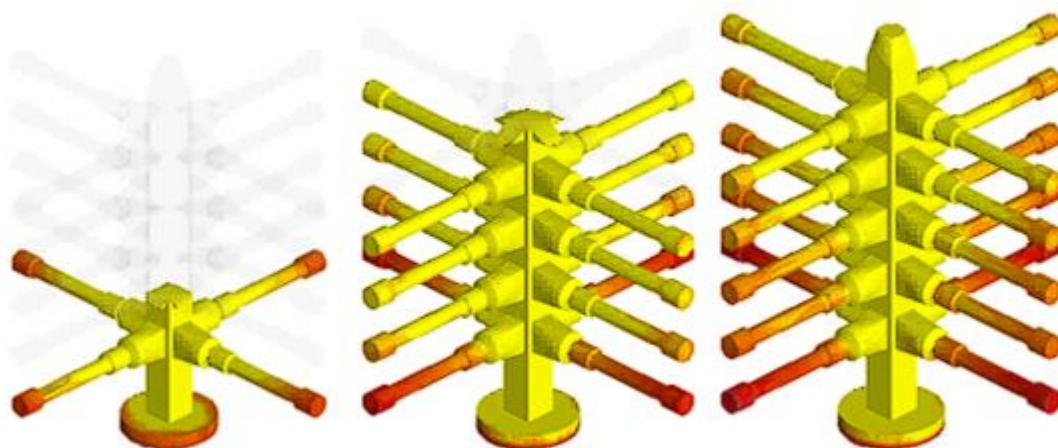


Obr. 40 3D simulace nízkotlakého lití vzorků určených na tahové zkoušky

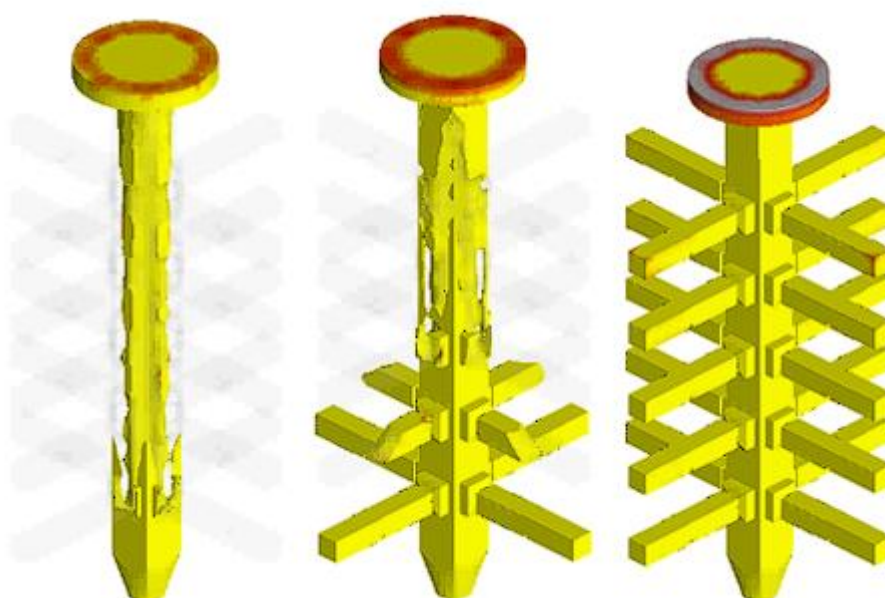
4.3.1 Plnění skořepin



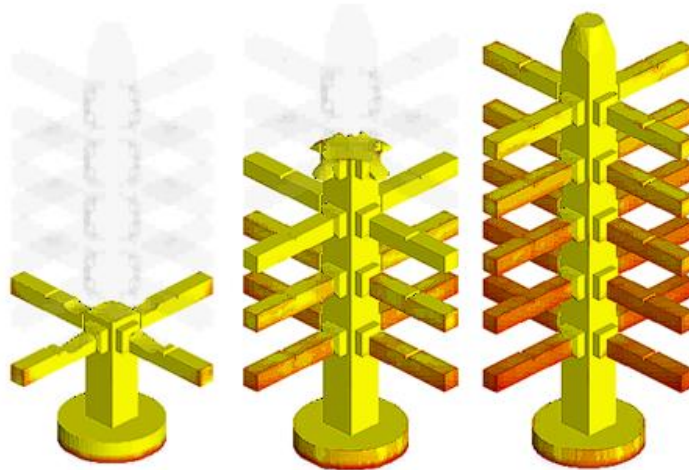
Obr. 41 Plnění skořepiny s vzorky určených na tahovou zkoušku gravitačním litím



Obr. 42 Plnění skořepiny s vzorky určených na tahovou zkoušku nízkotlakým litím



Obr. 43 Plnění skořepiny s vzorky na rázovou zkoušku gravitačním litím



Obr. 44 Plnění skořepiny s vzorky určenými na rázovou zkoušku technologií nízkotlakého lití
Ze simulace plnění je možné si všimnout, že při gravitačním lití odlitky tuhnou rovnoměrně. Zatímco u nízkotlakového lití odlitky, které jsou nejbližší místu vtoku kovu tuhnou jako první.

4.4 Termografie

Termografie je technika, která se používá k detekci teploty povrchu objektu za pomoci měření infračerveného záření, které daný objekt vydává. V odlévání kovů může být termografie použita k monitorování a kontrole procesu odlévání.

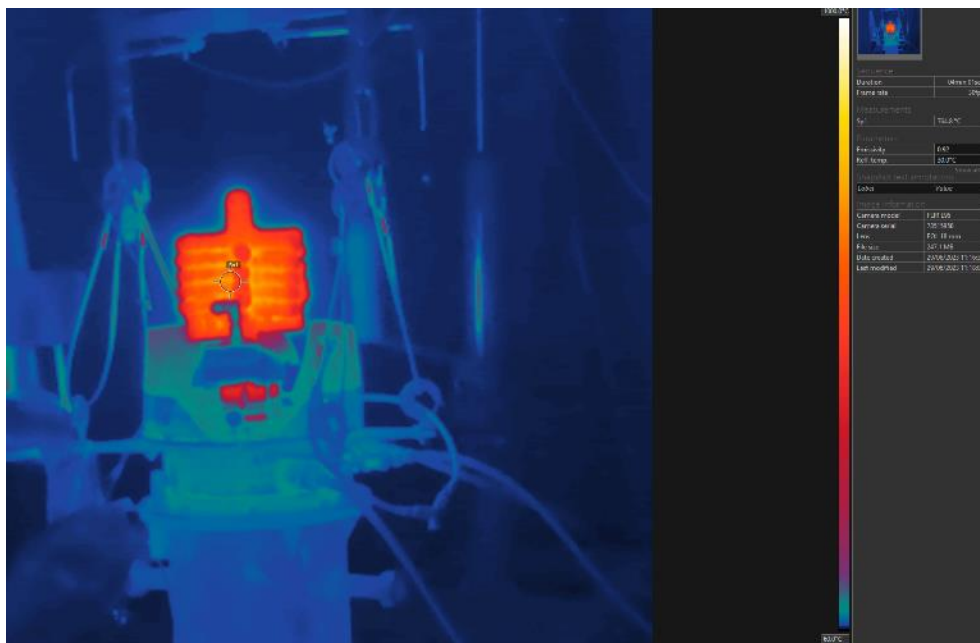
Při našem měření byla použita termokamera FLIR E95 s parametry znázorněnými na Obr. 45

Rozlišení senzoru	464 x 348 px
Teplotní rozsah	-20 °C až +1500 °C
Typ detektoru	Nechlazený mikrobolometr, 17 μm
Teplotní citlivost	< 30 mK
Spektrální rozsah	7,5 – 14,0 μm
Zorné pole	24° x 18° (18 mm lens), 42° x 32° (10 mm lens), 24° x 18° (18 mm lens), 14° x 10° (29 mm lens)
Minimální ostřicí vzdálenost	0,5 m (pro objektiv 18 mm)
Rozpoznávání čoček	Automatické
F-No	f/1,3
Ostření	Manuální a automatické
Obrazová frekvence	30 Hz
Digitální Zoom	1-4x kontinuální
Měřicí funkce	3 (v online módu)
Time-lapse (Infrared)	10 s až 24 hodin

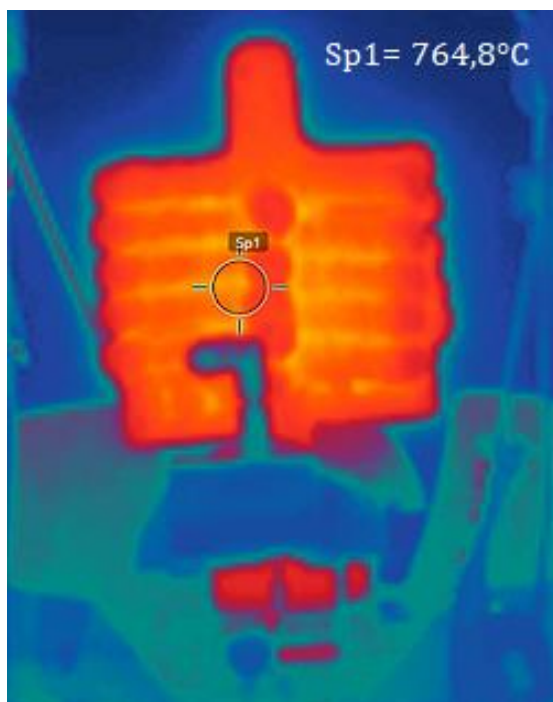
Obr. 45 Parametry termokamery FLIR E95, Převzato z lit. [34]

Parametry při měření

- Emisivita= 0.92
- Okolní teplota= 30 °C
- Vzdálenost kamery od skořepiny= 3 m
- Teplota skořepiny vyjmutá z pece= 900 °C
- Lící teplota slitiny= 1480 °C



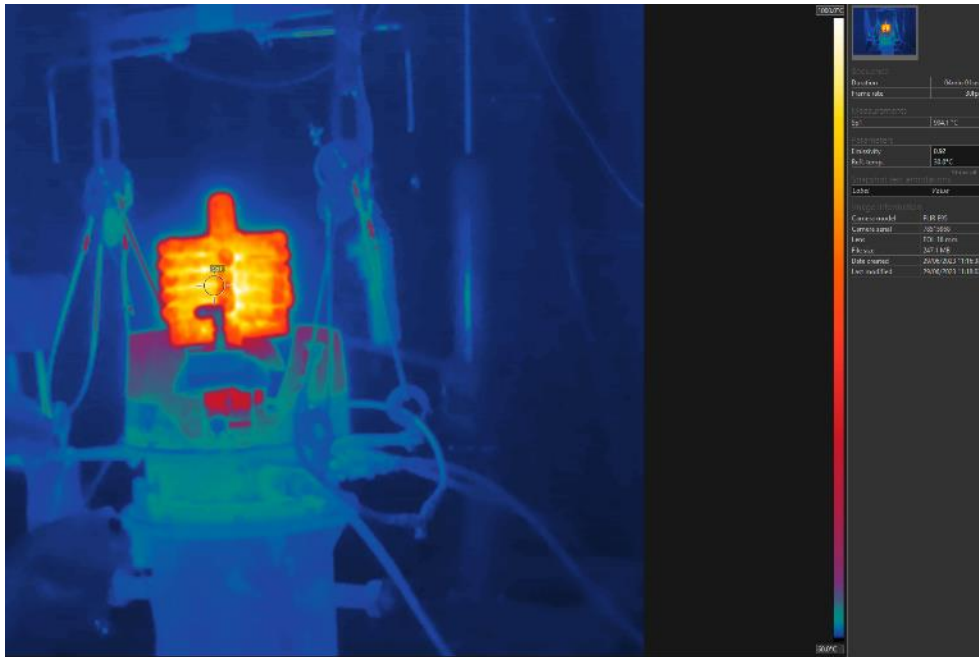
Obr. 46 Skořepina těsně po odlití kovu



Obr. 48 Detail na skořepinu těsně po odlití



Obr. 47 Detail na stupnici



Obr. 49 Skořepina 46 s po odlití kovu



Obr. 50 Detail na skořepinu 46 s po odlití kovu

Skořepina o teplotě 900 °C se vyndala těsně před odlitím kovu z žíhací pece a vložila se do licího stroje. Poté byl do skořepiny přiveden kov z licího kelímku o teplotě 1480 °C a sledovala se teplota povrchu. Rozdíl mezi Obr. 46 a Obr. 49 je 46 vteřin. Můžeme si všimnout, že skořepina se zahřívá směrem od vtokové soustavy. Z toho lze usoudit, že modely budou mít rozdílnou dobu tuhnutí, která je závislá na velikosti

modelu a umístění na stromečku. To může zapříčinit změnu mechanických vlastností materiálu.

4.5 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena dle ČSN EN 10002 na trhačím stroji LabTest 5.100SP1, který je znázorněn na Obr. 53. Experiment byl proveden celkem na čtyřiceti zkušebních vzorcích. dvacet vzorků bylo vyrobeno gravitačním litím a dalších dvacet vzorků nízkotlakým litím.



Obr. 51 odlitý stromeček před odřezáním vzorků

Vzorky byly ze stromečku odřezány pomocí úhlové brusky s řezacím kotoučem určeným k řezání oceli, nerez, hliníku a litiny. Následně byly vzorky popsány (viz Obr. 52).



Obr. 52 Popsané vzorky připravené na tahovou zkoušku



Obr. 53 Trhací stroj LabTest 5.100SP1

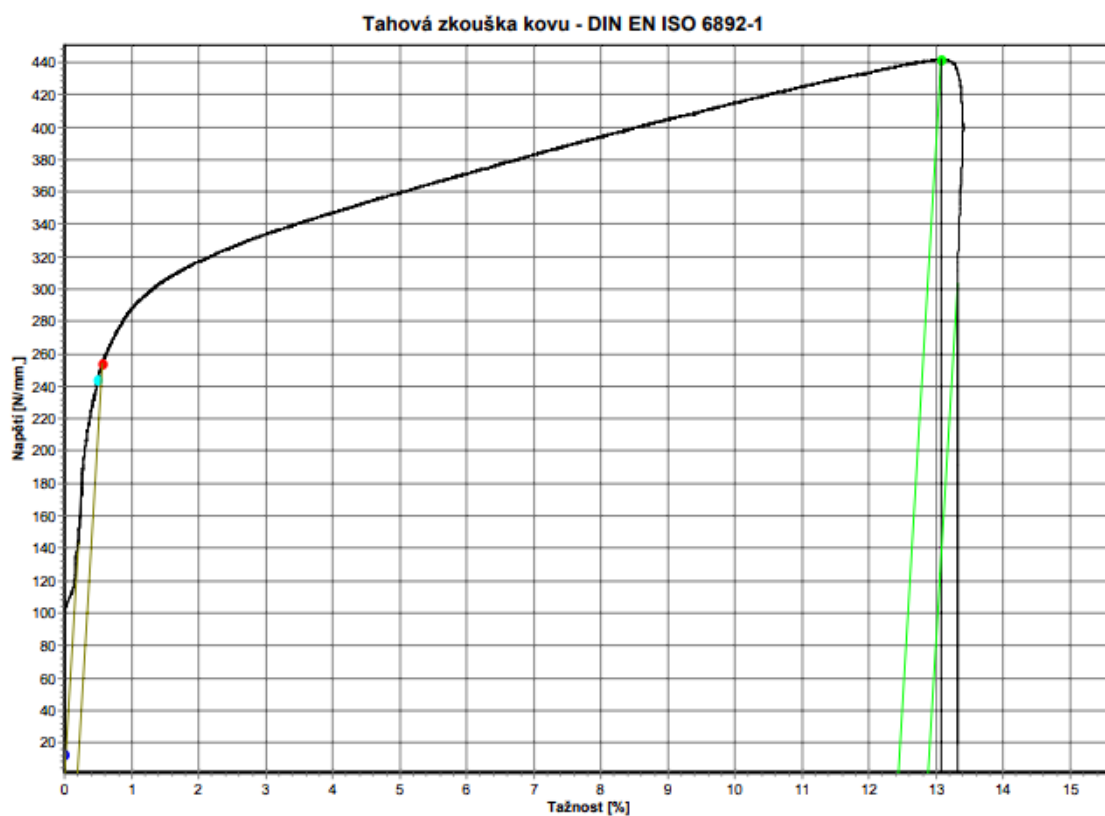


Obr. 54 Detail trhání vzorku



Obr. 55 Vzorky po přetržení

Z Obr. 55 je patrný trend tvorby krčku na kraji měřící oblasti. Je to zřejmě z důvodu malého rádiusu mezi funkční (zkušební) částí a koncem přizpůsobeným čelistem zkušebního stroje.



Obr. 56 Příklad průběhu tahové zkoušky vzorku G1_A1 vyrobeným gravitačním litím



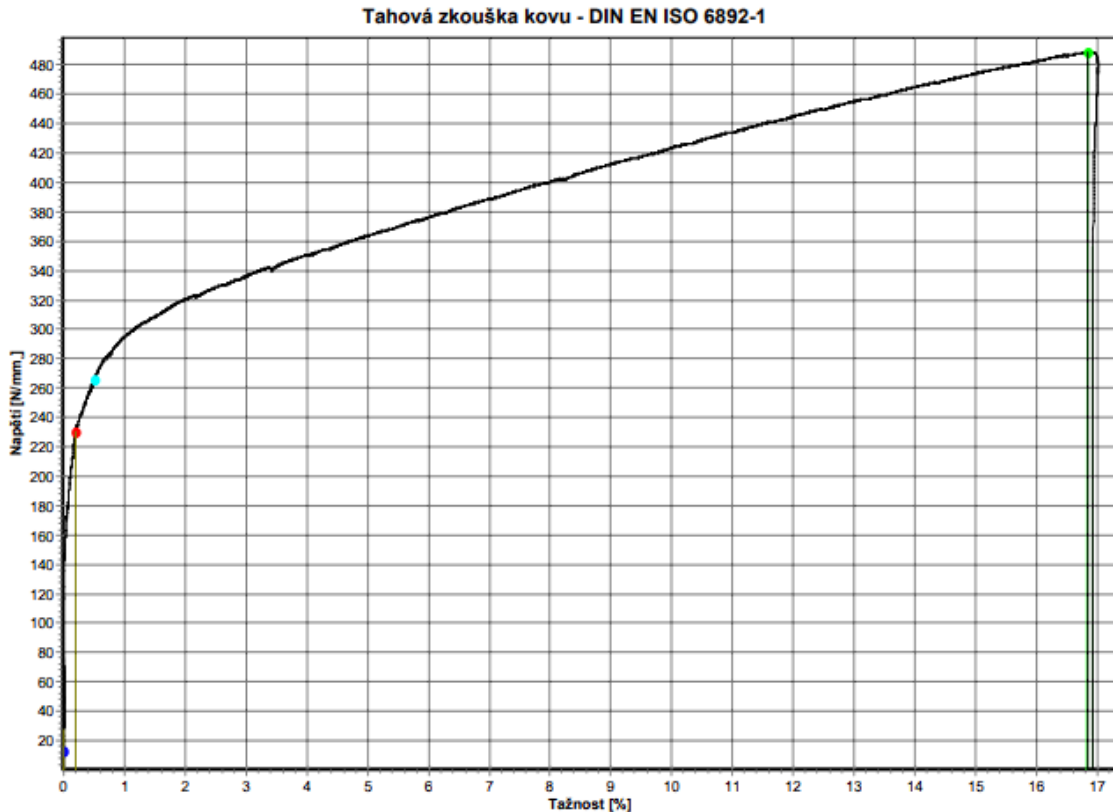
Tab. 5 Výsledná tabulka vzorků vyrobených gravitačním litím

Gravitační lití do skořepin				
Vzorek	Maximální síla	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
G1_A1	35407.9	254	442	12.88
G1_A2	35362.1	252	457	13.04
G1_A3	37201.3	249	483	15.51
G1_A4	41779.3	236	539	27.25
G2_B1	35126	279	449	12.66
G2_B2	38027	234	487	20.95
G2_B3	38802	248	497	20.22
G2_B4	38731	255	503	17.69
G3_C1	35430.2	157	454	14.65
G3_C2	37042.4	231	474	16.97
G3_C3	38679.2	265	493	17.71
G3_C4	36937.1	220	473	17.5
G4_D1	37312.6	119	475	19.67
G4_D2	38987.1	223	499	21.45
G4_D3	37358.4	280	485	18.11
G4_D4	-	-	-	-
G5_E1	37277.7	265	475	17.34
G5_E2	-	-	-	-
G5_E3	35858.1	213	463	16.16
G5_E4	35788.2	240	461	16.75
Průměr	37283.76	234.44	478.28	17.58
Směrodatná odchylka	1662.91	39.16	22.67	3.45



Tab. 6 Výsledná tabulka vzorků vyrobených nízkotlakým litím

Nízkotlaké lití do skořepin				
Vzorek	Maximální síla	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
N1_A1	34056.6	243	440	11.18
N1_A2	40422.5	219	517	24.55
N1_A3	38015.1	251	488	10.48
N1_A4	37616.1	250	484	16.72
N2_B1	36809.5	196	475	15.54
N2_B2	37291.4	235	477	17.05
N2_B3	34290.7	243	438	13.04
N2_B4	38104	255	487	17.55
N3_C1	37631.9	230	489	16.93
N3_C2	37151.1	275	482	17.86
N3_C3	35563.5	174	462	14.79
N3_C4	35139.4	205	454	14.55
N4_D1	38160.8	257	492	18.74
N4_D2	37109.1	238	484	19.12
N4_D3	38374.2	262	492	18.65
N4_D4	37422.4	265	477	17.69
N5_E1	38614.9	237	493	20.86
N5_E2	35939	300	465	13.64
N5_E3	36172	254	461	15.12
N5_E4	36752.2	253	473	16.42
Průměr	37031.82	242.10	476.50	16.52
Směrodatná odchylka	1488.31	27.44	18.51	3.16



Obr. 57 Příklad průběhu tahové zkoušky vzorku N3_C1 vyrobeným nízkotlakým litím

Z Tab. 5 a Tab. 6 lze usoudit, že výsledky jsou prakticky totožné. Bude tedy nutné ještě vyhodnotit lomové plochy, zda se nenajdou nějaké vady, ale hlediska rozsahu experimentů by to bylo nad rámec této bakalářské práce.

Výsledky NTL vykazují nižší směrodatné odchylky a tím pádem i větší stabilitu procesu.

4.6 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu je standardizovaná mechanická zkouška, která se používá k hodnocení houževnatosti materiálu, tedy jeho schopnosti absorbovat energii během plastické deformace. Tato zkouška je zvláště důležitá pro materiály, které jsou vystaveny náhlým zatížením nebo nárazům. Princip spočívá, dle normy ČSN EN 10 045. Bylo použito 300 J kyvadlo. Zkušební těleso má rozměry 55 x 10 x 10 mm a je opatřeno V-vrubem. Měření bylo provedeno na dvaceti vzorcích vyrobených gravitačním litím a dvaceti vzorcích vyrobených nízkotlakovým litím. Měření bylo provedeno v okolní teplotě 27 °C.



Tab. 7 Výsledek rázové zkoušky u gravitačního lití

Gravitační lití do skořepin					
	Vzorek	KCV [J/mm ²]		Vzorek	KCV [J/mm ²]
G1	A1	2.35	G3	C1	2.45
	A2	2.52		C2	2.54
	A3	2.67		C3	2.22
	A4	2.33		C4	2.52
G2	B1	1.9	G4	D1	2.5
	B2	2.39		D2	2.58
	B3	2.3		D3	2.32
	B4	2.48		D4	2.37
G5	E1	2.28			
	E2	2.46			
	E3	2.54			
	E4	2.33			

Průměr = 2.4 J/mm²

Tab. 8 Výsledek rázové zkoušky u nízkotlakého lití

Nízkotlaké lití do skořepin					
	Vzorek	KCV [J/mm ²]		Vzorek	KCV [J/mm ²]
N1	A1	1.6	N3	C1	2.45
	A2	2.12		C2	2.5
	A3	2.33		C3	2.43
	A4	2.32		C4	2.22
N2	B1	2.12	N4	D1	2.5
	B2	2.34		D2	1.9
	B3	2.35		D3	2.17
	B4	2.19		D4	2.37
N5	E1	2.29			
	E2	2.33			
	E3	2.37			
	E4	2.28			

Průměr= 2.26 J/mm²

Z výsledků vyplývá, že vrubová houževnatost nízkotlakým litím do skořepin vyjde přibližně o 6% menší než gravitačním litím do skořepin.

U všech vzorků proběhl houževnatý lom jako je znázorněn na Obr. 58.



Obr. 58 Lom vzorku G1_A1



5 Závěr

Podle zadání byl proveden průzkum technologie lití na vytavitelný model. Historický vývoj a současné globální trendy této technologie byly podrobně zmapovány. Byly popsány metody ruční i částečně automatizované výroby voskových modelů. Zmíněny byly i procesy výroby skořepinových forem, jejich vypalování a žihání. Následně byl popsán proces odlévání a dokončovací operace.

Další část práce se zaměřila na nízkotlaké lití. Byla představena historie a aktuální globální trendy této technologie. Byly popsány jednotlivé kroky procesu, jeho výhody a nevýhody a také faktory ovlivňující proces nízkotlakého lití.

V experimentální části byla zkoumána kobaltová slitina. Bylo zjištěno, jak se její složení mění s rostoucím počtem taveb, byla vyhodnocena vnitřní struktura před a po tavně, a byla změřena tvrdost slitiny a mikrotvrdost matrice a eutektika. Dále byl popsán i vývoj nízkotlakého lití stroje. Byly provedeny simulace gravitačního lití do skořepin a nízkotlakého lití do skořepin včetně jejich plnění. Zaznamenána byla i termografie procesu lití. Na závěr byly vzorky vyrobené technologií gravitačního a nízkotlakového lití podrobeny tahové zkoušce a zkoušce rázem v ohybu.

Na základě porovnání jednotlivých výsledků z experimentální části gravitačního lití do skořepin a nízkotlakého lití do skořepin můžeme usoudit, že výsledky vyšly **velice podobně**, a tudíž nízkotlaký stroj nesplnil očekávání. Je pravděpodobné, že nebyly nastavené optimální parametry při plnění skořepin nízkotlakým litím, což se mohlo projevit změnou mechanických vlastností vzorků podrobených zkouškami. Je proto příliš brzy na to usoudit jaká technologie je efektivnější, neboť stroj je teprve ve fázi vývoje.



Seznam použité literatury

- [1] *E-konstruktér* [online]. In: . [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/rozdil-mezi-litim-na-vytavitelny-model-a-litim-do-piskovych-forem>
- [2] Latest Trends in Investment Casting Technology[online]. [cit. 2023-01-11].Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl6.pdf>
- [3] Designed Precision casting. In: *Dpcast* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: <https://www.dpcast.com>
- [4] LELAND, Martin. *Investment Casting Manual*. 2002. ISBN 9781560610496.
- [5] BEELEY, P. R. a R.F. SMART. *Investment casting*. 1st ed. Cambridge, UK: The University Press, 1995. ISBN 0-901716-66-9.
- [6] In: *Heidewrobelnoergaard* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://heidewrobelnoergaard.com/lost-wax-cast/>
- [7] AVERY, Charles. *Donatello: An Introduction*. New York: IconEditions, 1994. ISBN 0-06-430987-8.
- [8] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-444-63509-9.
- [9] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [10] 3d technologie. In: *Abc3d* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/3ds-projet-mjp2500>
- [11] In: *3d tisk pružných materiálů* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://arcastinginc.com/pages/3d-printing>
- [12] TIWARI, A. *Advances in Ceramic Materials*. Scrivener, 2016. ISBN 9781119242598.
- [13] *3d tisk keramických materiálů* [online]. In: . [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://perfect3d.com>
- [14] DORNFELD, David A. *Green Manufacturing*. 1st ed. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4419-6016-0.



- [15] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. In: . Ústav strojírenské technologie, ČVUT, 2007 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>,
- [16] SIMPSON, Bolland. *The Art of Casting in Iron*. Skyhorse, 2011. ISBN 9781616081836.
- [17] HEANEY, Donald F. *Handbook of Metal Injection Molding*. Woodhead, 2012. ISBN 978-0-85709-066-9.
- [18] HORÁČEK, Milan. *Latest Trends in Investment Casting Technology* [online]. In: . [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl6.pdf>
- [19] KOŘENÝ, Rudolf. *Slévárství neželezných kovů a slitin*. Vysokoškolské skriptum. VŠB. Ostrava, 1971, .
- [20] HAVEL, Jiří. *Hodnocení porezity u tlakově litych odlitků z Al slitin*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT.
- [21] *TheMetalCasting.com: Pressure die casting* [online]. In: . [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html>
- [22] BADIRU, Adedeji B. *The Story of Industrial Engineering: The Rise from Shop-Floor Management to Modern Digital Engineering*. 1st ed. New York: CRC Press, 2022. ISBN 978-1-138-61674-5.
- [23] HERMAN, Aleš. *Automatizace slévárenských technologií*. Praha, 2023. Podklad k přednášce. ČVUT.
- [24] The World Foundry Organization. In: *The WFO* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.thewfo.com>
- [25] *International Journal of Metalcasting*. 2023, . Dostupné také z: <https://www.springer.com/journal/40962>
- [26] *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. 1st ed. Australia: Woodhead, 2011. ISBN 978-1-84569-654-2.
- [27] NOVÁ, Iva. Technologie I. In: *Elearning* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: https://elearning.tul.cz/local/tul_login/index.php?errorcode=4



- [28] TOTTEN, George E. a D. Scott MACKENZY. *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*. 1st ed. CRC Press, 2003. ISBN 9780824704940.
- [29] *Metals Handbook: Casting and Solidification*. 15th ed. ASM International, 2008. ISBN 978-0-87170-711-6.
- [30] *ALLEGHENY: Age-Hardenable, Heat Resistant Cobalt-Base Alloy* [online]. 1996 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.31399/asm.ad.co0003>
- [31] Ruční analyzátor. In: *Bas* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: https://www.bas.cz/innov-x-systems/rucni_analyzator_kovu_delta_professional.php
- [32] Termální diagram. In: *Researchgate* [online]. [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/fig1_260835860
- [33] Vickersova zkouška tvrdosti. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkouška_tvrlosti_podle_Vickerse
- [34] Termokamera: FLIR E95. In: *W-technika* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-e95-termovize-flir-pro-prumysl-a-stavebnictvi.html>
- [35] Bronzová socha Persea. In: *Commons wikimedia* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EB1911_Plate_II_24,_Fig_1.jpg



Seznam obrázků

Obr. 1 Součásti vyrobené metodou přesného lití na vytavitelný model, převzato z lit. [3].....	9
Obr. 2 Postup zhotovení bronzového náramku, převzato z lit. [6].....	10
Obr. 3 Bronzová socha Persea s hlavou medúzy (Cellini-1540), převzato z lit. [35]	11
Obr. 4 3D tisk pružných materiálů, převzato z lit. [11].....	12
Obr. 5 3D tisk keramických materiálů, převzato z lit. [13].....	13
Obr. 6 Jednotlivé fáze lití na vytavitelný model, převzato z lit. [15]	14
Obr. 7 Forma na vstřikování vosku.....	15
Obr. 8 Karuselový vstřikovací stroj	16
Obr. 9 Voskový model.....	17
Obr. 11 Sestavení stromečku	18
Obr. 10 Výroba skořepinových forem	18
Obr. 12 Výrobní linka na nanášení keramické břechky.....	19
Obr. 13 Příklad žíhání, převzato z lit. [18].....	20
Obr. 14 Skořepina těsně po odlití	20
Obr. 15 Stroj odstraňující skořepiny vibracemi	21
Obr. 16 Nízkotlaké lití, převzato z lit. [21]	22
Obr. 17 Ruční analyzátor kovu s označením delta, převzato z lit. [31]	27
Obr. 18 Řezací stroj.....	29
Obr. 19 Saphir 250 A2-ECO	30
Obr. 20 Zkušební vzorky	31
Obr. 21 Vnitřní struktura před odlitím (neleptáno)	31
Obr. 22 Vnitřní struktura před odlitím (leptáno)	32
Obr. 23 Vnitřní struktura po odlití (neleptáno).....	32
Obr. 24 Vnitřní struktura po odlití (leptáno)	33
Obr. 25 Termální diagram Co, Cr, Ni, převzato z lit. [32]	33
Obr. 26 Schéma měření tvrdosti	34
Obr. 27 Měření mikrotvrdosti matrice.....	35
Obr. 28 Měření mikrotvrdosti eutektika	36
Obr. 29 CAD model vyvíjeného NTL (nízkotlakého) stroje pro lití do skořepin	38
Obr. 30 Plnění stroje materiálem určeného k roztavení	39



Obr. 31 NTL stroj	40
Obr. 32 Simulace smrštění při gravitačním lití vzorků určených na rázové zkoušky	41
Obr. 33 3D simulace gravitačního lití vzorků určených na rázové zkoušky	42
Obr. 34 Simulace smrštění při gravitačním lití vzorků určených na tahové zkoušky	42
Obr. 35 Detail na smrštění vzorku vyrobeným gravitačním litím	43
Obr. 36 3D simulace gravitačního lití vzorků určených na tahové zkoušky	43
Obr. 37 Simulace smrštění při nízkotlakým lití vzorků určených na rázové zkoušky	44
Obr. 38 3D simulace nízkotlakého lití vzorků určených na rázové zkoušky	44
Obr. 39 Simulace smrštění při nízkotlakým lití vzorků určených na tahové zkoušky	45
Obr. 40 3D simulace nízkotlakého lití vzorků určených na tahové zkoušky	45
Obr. 41 Plnění skořepiny s vzorky určených na tahovou zkoušku gravitačním litím	46
Obr. 42 Plnění skořepiny s vzorky určených na tahovou zkoušku nízkotlakým litím	46
Obr. 43 Plnění skořepiny s vzorky na rázovou zkoušku gravitačním litím.....	46
Obr. 44 Plnění skořepiny s vzorky určenými na rázovou zkoušku technologií nízkotlakého lití.....	47
Obr. 45 Parametry termokamery FLIR E95, Převzato z lit. [34].....	47
Obr. 46 Skořepina těsně po odlití kovu.....	48
Obr. 48 Detail na skořepinu těsně po odlití	48
Obr. 47 Detail na stupnici	48
Obr. 49 Skořepina 46 s po odlití kovu	49
Obr. 50 Detail na skořepinu 46 s po odlití kovu	49
Obr. 51 odlitý stromeček před odřezáním vzorků	50
Obr. 52 Popsané vzorky připravené na tahovou zkoušku.....	51
Obr. 53 Trhací stroj LabTest 5.100SP1	52
Obr. 54 Detail trhání vzorku.....	53
Obr. 55 Vzorky po přetržení.....	54



Obr. 56 Příklad průběhu tahové zkoušky vzorku G1_A1 vyrobeným gravitačním litím	54
Obr. 57 Příklad průběhu tahové zkoušky vzorku N3_C1 vyrobeným nízkotlakým litím	57
Obr. 58 Lom vzorku G1_A1	59



Seznam tabulek

Tab. 1 Jednotlivé materiály ve slitině.....	28
Tab. 2 Hodnoty tvrdosti v jednotlivých místech	35
Tab. 3 Mikrotvrdość matrice	36
Tab. 4 Mikrotvrdość eutektika.....	36
Tab. 5 Výsledná tabulka vzorků vyrobených gravitačním litím	55
Tab. 6 Výsledná tabulka vzorků vyrobených nízkotlakým litím	56
Tab. 7 Výsledky rázové zkoušky u gravitačního lití.....	58
Tab. 8 Výsledky rázové zkoušky u nízkotlakého lití	58

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TEXTOVÉ PŘÍLOHY



Seznam příloh

Příloha 1 Parametry vzorků vyrobených gravitačním litím do skořepin.....	1
Příloha 2 Výstup z trhacího stroje LabTest 5.100SP1 pro vzorek N4_D1	2
Příloha 3 Výstup z trhacího stroje LabTest 5.100SP1 pro vzorek G4_D1	3
Příloha 4 Rozměry vzorků určené na zkoušku rázem v ohybu vyrobené technologií gravitačního lití do skořepin.....	4
Příloha 5 Rozměry vzorků určené na zkoušku rázem v ohybu vyrobené technologií nízkotlakého lití do skořepin	5
Příloha 6 Naměřené hodnoty při rázové zkoušce pro vzorky vyrobené metodou gravitačního lití do skořepin.....	6
Příloha 7 Naměřené hodnoty při rázové zkoušce pro vzorky vyrobené nízkotlakým litím do skořepin.....	6



Příloha 1 Parametry vzorků vyrobených gravitačním litím do skořepin

	Gravitační lití																			
	G1				G2				G3				G4				G5			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
průměr [mm]	10.1	9.93	9.9	9.93	9.98	9.98	9.97	9.9	9.97	9.97	9.99	9.97	10	9.97	9.9	9.92	9.98	-	10	9.94
skutečná vzdálenost průtahoměrů [mm]	44.1	45.38	45.16	44.5	44.7	45.16	45.6	43.8	43.75	42.1	43.2	44.3	44.78	43.6	43.2	44.74	43.6	-	44.28	41.8
Oblast porušení vzorku	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	v obla sti	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	v oblast i	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	-	mimo oblast	mimo oblast

	Nízkotlakové lití																			
	N1				N2				N3				N4				N5			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
průměr [mm]	9.93	9.98	9.96	9.95	9.93	9.96	9.98	9.98	9.9	9.91	10	9.93	9.94	9.88	9.97	9.99	9.99	9.92	10	9.95
skutečná vzdálenost průtahoměrů [mm]	44.6	42.8	42.6	43	42.4	42.8	41.94	45.7	43.78	43.1	44.3	42.6	44.1	44.8	41.7	42	43.7	45.15	44.9	46.2
Oblast porušení vzorku	mimo oblast	mimo oblast	na hran ě	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	v obla sti	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast	mimo oblast

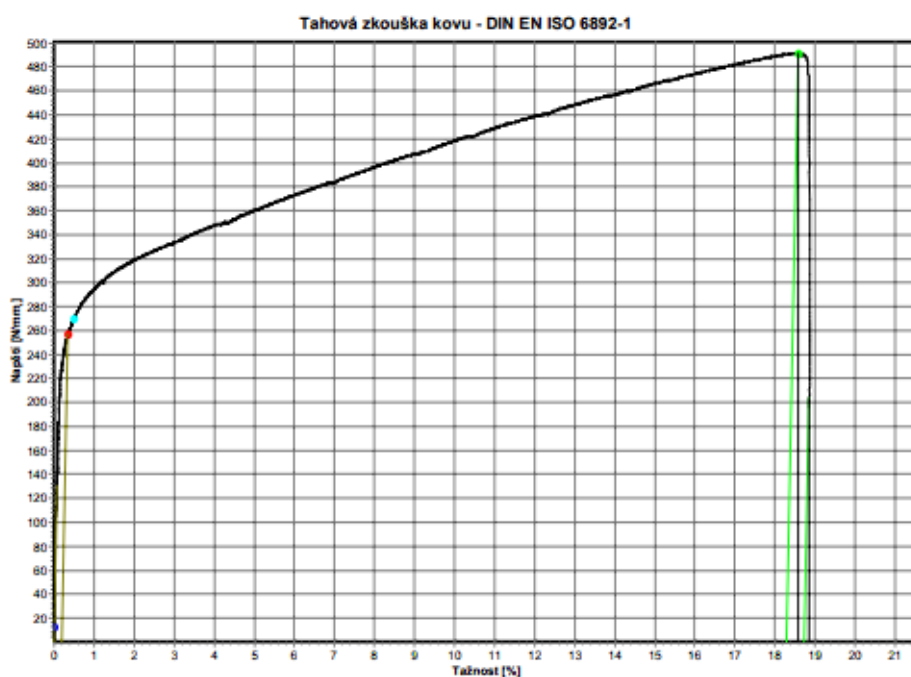


Příloha 2 Výstup z trhacího stroje LabTest 5.100SP1 pro vzorek N4_D1

Zkoušející: Novák Datum: 10.07.23
Materiál: S-816 Čas: 14:17
Název souboru: C:\Documents and Settings\Trhacka\Plocha_Bartoš zkouška tahem_Herman\Nizkotlak\N4\N4_D1.MVL

Zkušební parametry

Zkušební norma: Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje: 48/17
Snímač síly: 100kN
Průtahoměr: extenzome
Upínací přípravek: ne
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku: h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délek: Le = 44,1 mm; Lc = 50 mm; L0 = 45 mm
Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body: F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 60 %



Tabulka výsledků

OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
13	x	10.07.23	14:17		169,919	257	19928,70	270	0	0
	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
13	492	38160,80	18,29	18,74	18,58	18,86				

Statistika a = 13

E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %

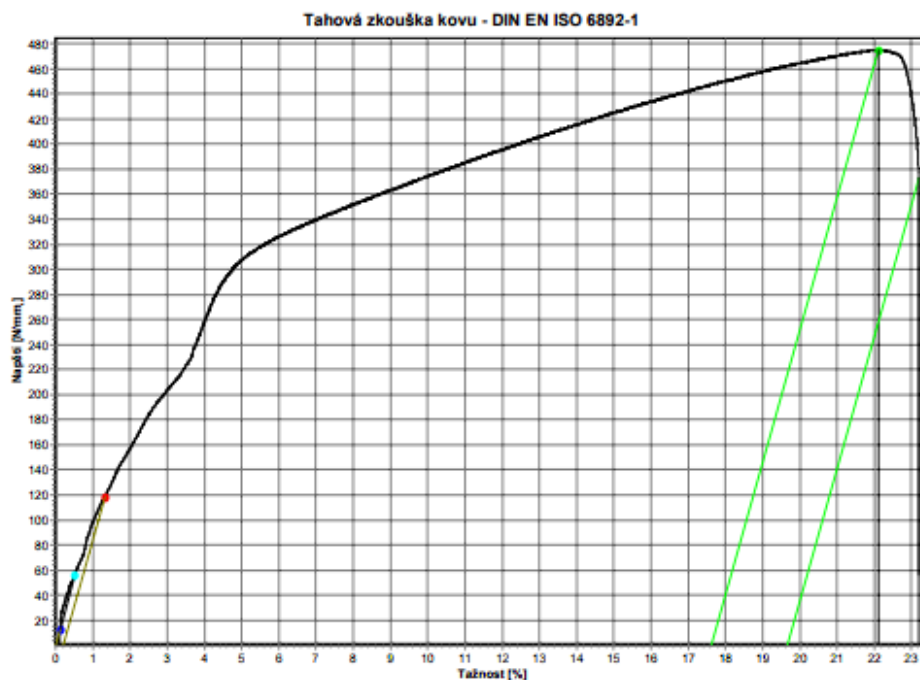


Příloha 3 Výstup z trhačho stroje LabTest 5.100SP1 pro vzorek G4_D1

Zkoušející: Novák Datum: 11.07.23
Materiál: S-816 Čas: 14:38
Název souboru: C:\Documents and Settings\Trhacka\Plocha_Bartoš zkouška tahem_Herman\Gravitační litf\G4\G4_D1.MVL

Zkušební parametry

Zkušební norma: Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje: 48/17
Snímač síly: 100kN
Průtahoměr: extenzometr
Upínací přípravek: ne
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku: h = 1 mm; m = 1 g
Zadáni délek: Le = 44,78 mm; Lc = 50 mm; L0 = 45 mm
Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body: F0 = 1000 N
Kritérium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 60 %



Tabulka výsledků

OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
12	x	11.07.23	14:38		10,585	119	9311,50	56	0	0

Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
475	37312,60	17,62	19,67	22,11	23,20

Statistika a = 12

E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %
------------	---------------	------------	---------------	-------------	-------------	------------	---------	---------	--------



Příloha 4 Rozměry vzorků určené na zkoušku rázem v ohybu vyrobené technologií gravitačního lití do skořepin

Gravitační lití					
	Vzorek	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]
G1	A1	10	55.2	9.99	8
	A2	10	54.8	10.02	8
	A3	10.1	54.9	10.03	8
	A4	10	54.74	9.98	8
G2	B1	10	54.66	9.98	8
	B2	10	54.85	10.05	8
	B3	10	54.7	10	8
	B4	9.98	54.7	9.98	8
G3	C1	10	54.75	10	8
	C2	10	54.83	9.96	8
	C3	10	54.87	10.04	8
	C4	10	54.78	10.03	8
G4	D1	10	54.82	9.99	8
	D2	10	54.8	9.97	8
	D3	10	54.9	10.03	8
	D4	10	54.92	10.01	8
G5	E1	10	54.81	10.03	8
	E2	10	54.66	10	8
	E3	10	54.75	10.04	8
	E4	10	54.88	10.07	8



Příloha 5 Rozměry vzorků určené na zkoušku rázem v ohybu vyrobené technologií nízkotlakého lití do skořepin

Nízkotlaké lití					
	Vzorek	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]
N1	A1	10.02	54.84	9.98	8
	A2	10.1	54.95	10.05	8
	A3	10.15	54.94	10	8
	A4	9.92	54.8	10	8
N2	B1	10.1	54.82	10.03	8
	B2	9.99	55	10.02	8
	B3	10	54.78	10.02	8
	B4	10	54.93	10.01	8
N3	C1	10	55	10.05	8
	C2	10	54.9	10.01	8
	C3	9.97	54.83	10	8
	C4	10.08	54.97	10.08	8
N4	D1	10.07	54.92	10	8
	D2	10.09	54.9	10.02	8
	D3	10.1	54.8	10.02	8
	D4	10.04	54.82	10.02	8
N5	E1	10.02	55	10.02	8
	E2	10	54.7	10.07	8
	E3	10.01	54.65	10.09	8
	E4	10	54.8	9.99	8



Příloha 6 Naměřené hodnoty při rázové zkoušce pro vzorky vyrobené metodou gravitačního lití do skořepin

Gravitační lití do skořepin																				
	G1				G2				G3				G4				G5			
Vzorek	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
Kv [J]	112	98	86	114	114	108	116	102	104	98	122	98	100	94	114	110	117	103	96	112

Příloha 7 Naměřené hodnoty při rázové zkoušce pro vzorky vyrobené nízkotlakým litím do skořepin

Nízkotlaké lití do skořepin																				
	N1				N2				N3				N4				N5			
Vzorek	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
Kv [J]	172	130	113	115	131	112	112	125	104	101	105	122	100	110	126	110	116	114	110	116