



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA TURBÍNOVÉHO KOLA METODOU PŘESNÉHO LITÍ

PRODUCTION OF TURBINE WHEEL WITH INVESTMENT CASTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Fendrich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Myška

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Tomáš Fendrich**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Myška**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba turbínového kola metodou přesného lití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Získání přehledu o technologii vytavitelného modelu z hlediska aplikace při výrobě turbodmychadel, lopatek plynových turbín až k výrobě lopatek proudových motorů. Se stoupajícími teplotami, ve kterých musí lopatky pracovat, roste požadavek na odolnost materiálu vůči tečení materiálu za vysokých teplot neboli creep. Nejen kvůli této vlastnosti je snahou vyvíjet nové a lepší superslitiny, které mají vysoké mechanické vlastnosti, creepové vlastnosti, mají dobrou korozní odolnost a dobré slévárenské vlastnosti.

Cíle bakalářské práce:

Práce bude obsahovat současné trendy ve výrobě turbínových kol metodou přesného lití. Dále bude uveden přehled nejvhodnějších materiálů pro jejich výrobu. V rámci bakalářské práce bude odlito turbínové kolo ze zvoleného materiálu.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárství. 2001, 53(10), 570-580. ISSN 0037-6825.

ROUČKA, J., P. ŇUKSA. Ovlivnění krystalizace rotorů turbodmychadel ze slitin niklu. In 50. slévárenské dny, Sborník přednášek - sekce přesného lití. Brno: Česká slévárenská společnost. 12.-13. 11. 2013. Brno, 6-13. ISBN 978-80-02-02493-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je věnována výrobě turbínových kol metodou přesného lití. Jsou v ní uvedeny základní principy přesného lití, dále popis výroby forem na voskové modely, volba voskových směsí, používané materiály při výrobě skořepin a popis nejpoužívanějších materiálů k samotnému lití turbínového kola. Dále je uveden krátký přehled technologií vakuového odlévání. Na závěr práce je z materiálu A 890 Gr4A turbínové kolo odlito.

Klíčová slova

přesné lití, turbínové kolo, voskové směsi, materiál, odlévání

ABSTRACT

This bachelor thesis is devoted to the production of turbine wheels by the method investment casting. It mentions the basic principles of investment casting, description of production of molds for wax models, choice of wax blends, materials used in the manufacturing of shells and description of the most used materials for casting of the turbine wheel itself. Also a short overview of vacuum casting technologies is presented. In the end of the thesis turbine wheel is casted from material A 890 Gr4A.

Key words

investment casting, turbine wheel, wax blend, material, casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FENDRICH, T. *Výroba turbínového kola metodou přesného lití*, Brno, 2018, 50s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Obor slévárenství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Myška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba turbínového kola metodou přesného lití vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Tomáš Fendrich

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Martinu Myškovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval i Bc. Filipovi Koutnému a Tomáši Veverkovi za jejich podporu v průběhu tvorby práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Technologie přesného lití	8
1.1 Postup při výrobě	8
2 Voskový model	10
2.1 Formy na výrobu modelů	10
2.1.1 Výroba forem podle matečného modelu	10
2.1.2 Výroba forem obráběním	11
2.2 Vstřík vosku do forem	13
2.3 Voskové směsi	14
2.3.1 Složení voskových směsí	15
2.3.2 Dělení voskových směsí	16
2.4 Sestavení voskových modelů	18
3 Keramická skořepina	19
3.1 Keramická suspenze	19
3.2 Posypový materiál	20
3.3 Výroba keramické skořepiny	21
4 Používané materiály	26
4.1 Niklové superslitiny	26
4.1.1 Charakteristika vybraných slitin	27
4.2 Slitiny titanu	28
4.2.1 Slitiny $\alpha + \beta$	29
4.2.2 Intermetalika	29
5 Odlévání	31
5.1 Typy vakuových pecí	31
6 Praktická část	34
6.1 Příprava skořepiny před odlitím	34
6.2 Použitý materiál a odlévání	36
6.3 Vytlučení skořepiny a otryskání odlitku	38
6.4 Vyhodnocení praktické části	41
Závěr	44
Seznam použitých zdrojů	45
Seznam použitých symbolů a zkratk	50

ÚVOD [1], [3]

Technologie přesného lití je jedním z nejpřesnějších způsobů výroby odlitků dnešní doby. Díky této technologii jsme schopni splnit náročné rozměrové, tvarové a povrchové požadavky, navíc s minimálními nároky na dokončovací operace. Právě kvůli těmto vlastnostem se přesné lití používá na výrobu turbodmychadel, plynových turbín, turbín pro proudové motory a další.

V této bakalářské práci je popsán proces výroby odlitků turbínových kol (obr. 1) a následné odlití turbínového kola. Práce se zaměřuje na popis technologie výroby. Jsou v ní rozebírány typy a výroba forem pro voskové modely, volba voskových směsí, nejčastěji využívané materiály použité na odlitek a také vakuová technologie odlévání odlitků. V praktické části je poté turbínové kolo odlito z materiálu Gr4A .

Právě používané materiály jsou velmi důležitým faktorem v tomto odvětví. Z důvodů vysokých požadavků na kvalitu a pevnost odlitků musí být použité slitiny dostatečně odolné, korozivzdorné a dobře odolávat silám při vysokých teplotách, kterým jsou turbínová kola vystavena při provozu.



Obrázek 1. příklad turbínových kol PBS [2].

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ [1], [3], [4]

Metoda přesného lití na vytavitelný model v současnosti zastává vysokou pozici v odvětví moderních technologií slévárenství. Díky minimálním nárokům na následné dokončovací operace šetří čas a snižuje náklady u velice komplikovaných odlitků.

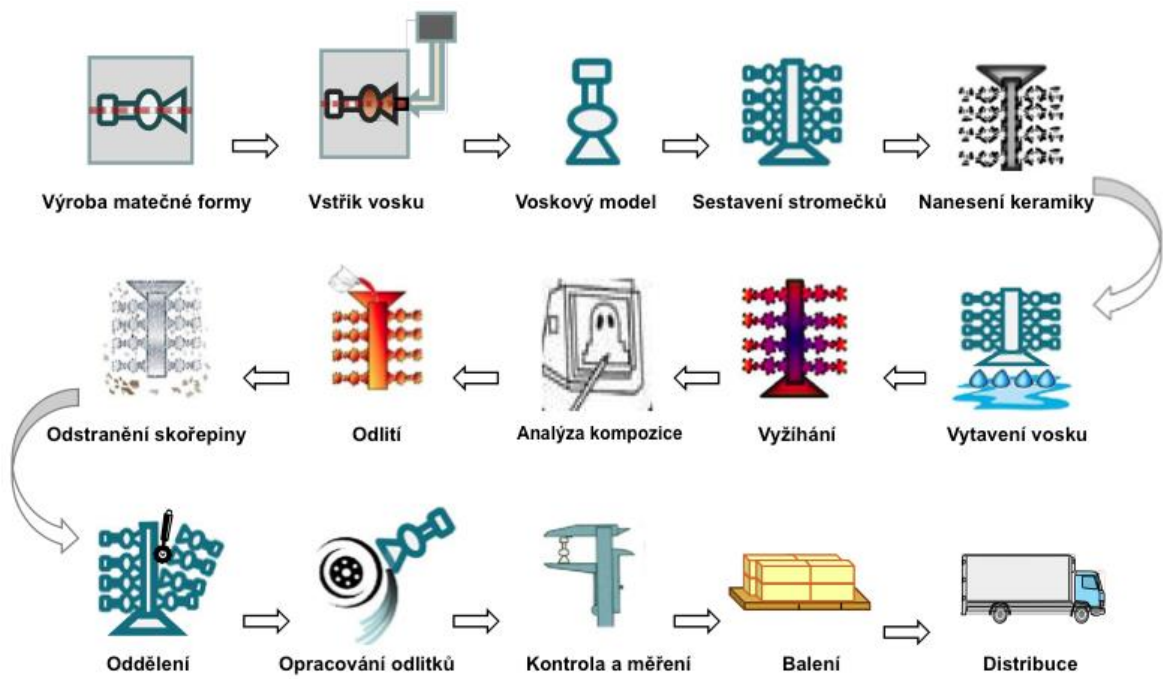
Přesné lití se tedy používá u výroby tvarově složitých součástí, kde by volba jiné technologie výroby byla velmi nákladná nebo dokonce nemožná. Kvůli této vlastnosti je v dnešní době často využívána a nenahraditelná.

1.1 Postup při výrobě [3], [4]

Výrobní proces je rozdělen do několika fází (obr. 2). V dalších podkapitolách jsou jednotlivé fáze postupně rozebrány.

Prvním krokem při výrobě odlitků metodou přesného lití je návrh a výroba matečné formy, nejčastěji z hliníku nebo oceli. Následně se do formy pomocí speciálních lisů vstříkne vosková směs a po vyjmutí dostáváme voskový model. Voskovým modelům je přidána vtoková soustava, která je taktéž z vosku. U menších odlitků jsou modely umístěny pomocí pájení do tzv. stromečků. Po sestavení stromečků následuje výroba skořepiny. Skořepina je tvořena kombinací keramiky a posypového písku. Modely jsou namáčeny do keramické břečky a posypávány žáruvzdorným materiálem. Obalí se v několika vrstvách, dokud není dosažena potřebná tloušťka. Skořepiny jsou následně vysušeny na vzduchu nebo za pomoci chemických činidel. Vysušené skořepiny se umístí do autoklávu, kde je z nich vytaven vosk. Připravené skořepiny mohou být uchovány na pozdější lití nebo převezeny do jiné slévárny na finální odlévání.

Před odléváním je důležité skořepinu vyžítat, aby se odstranily poslední zbytky vosku a nedocházelo k teplotnímu šoku při odlévání žhavého kovu. Po odlití musí odlitky vychladnout a následně je z nich v tryskacích zařízeních odstraněna skořepina. V dalším kroku se oddělí vtoková soustava a odlitky jsou opracovány na pásových bruskách, kde jsou zbaveny zbylé skořepiny a výstupků po vtokové soustavě. Po těchto operacích následuje rozměrová a vizuální kontrola odlitků, které jsou následně uskladněny nebo rovnou distribuovány k zákazníkům.



Obrázek 2. Postup výroby [5].

2 VOSKOVÝ MODEL [1], [3]

Voskový model viz (obr. 3) je základním stavebním kamenem pro výrobu odlitků metodou přesného lití. Model musí být rozměrově přesný, s dokonalým povrchem a i odchylka desetiny milimetru modelu může znamenat rozdíl mezi shodným a neshodným odlitkem. Proto je výroba modelu v celém procesu velmi důležitá. Kvalita modelu závisí především na dobře zpracované formě a správném zvolení voskové směsi.



Obrázek 3. Voskový model [6].

2.1 Formy na výrobu modelů [1], [3]

Výroba voskového modelu začíná u matečné formy. Protože je forma v procesu výroby odlitku velice důležitá, jsou na ni kladeny velmi vysoké nároky. Forma musí splňovat všechny tvarové požadavky výsledného odlitku, zásah do voskového modelu po vytažení z formy již není možný. Forem je více typů, volba vhodné formy závisí především na počtu kusů v sérii a na časové periodě, ve které mají být odlitky zhotoveny. Podle způsobu výroby rozlišujeme dva hlavní typy forem. Formy vyrobené podle matečného modelu a formy vyrobené obráběním.

2.1.1 Výroba forem podle matečného modelu [3], [7], [8], [9]

U tohoto typu forem je nutná podmínka již existujícího modelu, podle kterého jsou formy následně vytvořeny. Formy jsou tímto způsobem vyráběny z důvodů nižších nákladů nebo u malosériové výroby. Při zvýšení nároků na množství a kvalitu vyrobených odlitků uplatnění těchto forem klesá a používají se formy vyrobené obráběním.

- **Formy z plastických hmot**

Tyto formy jsou zhotoveny zalitím matečného modelu plastickou hmotou. Nejčastěji je používán dentakryl nebo epoxidová pryskyřice. Po vytvrzení je matečný model vyjmut a forma připravena k použití. Bohužel je však čas, po kterém lze vosk z této formy vyjmout velice dlouhý, navíc i odolnost formy je nízká, proto se nepoužívají u vícekusových sérií, ale především v uměleckém odvětví.

- **Formy ze sádry**

Podobě jako u forem z plastické hmoty se matečný model zalije sádrou. Po ztuhnutí se do sádrové formy kov odlévá gravitačním litím. Životnost formy je velice krátká a používá se nejčastěji při ověřování výrobní technologie.

- **Formy z nízkotavitelných slitin**

Jejich výhoda tkví v jednoduché výrobě. Kovový model, který je usazen v ocelovém plášti, se jednoduše zalije slitinou. Modely vyrobené v takových formách mají kvalitní povrch a dobré rozměrové vlastnosti. Nevýhodou je opět krátká životnost formy.

- **Formy ze zinkových slitin**

Jsou zhotoveny zalitím matečného modelu zinkovou slitinou. Oproti formám z nízkotavitelných materiálů mají větší odolnost a tím i delší životnost.



Obrázek 4. Nástřik Zn vrstvy [10].

- **Formy vyráběné metalizací**

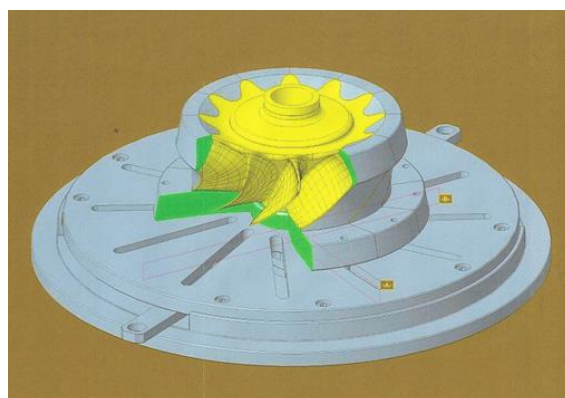
Používají se při výrobě tvarově složitých odlitků, kde by ale forma vyrobená obráběním byla cenově nevýhodná. Forma je tvořena nanášením tenké vrstvy kovu přímo na matečný model (obr. 4). Nejčastěji se používá zinek díky jeho nízké tavicí teplotě. Částice zinku se na povrchu matečného modelu spojují a vytváří celistvou kovovou vrstvu. Ta je následně zalita pryskyřicí nebo nízkotavitelnou slitinou. Výhodou je vysoká kvalita obtisku při nízké ceně formy, na druhou stranu není možné formu modifikovat při případných změnách rozměrů odlitků.

2.1.2 Výroba forem obráběním [3], [9]

Formy vyrobené obráběním jsou nejčastěji používaným prostředkem k výrobě voskových modelů. K jejich přednostem patří vysoká odolnost, přesnost, pevnost a možnost modifikace. Jsou také vhodné pro velké série kusů. Tvarová náročnost lopatek turbínových kol vyžaduje velice přesnou formu. Výroba formy je tedy pro celý proces důležitá a tím pádem i časově náročná.

Začíná se návrhem formy pomocí počítačových CAD/CAM programů (obr. 5). Pokud se v modelu nacházejí dutiny, které jsou mimo dělicí rovinu, je nutnost použít jádra. Jádra jsou jak vyjímatelná, tak i pevně zabudovaná do konstrukce formy, záleží na daném konstrukčním řešení.

Samotné zhotovení formy se provádí na obráběcích CNC centrech. Při výrobě se často využívá i elektroerozivní technologie obrábění. Tou jsme schopni dosáhnout velice



Obrázek 5. Návrh formy v CAD programu [11].

přesných tvarů, zvláště v místech ostrých přechodů nebo hran. Jako materiál pro formy zhotovené obráběním se v drtivé většině případů používají hliník a ocel.

- **Hliníkové formy**

Hliníková forma, je levnější alternativou výroby forem obráběním (obr. 6). Díky nižší pevnosti jsou hliníkové formy jednodušší k obrábění a tím pádem i cenově dostupnější. Nevýhodou však je jejich nižší odolnost, kratší životnost a složitější oprava, kvůli špatným vlastnostem hliníku při svařování.



Obrázek 6. Hliníková forma.

- **Ocelové formy**

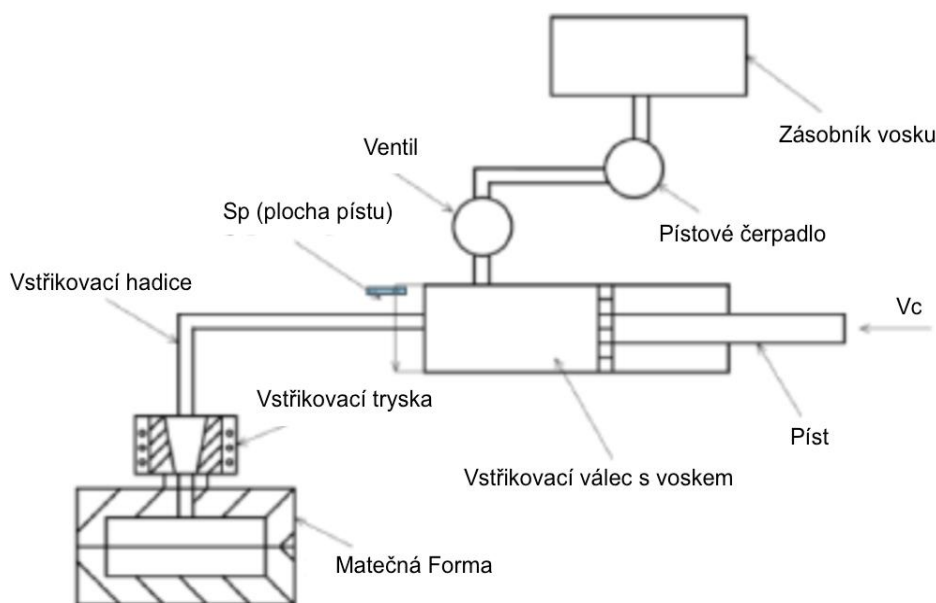
Pro náročnější tvary jako jsou např. turbínová kola a větší modely se používají formy ocelové (obr. 7). Vyznačují se vyšší odolností a delší životností než formy hliníkové. S tím souvisí i obtížnost takovou formu vyrobit, což se projeví na ceně. Náklady za ocelovou formu pro turbínové kolo se mohou vyšplhat i přes hranici milionu korun. Další nevýhoda tkví v horší tepelné vodivosti oceli, tím pádem model ve formě tuhne delší dobu, a tím se prodlužuje čas k výrobě jednotlivých modelů.



Obrázek 7. Ocelová forma turbínového kola [11].

2.2 Vstřík vosku do forem [3], [4], [9]

Voskové modely pro přesné lití turbínových kol jsou zhotovovány vstříkem vosku do kovové formy. Kvalita výsledného modelu závisí mimo jiné i na volbě voskového lisu, který je na vstřík vosku použit. Lisy pracují s roztavenou voskovou směsí, kterou vstříkují pod tlakem do formy, schéma takového lisu můžeme vidět na obr. 8. Teplota vosku při vstříkávání se pohybuje v rozmezí 55-90 °C. V případě turbínových kol je to teplota nejčastěji blíží se 63 °C. Jakmile vosk ve formě ochladne, následuje jeho vyjmutí.



Obrázek 8. Schéma voskového lisu [4].

Nejčastěji používaným typem vstříkacího stroje pro výrobu modelů turbínových kol je lis pracující s tekutým voskem. Vhodnost toho stroje spočívá v dobré zabíhavosti tekutého vosku do úzkých částí lopatky ve formě.

Proces vstříkávání u tohoto stroje je rozdělen do několika částí. Nejdříve je vosk z ohřevného zásobníku přepraven do vstříkacího válce pomocí pístového čerpadla. Při naplnění vstříkacího válce se uzavřou ventily na vstříkací jednotce a stroj je připraven k plnění. Obsluha lisu následně upevní formu do stroje a po dosažení předem nastaveného tlaku je do ní vstříknut tekutý vosk. Po vstříknutí vosku stroj nadále působí tlakem po předem nastavenou dobu, kdy vosk ve formě vychladne a ztuhne až do stavu, než může být vyjmut z formy. Poté se forma otevře a pracovník vyjme hotový model.

Tento typ vstříkacího lisu, který můžeme vidět na obr. 9. je v současnosti hojně využíván slévárnami přesného lití. Použitím vysokého tlaku při vstříkávání je stroj schopný dokonale vyplnit komplikované tvary formy a zajistit tvarově a povrchově perfektní model. Další výhodou tkví v tom, že vosk je čerpán z centrálního zásobovacího systému, kde se snadno udržuje stav vosku ve stroji a vyžaduje minimální podíl lidských zásahů. Nevýhodou může být častý výskyt staženin při zvyšování teploty plnění, ten se dá ale odstranit přidáním plniv do voskových směsí, které snižují jejich výskyt.



Obrázek 9. Lis Shell-O-Matic [12].

2.3 Voskové směsi [3], [4], [9]

Představa, že vosk používaný na výrobu voskových modelů je stejný vosk, který se používá například na výrobu svíček je velice mylná. Voskové směsi se skládají z více komponentů jako parafín, syntetický vosk, přírodní vosk (uhlovodík, ester), přírodní a syntetická pryskyřice, montánní vosk, plnivo a voda nebo alkohol. Jednotlivé složky mají vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti směsi jako je bod tání, tvrdost, objemová roztažnost za tepla a další. Jak vidíme na obr. 10, tak voskové směsi se od sebe liší různými barvami.

Při vytavování vosku se může stát, že skořepina praskne a vosk se dostane na povrch, díky barevnosti vosku můžeme toto místo snadněji odhalit a skořepinu opravit. Barvy nám také od sebe odlišují různé typy směsí, které se můžou lišit mechanickými a jinými vlastnostmi.



Obrázek 10. Granulované voskové směsi [13].

2.3.1 Složení voskových směsí [9], [14], [15], [16], [17]

Současné voskové směsi využívané ve slévárnách přesného lití jsou velice komplexní a složité sloučeniny obsahující mnoho komponent. Níže jsou uvedeny základní složky voskových směsí.

- **Parafínový vosk**

Je bílá krystalická směs tvořená uhlovodíky. Skládá se z krátkých řetězců o 20-36 atomech. Vyznačuje se svojí křehkostí a malou pevností. Teplota tavení parafínů se pohybuje mezi 32-66 °C.

- **Mikrokrystalický vosk**

Organická směs tvořená uhlovodíky. Skládá se z delších řetězců o 31-50 atomech. Díky větvené struktuře molekul je pevnější a taví se při vyšších teplotách 60-93 °C.

- **Tvrdé vosky**

Jsou to modifikované uhlovodíkové sloučeniny nebo přírodní estery. Vyznačují se velmi malou viskozitou a velkou křehkostí. Teplota tavení těchto vosků je 65-120 °C.

- **Pryskyřice**

Pryskyřice ve voskových směsích se vyskytuje ve třech základních typech syntetická, uhlovodíková a přírodní. Každý typ pryskyřice má své jedinečné vlastnosti a výhodu používání. Vyznačují se komplexní přímou, větvenou a prstencovitou strukturou. Teplota tavení pryskyřic se pohybuje mezi 20-190 °C.

- **Polymery**

Ovlivňují pozitivně fyzikální vlastnosti směsi a to především houževnatost a zvyšují viskozitu. Nejčastěji používanými jsou polymery EVA (etylvinil acelát). Teplota tavení je 50-200 °C.

- **Plniva**

Plniva jsou používána z důvodů zlepšení vlastností vosků. Zmenšují teplotní roztažnost, omezují vznik staženin a zpevňují vosk. Organické sloučeniny které nereagují s žádnou složkou směsi. Nejčastěji používaná plniva jsou.

- a) **Zesíťovaný polystyren XLPS**

Organické tepelně stabilní plnivo. Vyznačuje se nízkou hustotou a proto se velmi málo usazuje. Modely s tímto plnivem jsou rozměrově stálé a pevné.

- b) **Bisfenol A (BPA)**

Organická sloučenina, hojně používaná ve spotřební a potravinářském průmyslu. Vosky plněné Bisfenolem jsou velmi tekuté a můžou být vstříkovány při nižších teplotách. Při teplotách nad 100 °C se ale BPA usazuje

c) Kyselina tereftalová

Plniva s obsahem kyseliny mají vysokou hustotu. Používají se nejčastěji v kombinaci s XLPS. Vosky s tímto plnivem se vyznačují dobrým povrchem, mají ale velký sklon k usazování, proto musí být směs neustále promíchávána.

d) Voda

Voda jako plnivo se využívá velmi často z důvodů nízké ceny. Výsledná směs má velice dobrý povrch a malou náchylnost k tvorbě bublin. U směsí plněných vodou se musí pravidelně kontrolovat teplota směsi, aby nedocházelo k odpařování vody a tím pádem ke generování nesourodých modelů.

Obsah těchto složek určuje jedinečné vlastnosti každé voskové směsi. Volba komponentů ovlivňuje teplotu tavení, viskozitu, teplotní změny objemu, mechanické vlastnosti a další parametry směsí. Porozumění vlastnostem složek a jak spolu jednotlivé složky reagují je zásadní pro správnou funkci vosku a pro splnění parametrů sléváren.

2.3.2 Dělení voskových směsí [9], [14], [15], [18]

Voskové směsi můžeme dělit podle jejich způsobu použití. Liší se mezi sebou především teplotní roztažností a čistotou. Jelikož se stromeček skládá z různých částí: nálevka, vtoková soustava, vtoky a model, používáme na tyto části vosky odpovídající kvality. Směsi dělíme do následujících tří hlavních skupin.

- **Vosky na modely**

Na modelové vosky jsou kladeny největší nároky ze všech typů vosků, především na jejich teplotní roztažnost. Pokud je tepelná roztažnost vosku příliš velká, tak při vytavování vosk poničí keramickou skořepinu a znemožní její použití. Modelový vosk musí mít ideální viskozitu, aby zaplnil všechny dutiny formy a také dobré mechanické vlastnosti. Většina modelových vosků se dá nadále regenerovat a rekonstituovat, což bude vysvětleno níže. Pro turbínová kola se používají takzvané panenské modelové vosky, což jsou vosky, které jsou nové a nerecyklované. Modelové vosky dále dělíme na

a) Plněné vosky

Jsou to vosky, do kterých se přidává organický prášek (plnivo) nerozpustný v základní směsi. Je důležité zachovat podobnou hustotu plniva a původní směsi, aby nedocházelo k sedimentaci. Plnivo výrazně omezuje teplotní roztažnost vosku, což můžeme vidět na grafu 1. Díky tomu je vosk použitelný na tenkostěnné modely a nedochází k lámání modelů.

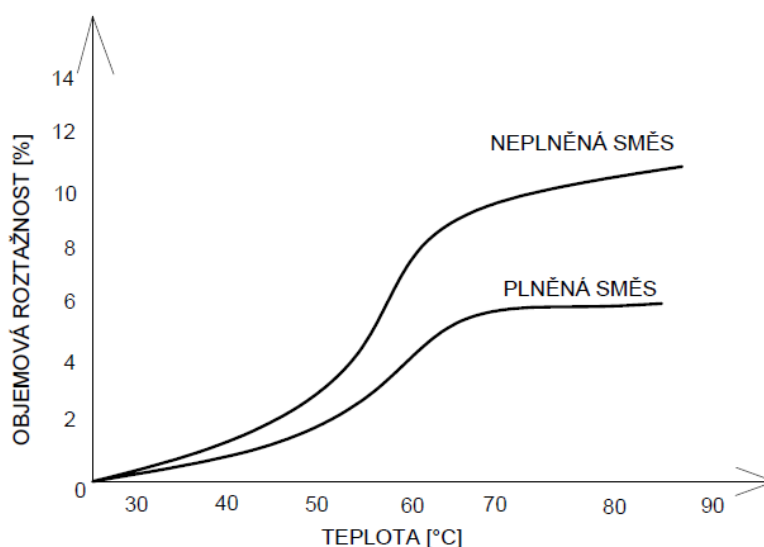
Tento typ vosků bývá používán na výrobu modelů turbínových kol, především vosky značek Blayson a Remet. Tyto vosky vynikají velice dobrou kvalitou povrchu a vysokou rozměrovou stabilitou.

b) Neplněné vosky

Přímé neboli neplněné vosky jsou směsi mnoha vosků a pryskyřic. Umožňují snadnou regeneraci a vynikají vysokou kvalitou povrchu. Může u nich ale docházet k stahování při chladnutí vosku a tím dojít k porušení modelu.

c) Emulgované vosky

Jsou to neplněné vosky, které se plní ze 7-12 % vodou. Voda zajistí, že je povrch modelů výjimečně hladký a také plní funkci plniva, proto se vyskytuje méně staženin.



Graf 1. Vliv plniv na teplotní roztažnost směsi [4].

- **Vosky na vtoky a vtokové soustavy**

Vtokové vosky slouží k výrobě vtokové soustavy modelu. Nedosahují takové kvality jako modelové vosky a není u nich tak velký požadavek na změnu objemu při vytavování. Obsahují velice málo nebo žádné plnivo. Jejich teplota tavení je nižší, než teplota tavení modelových vosků, z důvodů odtoku vosků ze skořepiny při vytavování. Vtokový vosk se roztaví dříve, aby mohl modelový vosk vytéct.

- **Regenerované a rekonstituované vosky**

Regenerovaný vosk je jednoduše přefiltrovaný modelový nebo vtokový vosk. Z vosku jsou odfiltrovány nečistoty a nežádoucí částice, které se do něj dostanou při vytavování ze skořepiny. Kvality tohoto vosku neodpovídají již původním hodnotám a proto se používá jako vosk vtokový a nebo na modely, kde není požadovaná taková kvalita.

Rekonstituce vosku je proces, při kterém je modelový vosk po použití přefiltrován a doplněn o chybějící složky, které vrátí vosku původní vlastnosti. Rekonstituci vosku provádí dodavatel voskové směsi. V některých případech ale nemusí být rekonstituce stoprocentní, proto se na výrobu turbínových kol používají většinou pouze vosky čisté neboli panenské.

2.4 Sestavení voskových modelů [3], [9]

Modely se vyrábějí jednotlivě a musí se připojit na vtokovou soustavu. Modely se připevňují na vtokové kúly pomocí pájení nebo lepení. Podle typu rozmístění modelů rozlišujeme dvě základní uspořádání.

- **Sestavování jednotlivých modelů**

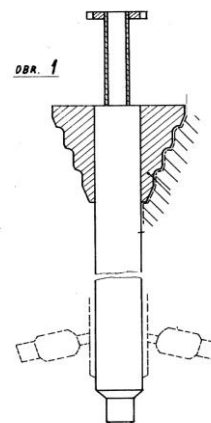
U větších modelů a u odlitků, kde jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a rozměrovou přesnost, umísťujeme ke každému modelu vtokovou soustavu zvlášť. Model se pájením připevní na vtokový kůl viz obr. 13, který je tvořen ze vtokového vosku, aby se při vytavování oddělil od skořepiny.

- **Sestavování modelů do stromečků**

Modely menších rozměrů umísťujeme na vtokové kúly ve větším množství do takzvaných stromečků (obr. 12). Toto uspořádání je ekonomičtější a vede k větší produkci odlitků. Při umísťování modelů na stromeček se musí dbát na správné rozložení. Špatné umístění způsobí nesourodý nános obalové hmoty, což může vést k nerovnému chladnutí odlitků.



Obrázek 12. Sestavení do stromečku [19].



Obrázek 13. Vtokový kůl s nálitkem [20].

3 KERAMICKÁ SKOŘEPINA [1], [3], [9]

Keramická skořepina (obr. 14) je pro výrobu odlitků metodou přesného lití velmi důležitým faktorem. Právě díky skořepině jsme schopni touto metodou vyrábět širokou škálu tvarů odlitků a používat k výrobě velké množství slitin.

Forma je tvořena ze dvou základních složek a to keramické suspenze a posypového materiálu. Výsledná forma musí být pevná a odolná kvůli manipulaci před samotným odléváním, stejně jako resistantní vůči rozpínání vosku při jeho vytavování a musí odolat silám působícím na formu při finálním odlévání kovu. Zásadním kontrolovaným parametrem je rozměrová změna skořepiny v průběhu sušení, skladování, žhání, odlévání a chladnutí. Rozměrové změny nesmí být příliš velké, aby nenastalo porušení formy a tím pádem její znehodnocení.



Obrázek 14. Keramická skořepina [21].

3.1 Keramická suspenze [3], [9]

Keramická suspenze neboli břecha je disperzní sousta tvořená pevnými částicemi (plnivo) rozptýlenými v kapalném prostředí (pojivo). Tyto dvě složky jsou smíchány v namáčecí nádobě. Po smíchání břechy dojde k odstání, kdy se zrna plniva smočí. Do břechy se následně namáčí voskové modely.

Plnivo neboli moučky jsou žáruvzdorné materiály, které se používají k obalování modelů. Velký význam mají u primárních a sekundárních obalů, které mají hlavní vliv na jakost povrchu odlitku. Posypové moučky se používají v různých hrubostech, nejčastěji však přibližně 200-325 mesh (americká jednotka velikosti zrn udávající počet ok síta na jeden čtvereční palec). Hrubost mouček má vliv na propustnost plynů, nanášení dalších vrstev a mechanické vlastnosti. Pro výběr vhodného materiálu jsou směrodatné určité vlastnosti a to tepelná roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost vůči odlévaným kovům. Mezi používané materiály patří hlavně kysličníky Al_2O_3 a ZrO_2 . Z křemičitanů se nejčastěji využívá zirkonu, silimanitu a především molochitu.

Pojivo čili vazná kapalina tvoří prostředí pro plnivo. Pojivo nesmí snižovat žáruvzdornost formy a musí být netečné k žáruvzdornému materiálu a odlévanému kovu. Dále musí dávat formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vyžhání. Nejčastěji je využíváno koloidních roztoků SiO_2 a organických sloučenin. Pojiva máme dvojího typu.

a) Alkoholová pojiva

Tyto pojiva jsou řídké roztoky v kyselém prostředí. Pomocí chemických reakcí se hlavní složka pojiva za přítomnosti katalyzátoru štěpí na oxid křemičitý a alkoholy. Vzniklé můstky se spojí a po vypaření alkoholu vzniká sol a poté gel. Gelová vrstva tvořená amorfním SiO_2 následným sušením dehydratuje a při vyžhání formy přejde do krystalické formy. Výhodou alkoholových pojiv je krátká doba sušení a vysoká pevnost za syrova. Pojivo na alkoholové bázi se používá na sekundární vytvrzovací obaly na robotické obalovací lince.

b) Vodní pojiva

Základem koloidního roztoku vodního pojiva jsou částice SiO_2 . Na základě změny pH v momentě přisypávání moučky do pojiva začnou koloidní částice oxidu křemičitého gelovat. Gelová vrstva následným sušením dehydratuje a při vyžhání formy přejde do krystalické formy. Mezi výhody vodního pojiva patří rovnoměrná tloušťka nanesené vrstvy a možnost použití jak v primárním, tak sekundárním stupni obalování. Nevýhoda je dlouhá doba sušení a nižší pevnost za syrova.

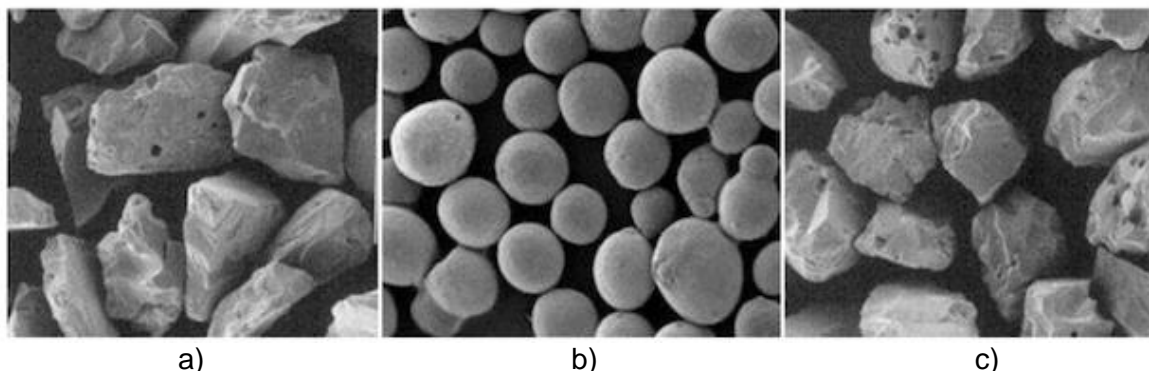
3.2 Posypový materiál [3], [9], [22]

Posypový materiál, neboli ostřivo, tvoří více než 90 % keramické skořepiny. Vlastnosti ostřiva určují charakter skořepiny. Z chemického hlediska můžeme ostřivo rozdělit na oxidy a křemičitany. Ostřivo nanášíme v několika vrstvách, přičemž velikost zrn postupně stoupá s každou vrstvou od setin milimetrů až po milimetrové rozměry. Jemná zrna vyplní dutiny, hrubší zvětšují pevnost. Keramická skořepina by měla mít po celém obvodu stejnou tloušťku, vyhovující pevnost a prodyšnost. Pro ideální přilnutí prvních vrstev jsou používány zrna křehlovitého tvaru. Pro zesilovací obaly se používají zrna ostrohranná.

• Posypový materiál na bázi oxidů

Nejčastěji využívaným materiálem je oxid křemičitý SiO_2 , především kvůli jeho nízké ceně a vysoké dostupnosti. Jeho tepelná roztažnost je ale velká a při vyžhání musíme postupovat pomalu s prodlevami.

Dalším často používaným posypovým materiálem je korund. Korund je vhodný zvláště díky své vysoké žáruvzdornosti a tvrdosti. Modifikací korundu můžeme dostat i jeho další typy a to tubulární, kuličkový, hnědý a bílý tavený. Strukturu jednotlivých modifikací můžeme vidět na obrázku 15.



Obrázek 15. Různé modifikace korundu a) tubulární b) kuličkový c) bílý tavený [23].

- **Posypový materiál na bázi křemičitanů**

Dlouhodobě využívaným spolehlivým materiálem je zirkon. Přirozeně se vyskytuje jako zaoblené zrno písku. Používá se především jako plnivo do primárních obalů, jelikož z důvodů vynikající žáruvzdornosti a jemnozrnné struktury nereaguje s odlívaným kovem a zamezuje spékání keramiky.

Dalším zástupcem křemičitanů je molochit. Molochit není běžnou surovinou, je to křemičitan hlinitý (Al_2SiO_5) vyráběný kalcinací speciálně vybraných kaolinů. Pečlivě provedená kalcinace převádí kaolin do směsi mullitových zrn obalených amorfním kyslíčným křemičtým. Kde mullit je zastoupen 56 % a amorfni oxid křemičitý 44 %. Molochit se vyznačuje nízkou, rovnoměrnou tepelnou roztažností a výbornou odolností proti tepelným šokům.

Výhodou těchto materiálů je odolnost vůči teplotním šokům, a proto je možné žíhání forem vést bez zbytečných prodlev, ne jako v případě oxidu křemičitého.

3.3 Výroba keramické skořepiny [3], [9], [24]

Postup výroby keramické skořepiny se odehrává v několika krocích. Stromečky s modely jsou nejdříve odmaštěny, následně jsou namočeny do břechky a je na ně ve vrstvách nanášen posypový materiál. Tento proces se opakuje, dokud forma nemá požadovanou tloušťku. Následně je forma vysušena a vytvrzena a to buď na vzduchu nebo pomocí chemických vytvrzovadel. V dalším kroku je vytaven vosk ze skořepin. Na závěr je forma těsně před odlitím kovu vyžihána v peci.

- **Odmaštění**

Před namáčením do keramické suspenze se stromečky s modely musí zbavit nečistot, které se na nich usadili v průběhu připevňování modelů nebo při uskladnění. Pokud není povrch stromečku ideálně čistý, nepřilehne na něj primární vrstva obalu, což může vést k popraskání skořepiny nebo k produkci zmetkových odlitků. Odstranění nečistot ze stromečku se provádí ponořením do odmašťovačla a okamžitým opláchnutím v etylalkoholu, stromeček je následně vysušen na vzduchu.

- **Příprava keramické suspenze**

Suspenze se vytvoří smícháním pískových mouček a pojiva. Za stálého míchání je do pojiva nasypáno určité množství žáruvzdorného materiálu. Břečka je následně ponechána v klidu, aby z ní unikl přebytečný vzduch.

U turbínových kol s řízenou krystalizací se do břečky přidává hlinitan kobaltnatý z důvodů podpory růstu krystalizačních zárodků na stěnách skořepiny. Vnitřní strana formy má poté typickou namodralou barvu (obr.16).



Obrázek 16. Skořepina s hlinitanem kobaltnatým [11].

- **Obalování**

Obalování je nejdůležitější částí procesu výroby skořepiny. Kvalita provedení obalu je kritická pro správnou funkci skořepiny. Postup při obalování je následující. Odmaštěné stromečky se namáčejí do kádě s keramickou suspenzí, otáčením stromečků v kádi se odstraní vzduchové bubliny a břečka rovnoměrně pokryje všechny jeho části. Po dostatečném namočení následuje nanesení posypového materiálu. Stromeček je vytáhnut z kádě s břečkou a je vložen do posypového zařízení, kde se fluidním nebo sprchovým procesem nanese posypový materiál. V současné době se v této části výroby stále více uplatňuje robotizace procesu (obr. 17). Hrubost obalového materiálu stoupá s každou vrstvou a proces se opakuje 10-12 krát podle potřeby.

- **Sušení a vytvrzování**

Po nanesení keramického obalu následuje vysušení skořepiny. Vysušování probíhá buď přirozeným odpařováním látek z obalu, neboli přeměna solů v gel, nebo chemickým vyvoláním tohoto procesu a následným odpařením. Při odpařování pojiv s vodním základem je důležité udržovat v místnosti proud vzduchu a vlhkost v rozmezí 50-70 %, aby skořepina schla rovnoměrně. U odpařování pojiv na alkoholové bázi se musí udržovat teplota 21-25 °C spolu s relativní vlhkostí 60 %. Proces odpařování lze urychlit pomocí čpavkových par.



Obrázek 17. Robotizace obalování [25].

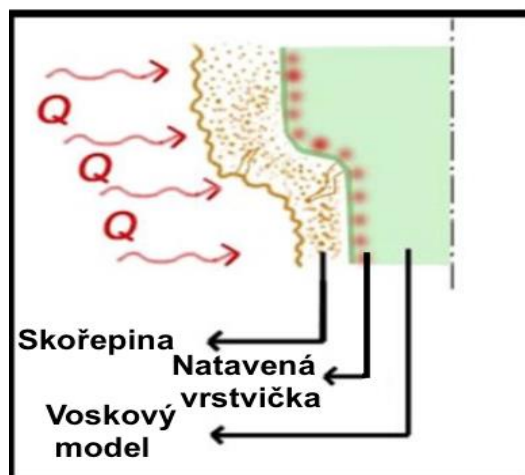
- **Vytavování vosku**

Po důkladném vytvrzení skořepiny následuje odstranění voskových částí modelu vytavením. Vytavení může být dosaženo různými postupy, vysokou teplotou, nízkou teplotou, dielektrickým ohřevem. Nejčastěji se však využívá vytavování v bojlerklávech a autoklávech (obr. 18).

V těchto zařízeních dochází k vytavení přehřátou párou při zvýšeném tlaku. Tento způsob pracuje na principu teplotního šoku. Přehřátá pára (180 °C) nahnaná do autoklávu způsobí natavení tenké vrstvy, díky které má voskový model prostor pro malé zvětšení objemu a neporuší tak skořepinu (obr. 19). Zvýšený tlak (10 bar) napomáhá rychlému prostupu tepla skořepinou a tím i snadnému vytavení. Doba vytavení se pohybuje mezi 10-25 minutami.



Obrázek 18. Bojlerkláv FCV [26].

Obrázek 19.
Schéma vytavení vosku [27].

• Žihání forem

Skořepinové formy je před odléváním nutno vypálit. Vypálená forma je schopna odolávat vysokým teplotám a může do ní být odlito velké spektrum materiálů. Žihání probíhá nejčastěji v odporových pecích (obr. 20) a provádí se těsně před odléváním kovu do skořepiny.

Prvním důvodem vypalování skořepin je odstranění zbytků vosku, který neodtekl při vytavování a odstranění těkavých látek. Dalším důvodem vypalování je převedení amorfni formy vrstvy SiO_2 na formu krystalickou neboli zhutnění keramiky.

Skořepina by měla v peci zůstat po dobu nejméně jedné hodiny, většinou déle, přičemž teplota vypalování se pohybuje mezi 1000-1100 °C. Rychlost náběhu na teplotu, a tím pádem i doba vypalování, se liší v závislosti na materiálu skořepiny. U forem z křemenných písků musí být prohřívání pozvolné, jinak by mohlo dojít k porušení skořepiny. Formy, kde byl použit jako obalový materiál zirkon, korund, molochit nebo tavený křemen, můžeme vkládat do pecí při vyšších teplotách. Tím se značně zkrátí čas pobytu formy v peci a urychlí se celý proces výroby odlitku. Po vyžihání je forma připravená k odlévání kovu.

Formy můžeme vypalovat i takzvaným dvojitým vypalováním z důvodu kontroly forem na praskliny. Pro první žihání se používá nižší teploty pro vypálení vosku a nečistot. Po zchlazení formy je provedena zmíněná kontrola a poté již může být forma vyžihána na vyšší teplotu před odléváním.

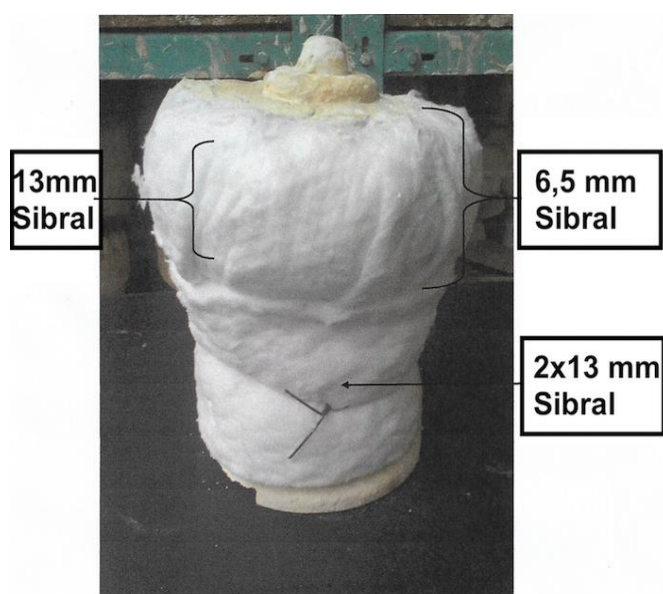


Obrázek 20. Žihací pec [11].

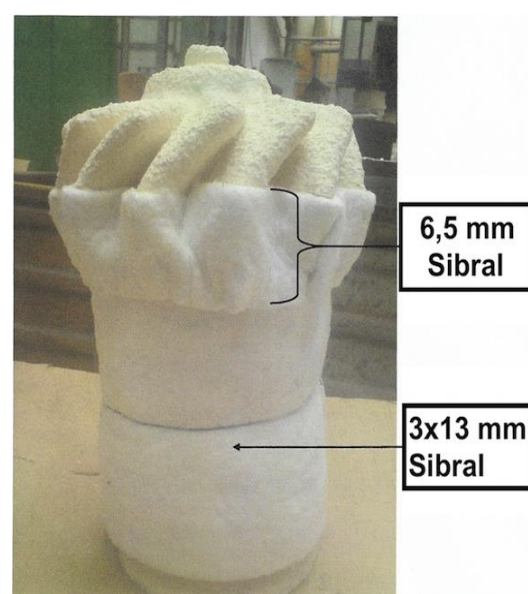
- **Obalování forem**

Pro dosažení co nejvyšší kvality u větších odlitků turbínových kol se formy v některých případech obalují žáruvzdornými izolačními rohožemi. Izolace nám umožní lepší prohřátí skořepiny a pozvolnější chladnutí v požadovaných částech odlitku.

Pro tyto účely se používá izolační vata Sibral. Skořepina se obaluje tlustší vrstvou v okolí nálitku a poté tenčí vrstvou v oblasti lopatek. Lopatky můžou být zabalené celé (obr. 21) nebo do půlky (obr. 22) záleží na typu odlévaného kola.



Obrázek 21. Izolace skořepiny [11].



Obrázek 22. Izolace skořepiny [11].

4 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY [28], [29], [30]

Základní charakteristikou prostředí, ve kterém turbínová kola (obr. 23) plní svoji funkci, je vysoká pracovní teplota. Proto nejdůležitějším požadavkem na materiály používané pro jejich výrobu je žárupevnost, tedy schopnost odolávat mechanickému namáhání při co nejvyšších teplotách a tím zajistit vysokou účinnost a výkon součástí. Spolu s touto vlastností musí mít slitina vyhovující žáruvzdornost, odolnost proti korozi, vysokou únavovou pevnost, houževnatost, atd. Vzhledem k těmto skutečnostem jsou slitiny používané pro turbínová kola špičkou v metalurgickém odvětví a jejich vlastnosti se neustále zlepšují.

Počátek vývoje žárupevných slitin se váže k druhé světové válce, kdy se začaly vyrábět první části spalovacích turbín do letadel. Z počátku se používaly slitiny kobaltu a to především v USA a slitiny niklu s chromem v Evropě. Postupně se přidaly i slitiny na bázi titanu. V současné době se nejčastěji používají superslitiny na bázi niklu a slitiny titanu.



Obrázek 23. Kolo turbodmychadla ze slitiny Inconel 713LC [31].

4.1 Niklové superslitiny [32], [33], [34]

Superslitiny jsou slitiny, které se používají pro součásti pracující za teplot nad 650 °C, kde již nelze využít pouze žáruvzdorných ocelí. Vyznačují se vysokou žárupevností a rozměrovou stabilitou za vysokých teplot. Základem niklových slitin je prostorově středěná fáze γ na bázi tuhého roztoku Ni-Cr. Hlavními přísadovými prvky jsou Al a Ti, které tvoří vytvrzující fázi γ' . Dalšími legujícími prvky jsou Cr, Mo, W, Ta a další, které přispívají ke zpevnění matrice a zvyšují rozměrovou stabilitu. Z důvodů vysoké afinity prvků obsažených ve slitině se její tavení a lití provádí ve vakuových pecích. Tyto slitiny mohou být při mechanickém zatěžování vystaveny teplotám blízcím se 1000 °C.

K zlepšení vlastností odlitků z niklových superslitin je možno využít tepelného zpracování, při kterém roste podíl fáze γ' . S rostoucím podílem této fáze stoupá i žáruvzdornost, současně však klesá tvárnost, díky čemuž jsou slitiny velmi obtížně opracovatelné. V současné době jsou nejvíce využívány slitiny typu Inconel a také relativně nová pokročilá slitina MAR-M-247.

4.1.1 Charakteristika vybraných slitin [34], [35], [36]

- **IN 713 LC**

Je to nízkouhlíková modifikace slitiny IN 713 C. Patří mezi první slitiny u nichž byla použita vakuová technologie. Snížení podílu uhlíku vedlo k úbytku nežádoucích karbidů ve struktuře a k zlepšení materiálových charakteristik (především plasticity). Nevyžaduje tepelné zpracování.

Tabulka 1. Chemické složení slitiny IN 713 LC [11].

Obsah prvků [hm. %]											
Cr	Mo	C	Si	S	Zr	Nb	Ta	Al	B	Ti	Ni
11-13	3,8-5,2	0,03-0,07	Max 0,5	Max 0,015	0,05-0,15	-	-	5,5-6,5	0,005-0,015	0,4-1	báze

- **IN 738 LC**

Je to nízkouhlíková modifikace slitiny IN 738 C. Ve srovnání s IN 713 LC je vývojově mladší. Díky nízkému obsahu karbidů je redukován obsah karbidů ve struktuře. Výhodou je lepší odolnost proti vysokoteplotní korozi než u IN 713 LC a to především zásluhou vyššího obsahu chromu. Vysoký podíl chromu ale snižuje žárupevnost, proto musí být slitina tepelně zpracována, aby se zvýšil podíl fáze γ' .

Tabulka 2. Chemické složení slitiny IN 738 LC [11].

Obsah prvků [hm. %]											
Cr	Mo	C	Si	S	Zr	Nb	Ta	Al	B	Ti	Ni
15,7-16,3	1,5-2,0	0,09-0,13	Max 0,3	Max 0,015	0,03-0,08	0,6-1,1	1,5-2,0	3,2-3,7	0,007-0,012	3,2-3,7	báze

- **IN 792-5A**

Je to slitina vývojově mladší než IN 738 LC. Vyznačuje se vyšší žárupevností než IN 738 LC. Tato slitina se vyskytuje ve více provedeních a to IN 792-5B a IN 792-5C, které obsahují navíc hafnium pro zvýšení žáruvzdornosti. Stejně jako u IN 738 LC je vyžadováno tepelné zpracování slitiny.

Tabulka 3. Chemické složení slitiny IN 792-5A [11].

Obsah prvků [hm. %]											
Cr	Mo	C	Si	S	Zr	Nb	Ta	Al	B	Ti	Ni
12–13	1,65–2,15	0,06–0,10	Max 0,2	Max 0,015	0,01–0,05	Max 0,5	3,85–4,5	3,15–3,6	0,01–0,02	3,75–4,2	báze

- **MAR-M-247**

Je to slitina vývojově nejmladší ze všech uvedených patřící mezi pokročilé superslitiny. Její specifické chemické složení zajišťuje vysoký podíl fáze γ' , dodatečné zpevnění fáze γ pomocí vysokého obsahu wolframu, zvýšení žárupevnosti pomocí hafnia a zpevnění hranic zrn díky legování borem. Ve srovnání s IN 713 LC vykazuje lepší pevnostní charakteristiky a tažnost. Při teplotách vyšších než 800 °C se uvádí o 100 MPa vyšší hodnota meze kluzu než u slitiny IN 792-5A. Podobně jako u předešlých slitin je možné vylepšení vlastností pomocí tepelného zpracování.

Tabulka 4. Chemické složení slitiny MAR-M-247 [11].

Obsah prvků [hm. %]												
Cr	Mo	C	Si	W	Zr	Nb	Ta	Al	B	Ti	Hf	Ni
8,2–8,6	0,6–0,8	0,14–0,16	Max 0,0,1	9,8–10,2	0,03–0,06	Max 0,1	2,9–3,1	5,4–5,6	0,01–0,02	0,8–1,2	1,2–1,6	báze

4.2 Slitiny titanu [37], [38], [39]

Již od počátku prvního průmyslového použití titanu bylo pole jeho působnosti u součástí, které byly vystavené extrémnímu zatížení. Díky svým pozitivním vlastnostem jako jsou korozivzdornost, erozní odolnost, nízká hustota a odolnost proti vysokým teplotám se slitiny titanu uplatňují především u velmi namáhaných součástí u kosmických technologií a v leteckém průmyslu.

U titanu se objevují dvě alotropické modifikace lišící se krystalickou mřížkou a to α a β . Vzhledem k této skutečnosti můžeme dělit slitiny titanu do následujících 4 skupin.

- **Slitiny α**
- **Slitiny β**
- **Slitiny $\alpha + \beta$**
- **Intermetalika**

Využití těchto slitin se výrazně liší z důvodů jejich odlišných vlastností. Pro náš účel slévárenské technologie přesného lití je nejvíce vhodná poslední zmíněná skupina a to intermetalika

4.2.1 Slitiny $\alpha + \beta$ [38], [39]

Slitiny této skupiny kombinují vlastnosti modifikací α a β . Jsou tvořeny rovnoosými zrny nebo lamelami obou typů tuhých roztoků. Vyznačují se vysokou pevností, velkou tepelnou stabilitou, odolností proti korozi a dobrou svařitelností. Nejvýznamnější slitinou z této oblasti je Ti6Al4V.

- **Ti6Al4V**

Tato slitina je nejvíce využívanou titanovou slitinou v průmyslu. Její výroba spotřebuje až 45 % veškeré produkce titanu. Z důvodů svých skvělých vlastností jako pevnost, odolnost a výborná korozivzdornost nachází uplatnění ve výrobě součástí pro letecký průmysl, turbínových kol, lopatek kompresorů a jiné. Její chemické složení můžeme vidět v tabulce 5.

Tabulka 5. Chemické složení slitiny Ti6Al4V [41]

Obsah prvků [hm. %]								
O	N	C	H	Al	V	Fe	Ti	Ostatní
0,02	0,05	0,01	0,013	5,50-6,75	3,50-4,50	0,3	Báze	0,4

4.2.2 Intermetalika [38], [39], [40], [42]

Intermetalika, čili slitiny, které jsou vzhledem k vysokému obsahu legujících prvků tvořena pouze intermetalickými fázemi. Jejich krystalická struktura a mechanické vlastnosti jsou většinou velmi odlišné od prvků, které je tvoří. U titanu pozorujeme především dva typy intermetalik a to nitrinoly, které jsou na bázi TiNi a aluminidy na bázi TiAl.

- **Slitiny TiAl**

Slitiny TiAl neboli aluminidy se vyznačují vysokou žárupevností a žáruvzdorností, korozní odolností, nízkou hustotou a tedy i nízkou hmotností. Nízká hmotnost je docílena především vysokým obsahem hliníku (45-50 %). Spolu s hliníkem tvoří strukturu i legující prvky jako Nb, Cr, V a další.

Intermetalik na bázi TiAl se vyvinulo veliké množství, za zmínku však stojí především tyto dvě: γ -TiAl a Ti₃Al. V tabulce 6. vidíme porovnání obou intermetalik s niklovými superslitinami. Můžeme vidět, že slitiny TiAl dosahují srovnatelných hodnot modulu pružnosti a pevnosti. Největší rozdíl je v hustotě slitin, kde slitiny TiAl jasně dominují. Při bližším pohledu na obě intermetalika ale zjistíme, že γ -TiAl má nižší hustotu a větší stabilitu fáze při vysokých teplotách a je tedy častěji využíváno.

Tabulka 6. Srovnání vlastností Ti_3Al a γ -TiAl s Ni-superslitinami [42].

Slitina	Ti_3Al	γ -TiAl	Ni-superslitiny
Hustota [g.cm ⁻³]	4,1 - 4,7	3,4 - 4	8,3
Youngův modul [GPa]	120 - 145	160 - 175	200
Tažnost [%]	2-5	1-3	3-5
Mez pružnosti [MPa]	700 - 900	400 - 650	1100
Teplotní vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	7	22	11
Max. teplota stability fáze [°C]	1180	1440	1450
Limit Creepu [°C]	750	900	1090

- **Intermetalikum gamma TiAl**

Slitiny na bázi γ -TiAl patří kvůli svým dobrým vlastnostem mezi nejpoužívanější aluminidy. V jejich chemickém složení zaujímá nejvyšší podíl hliník v rozmezí 44-48 %, dále se objevují legující prvky jako V, Mn, Mo a Cr, které zvyšují tažnost a pevnost fáze gama za nižších teplot a prvky Ta, W a C, které zpevňují tuhý roztok a zvyšují pevnost fáze při vyšších teplotách.

Intermetalické slitiny γ -TiAl se velmi často používají jako materiál pro výrobu turbínových kol turbodmychadel. Bylo zjištěno, že vykazují lepší odolnost proti únavovému namáhání a také creepovou odolnost než niklové superslitiny, což je u této součásti velmi důležitý faktor. Další pozitivní vlastností je, že díky nízké hustotě, tím pádem nižší hmotnosti odlitku má oběžné kolo rychlejší odezvu a může dosáhnout i vyšších otáček.

5 ODLÉVÁNÍ [28], [34], [43]

Na kvalitu přesně litých odlitků turbínových kol jsou kladeny mimořádně vysoké nároky. Limitován je především výskyt nekovových vměstků v tenkých listech lopatek. Materiály, které jsou používány na výrobu kol mají vysokou afinitu s kyslíkem a proto by při tavení v konvenčních pecích docházelo k jejich nežádoucí oxidaci. Z těchto důvodů se odlévání turbínových kol provádí ve speciálních vakuových indukčních pecích (obr. 24).

Pro udržení nízkého výskytu vměstků je důležité zajistit nízký parciální tlak plynů obsažených ve vzduchu, především kyslíku a dusíku, nad hladinou slitiny. Tlak v pracovním prostoru pece je dán ustavením dynamické rovnováhy mezi rychlostí odčerpávání vzduchu a zavzdušňováním pece netěsnostmi.

Tavení a odlévání žárupevných slitin ve vakuu je nezbytností. Ve vakuových pecích mohou být odlévány prakticky jakékoliv slitiny. Odléváním ve vakuu získávají výsledné odlitky velice kvalitní povrch a tím se snižují požadavky na jejich opracování. Vakuum také napomáhá v zabíhání odlévaného materiálu a proto mohou být odlévány tvarově velmi složité odlitky.



Obrázek 24. Vakuová Indukční pec ve firmě PBS [44].

5.1 Typy vakuových pecí [28], [34], [45], [46], [47]

Vakuové pece jsou výrobcům dodávány v různých konstrukčních variantách. Podle uspořádání komor dělíme pece na vakuové pece pracující periodicky, čili jednokomorové a vakuové pece pracující nepřetržitě, tedy dvoukomorové.

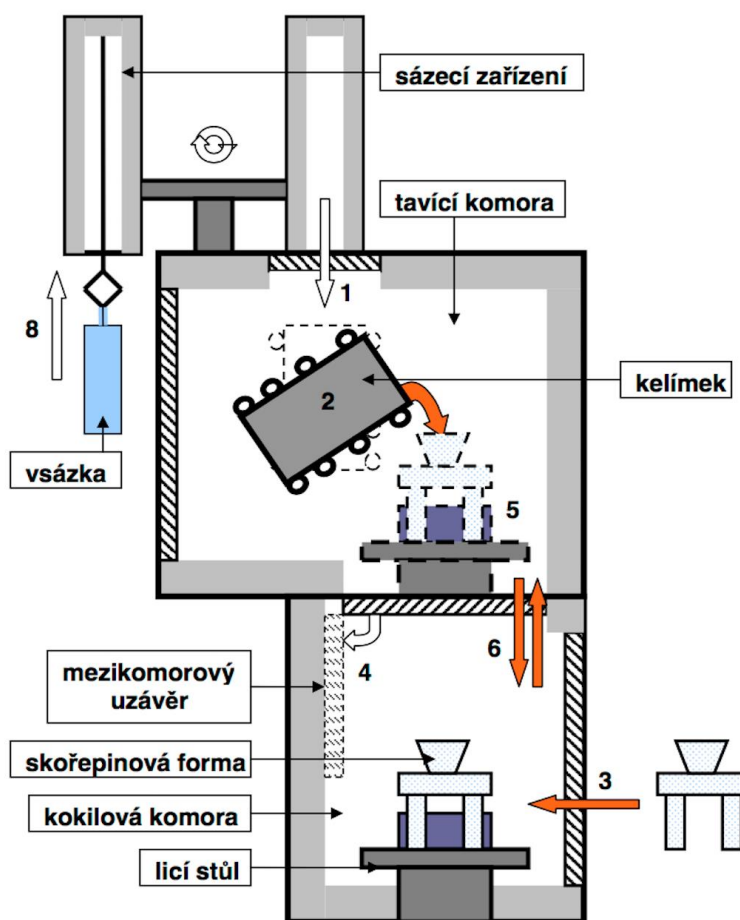
- **Vakuové pece jednokomorové**

U tohoto typu vakuových pecí dochází v každém cyklu k zavzdušnění lící komory. Tavba a odlití kovu do skořepiny je provedeno ve vakuu, poté se komora otevře, skořepina je vyjmuta a nahrazena novou. Poté je komora opět uzavřena, je z ní odčerpán vzduch a proces se opakuje.

Tento typ pecí se z důvodu neefektivity používá ve slévárnách jen zřídka, jeho využití najdeme spíše v laboratořích.

- **Vakuové pece dvoukomorové**

U dvoukomorových pecí (obr. 25) nedochází k zavzdušnění lící komory po každém cyklu. Výměna skořepin je prováděna v druhé komoře, která je oddělena nepropustnou přepážkou. Po odlití se plná skořepina spustí na pohyblivém stole do druhé komory. Uzavře se přepážka a skořepina je vyměněna za prázdnou. Po výměně skořepin je v druhé komoře odčerpán vzduch. Při dosažení stejného tlaku, jako v lící komoře, se uvolní přepážka a stůl s prázdnou skořepinou se vysune do lící komory. Doba výměny je využita pro natavení další vsázky. Díky tomuto principu může pec pracovat nepřetržitě.



Obrázek 25. Schéma dvoukomorové indukční pece [43].

Vakuové pece můžeme také dělit podle typu tavicího kelímku. Rozlišujeme zde dvě hlavní provedení a to metodu ISM neboli Induction Skull Melting a vakuová pec s keramickým kelímkem.

- **Induction Skull Melting**

Tato technologie umožňuje tavení vsázky v kelímku tvořeného měděnými lamelami, které jsou chlazeny vodou (obr. 26). Měděný kelímek minimalizuje možnost reakcí mezi taveninou a kelímkem, což limituje tvorbu nežádoucích vměstků v tavenině. Další předností metody ISM je, že magnetické indukční pole, které natavuje vsázku, ji zároveň intenzivně promíchává a tím je docíleno rovnoměrného natavení slitiny. Na druhou stranu nevýhody jako je vysoká pořizovací cena, špatná účinnost a velká spotřeba vody na chlazení převyšují kladné vlastnosti ISM a proto není její využití tolik rozšířené.



Obrázek 26. Vakuová pec s technologií ISM [48].

- **Vakuová indukční pec s keramickým kelímkem**

U tohoto typu vakuových pecí se provádí natavení vsázky v keramickém kelímku. Výhody můžeme hledat v nižší pořizovací ceně, než u pecí s technologií ISM, dále větší efektivitě a nižší energetické náročnosti. Avšak při tavení titanových a niklových žárupevných slitin se u pecí s keramickým kelímkem velmi často objevují nežádoucí reakce, které probíhají mezi stěnou žáruvzdorného kelímku a taveninou. Tento problém může vést k tvoření vměstků a tím k znehodnocování výsledných odlitků. Řešením tohoto problému může být nanesení povlaku ze stabilnější žáruvzdorniny (CaO , Y_2O_3) na stěny kelímku nebo použitím kelímku z Y_2O_3 .

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem v praktické části bakalářské práce bylo zhotovit odlitek turbínového kola ve školní slévárně Vysokého učení technického v Brně. Tento experiment by měl sloužit k bližšímu seznámení s technologií přesného lití na vytavitelný model a posouzení, zda-li je možné odlít turbínové kolo v podmínkách školní slévárny.

Z důvodů náročnosti celého technologického procesu byla pro účel experimentu dodána keramická skořepina z firmy PBS a.s. a praktická část tedy mohla být cílena pouze na odlití kola.

Kvůli udržení výrobního tajemství nebyly bohužel poskytnuty žádné bližší informace o přesném využití turbínového kola ani výkresová dokumentace. Experiment byl tedy cílen pouze na odlití a posouzení jakosti odlitého kola.

6.1 Příprava skořepiny před odlitím

Jak již bylo řečeno, skořepina (obr. 27) byla dodána z firmy PBS a.s. Na její výrobu bylo použito lihové a vodní pojivo společně s ostřivem ze zirkonové moučky $ZnRiO_4$ a molochitu. Skořepina byla navíc obalená izolační vatou Sibal.



Obrázek 27. Keramická skořepina.

V dalším kroku se provedlo vyžihání skořepiny na 1100 °C. Vyžiháním byly odstraněny zbytky vosku, nečistoty a také byla zvýšena odolnost proti teplotnímu šoku, který by mohl nastat při nalití rozžhaveného kovu do skořepiny.



Obrázek 28. Žíhání skořepiny.

Po vyžhání byla skořepina těsně před odlitím umístěna do licího pole. K zajištění skořepiny proti převrnutí a případnému protečení skořepiny byl použit formovací rám vysypaný pískem, do kterého byla skořepina zasazena.



Obrázek 29. Vyžháná skořepina připravená k odlévání.

6.2 Použitý materiál a odlévání [49]

Turbínová kola se v praxi odlévají z niklových superslitin popřípadě ze slitin na bázi TiAl. Tyto slitiny jsou ale drahé a jejich přesná příprava je velice náročná, proto byla pro experiment použita duplexní ocel.

Duplexní neboli austeniticko-feritické oceli se vyznačují dvoufázovou strukturou austenitu a feritu v poměru blízcímu se 50 % austenitu a 50 % feritu. Mezi jejich přednosti patří dobrá korozivzdornost a vysoké pevnostní charakteristiky.

Pro experiment byla použita ocel s označením A890 Gr4A dle normy ASTM, její chemické složení můžeme vidět v tabulce 7. Tavba byla provedena ve vakuové peci Consarc (obr. 30) pod vedením pana doktora Pernici. Podrobný průběh tavby je znázorněn v tabulce 8.

Tabulka 7. Chemické složení slitiny A890 Gr4A.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
Min	-	-	-	-	-	21,00	4,50	2,50	-	0,10
Max	0,03	1,50	1,00	0,04	0,02	23,50	6,50	3,50	1,00	0,30
Požadavek	0,02	1,00	0,40	0,02	0,01	22,50	5,50	3,00	0,20	0,20

Tabulka 8. Průběh tavby.

Čas	
8:40	Kontrola pece
8:45	Start pece, Ohřev dusíky po 1 hodinu
10:25	Víko nasazeno
10:26	Tavení pod vakuem
10:40	Roztaveno
10:47	Odběr vzorku 360/1 (t=1609 °C)
10:48	Začátek vakuování - Odsátí na 180 mbar a tavení pod vakuem 1l/min Ar
11:01	20 mbar
11:07	Dolegování FeCrN = 2,7 kg, FeSi75 = 0,1kg, Mn kov = 0,48kg
11:12	20-30 mbar
11:18	20-30 mbar
11:21	Konec vakuování
11:24	Otevření pece, odpich 1690 °C, Lití 1570-1565 °C



Obrázek 30. Vakuová pec Consarc s nasazeným víkem při vakuování.

Po natavení vsázky a dolegování byl kov přelit z vakuové pece do licí pánve. Z povrchu byla stažena struska a změřena teplota kovu (obr. 31). Následně bylo provedeno samotné lití (obr. 32).



Obrázek 31. Stažení strusky a měření teploty.



Obrázek 32. Odlití kola.

6.3 Vytlučení skořepiny a otryskání odlitku

Po odlití kola je nutné nechat odlitek dostatečně vychladnout (obr. 33). Vytlučení skořepiny se může provádět minimálně 8 hodin po odlití. Tato doba slouží k dostatečnému ztuhnutí slitiny, aby měl odlitek při odstranění skořepiny již dostatečnou pevnost a nebyl poškozen.



Obrázek 33. Odlitek ve skořepině po vychladnutí.

Po hrubém otlučení skořepiny, které bylo provedeno ručně a za pomoci kladiva a majlíku, byl odlitek otryskán na pneumatickém tryskači. Z otryskaného odlitku (obr. 34) byl na pásové pile odřezán nálitkem a kotoučovou bruskou se zabrousily řezné stopy. Odlitek (obr. 35, 36, 37) byl prozkoumán a následně byly vyvozeny závěry.



Obrázek 34. Otryskaný odlitek s nálitkem.



Obrázek 35. Otryskaný odlitek.



Obrázek 36. Otryskaný odlitek.



Obrázek 37. Otryskaný odlitek.

6.4 Vyhodnocení praktické části [50]

Odlévání tak složitého odlitku, kterým turbínové kolo bezesporu je, v podmínkách školní slévárny je velice složitý úkol. Výroba těchto kol je běžně prováděna ve vakuu a to nejen tavení, ale i samotné odlévání. Právě odlévání ve vakuu je stěžejní pro výrobu kvalitního odlitku.

Už při prvním pohledu na odlitek jsou na povrchu patrné vady. První z nich (obr. 38) je nezaběhnutí slitiny do rohu lopatky. Příčinou této vady je nejspíše příliš velká hustota nebo viskozita odlévané slitiny. Dalším důvodem vady by mohla být nízká teplota žíhání skořepiny. Nezaběhnutí se projevilo pouze u dvou lopatek, můžeme tedy říci, že se pohybujeme na rozmezí zabíhavosti odlívané slitiny pro dané rozměry lopatky. K nezaběhnutí by pravděpodobně nedošlo, pokud bychom použili slitinu určenou k odlévání turbínových kol, tedy některou ze skupiny niklových nebo titanových slitin, jejichž zabíhavost je lepší.



Obrázek 38. Nezaběhnutí slitiny.

Další patrnou vadou je svaštění povrchu, neboli pomerančová kůra, na horní straně odlitku (obr. 39). Tento jev je nejčastěji způsoben dilatačními průhyby skořepinové formy. Tyto průhyby vznikají v důsledku tepelné roztažnosti ostříva. Skořepina se v důsledku jednostranného ohřevu tekutým kovem prohne směrem ke zdroji tepla, poté se narovná a odchýlí. Při odchýlení skořepiny od tuhajícího povrchu odlitku dojde k "vytahování" tuhoucích částí z polotekutého kovu a ke vzniku popsanych vad. Odstranění těchto vad je možné použitím vhodnějšího ostříva, jehož tepelná roztažnost nebude tak velká.



Obrázek 39. Pomerančová kůra.

Nejpatrnější a nejvíce rozsáhlou vadou odlitku jsou však dutiny mezi lopatkami (obr. 40, 41.). Tyto dutiny mohou mít vícero důvodů vzniku. První z nich je, že kov byl do skořepiny nalit příliš rychle a vzduch neunikl přes nalévaný kov ven ze skořepiny a vytvořil v odlitku vzduchové kapsy. Dalším důvodem mohou být exogenní bubliny, které vznikají při odlévání. Tyto vady by se daly pravděpodobně odstranit odléváním ve vakuu, kde tlak plynů v okolí odlitku nepřevýší odpor, který mu klade tuhnucí povrchová vrstva odlitku a díky tomu nedojde k tvorbě bublin.



Obrázek 40. Dutina v odlitku.



Obrázek 41. Dutina v odlitku.

Vady vyobrazené na obrázcích 40. a 41. mohou být způsobeny také staženinami. Ty se objevily i v horní části odlitku u konců lopatek (obr. 42). Staženiny se nejčastěji tvoří v důsledku neschopnosti nálitku dosadit materiál do požadovaných míst a také díky příliš vysoké teplotě lití. Kombinací staženin a vzduchových bublin může dojít k propadlinám natuhlé vrstvy a k vytvoření podobných vad jako na obrázku 42. Odstranění těchto vad je možné zvolením většího nálitku nebo tepelným ošetřením hladiny nálitku, což zvýší jeho dosazovací schopnost.



Obrázek 42. Staženiny.

Vzhledem k hojnému počtu vad v odlitku nedoporučuji odlévat podobné tvary odlitků z této slitiny a tímto způsobem odlévání, i když byla zajištěna vysoká čistota slitiny vlivem procesu vakuování.

ZÁVĚR

Technologie přesného lití na vytavitelný model patří mezi nejpřesnější metody výroby odlitků. Její pomocí jsme schopni dosáhnout rozměrů odlitku tak blízkých konečným, že požadavky na dokončovací operace jsou minimální. Společně s vakuovou technologií odlévání jsme schopni produkce vysoce kvalitních odlitků, které nacházejí využití v těch nejnáročnějších aplikacích jako například turbínová kola turbodmychadel.

Tato bakalářská práce se věnuje literární rešerši na téma výroba turbínového kola metodou přesného lití. Práce je rozdělena do šesti hlavních kapitol, z nichž první obecně popisuje technologii přesného lití. Druhá kapitola je určena výrobě voskového modelu. Jsou zde uvedeny možnosti výroby forem na voskové modely, princip vstříku vosku do forem a podrobněji rozebrány voskové směsi a jejich jednotlivé složky. Ve třetí kapitole je popsán princip výroby keramické skořepiny a jsou uvedeny nejpoužívanější posypové materiály. Je zde také vysvětlen postup při výrobě skořepiny. Čtvrtá a pátá kapitola je věnována nejpoužívanějším materiálům pro výrobu turbínových kol a vakuové technologii odlévání. Popsány jsou chemická složení jednotlivých materiálů a jejich nejčastější uplatnění společně s typy vakuových pecí.

Poslední část práce je zaměřená na praktické odlití turbínového kola ve školní slévárně VUT. Cílem experimentu bylo blíže se seznámit s tavením na vakuové indukční peci, technologií přesného lití a posoudit, zda li je možné v podmínkách školní slévárny turbínové kolo odlít bez vad. Pro experiment byl použit materiál A890 Gr4A, který byt nataven ve vakuové indukční peci. Odlití bylo provedeno bez použití vakuové komory, což mělo zásadní vliv na jeho výsledek. V odlitku se vyskytly četné vady, převážně staženiny, které byly popsány ve vyhodnocení experimentu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, P. R a R. F SMART. *Investment Casting*. London: Institute of Material, Minerals and Mining, 1994. ISBN 9780901716668
2. Turbínová kola. In: *PBS Velká Bíteš* [online]. Velká Bíteš: První brněnská strojírna Velká Bíteš, c2000-2016 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/zakaznicka-odvetvi/doprava/turbinova-kola>
3. DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlitků*. 1. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1976.
4. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2003. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
5. Casting Proces. In: *Ginho Group* [online]. Staffordshire: Ginho Group – Precise Metals, c2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.ginho-group.com/products/casting-process>
6. Casting Proces. In: *ČZ a.s.* [online]. Praha: ČZ, c2013-2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.czas.cz/images/vyrobky/turbo2/voskovka.jpg>
7. HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. *Slévárství*. 2001, 53(10), 570-580. ISSN 0037-6825.
8. OSTRÉZÍ, Barbora. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno, 2017. 41s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
9. HERMAN, Aleš, *Lití na vytavitelný model* [online]. In: . s. 30 [cit. 2018-05-10] Dostupné z: <http://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
10. *Spray formed tooling for rapid manufacture* [online]. In: . [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://users.ox.ac.uk/~pgrant/tooling.html>
11. Materiály dodané nebo vyfocené z firmy PBS a.s.
12. Wax Melters. In: *Shell-O-Matic* [online]. Quebec: Shell-O-Matic, c2017 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://shellomatic.com/products/wax-melters>
13. Innovation in investment casting – Remet. In: *Castings SA* [online]. BA Crawford Specialised Publications (Pty), c2013 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://castingssa.com/innovation-in-investment-casting-remet>

14. Šmíd, Dušan. *Optimalizace technologie vybraných náročných odlitků ze slitin Al*. Brno. 2009. 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
15. ŽUJA, J. *Optimalizace technologie výroby voskových modelů ve firmě Fimes*. Brno. 2015. 84 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
16. Pattern, Runner & System Wax. In: *Casting Wax* [online]. Kent: Remet [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.remet.com/uk/range/wax-room/pattern-runner-wax>
17. Blayson Wax Products. In: *Blayson* [online]. Cambridge: Blayson, c2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.blayson.com/blayson-products/wax>
18. BOND, D., NISHIKAWA, K. *Investment Casting Wax Technology* [online]. 4.1.2006, [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>
19. Understanding Investment Casting - Process Basics. In: *HITCHINER Manufacturing Co* [online]. Milford: HITCHINER Manufacturing Co, c2017 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.hitchiner.com/process-basics>
20. Vtoková soustava pro odlévání metodou vytavitelných nebo spalitelných modelů. In: *Databáza patentov Slovenska* [online]. Slovensko: Databáza patentov Slovenska, 1986 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://skpatents.com/4-232935-vtokova-soustava-pro-odlevani-metodou-vytavitelnych-nebo-spalitelnych-modelu.html>
21. ČEJKA, Libor. *Aplikace metod Rapid Prototyping ve slévárenské technologii lití na vytavitelný model*. Brno. 2011. 36s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Kosour.
22. MOLOCHITE. In: *Imerys Refractory Minerals* [online]. Paris: Imerys Refractory Minerals, c2016 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://imerys-refractoryminerals.com/molochite-2/#toggle-id-4>
23. FRULLI, Danilo, Thomas KRUMREI a Joachim WOLFF. *Latest Trends in Refractory Minerals for Primary and Back-up coats*. IMERYYS, 2013. 45 s
24. JANKŮJ, Luděk. *Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem*. Brno, 2014. 39 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

25. SHELL-O-MATIC AUTOMATES FRANKLIN BRONZE FOUNDRY. In: *Shell-O-Matic* [online]. Quebec: Shell-O-Matic, c2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://shellomatic.com/automates-franklin-bronze-foundry>
26. Boiler-claves. In: *FCR CALDAIE s.r.l.* [online]. Milanese. FCR CALDAIE s.r.l., c2017 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.fcrcaldaie.com/en/boiler-claves>
27. HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
28. ZEMČÍK, Ladislav. *Přesné lití žárových částí spalovacích turbín a turbodmychadel = Investment casting of high temperature parts of gas turbines and turbochargers*. Brno: VUTIUM, 2009, 25 s. ISBN 978-80-214-3844-6.
29. JONŠTA, Zdeněk. *Žárupevné oceli a slitiny*. V Žilině: ZUSI, 2002, 389 s. ISBN 80-968605-6-9.
30. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s.; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3
31. Turbonetics F1 Turbine Wheels. In: *Treadstone Performance* [online]. Miami: Treadstone Performance, c2006 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.treadstoneperformance.com/product.phtml?p=478&cat_key=53&pr_odname=Turbonetics+F1+Turbine+Wheels
32. HYSPECKÁ, Klára. *Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti Ni-superslitiny Inconel 713 LC*. Brno. 2017. 69 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.
33. HAKL, Jan, Tomáš VLASÁK. *Žárupevné vlastnosti vybraných niklových superslitin*. Slévárenství. 2006, LIV, 12, s. 444-452. ISBN 0037-6825.
34. MATOUŠEK, Roman. *Optimalizace lití a tuhnutí axiálních turbínových kol pro dosažení jemnozrné struktury v odlitku*. Brno 2016. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
35. ZYKA, Jiří, Irena ANDRÁŠOVÁ, Karel HRABÁČEK, Antonín JOCH a Božena PODHORNÁ. *Vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti niklové superslitiny MAR-M-247*. Slévárenství. 2016, LXIV(11-12), 414-420.
36. ŠMÍD, Miroslav, Ludvík KUNZ, Karel HRABÁČEK, Antonín JOCH a Pavel HUTAŘ. *Únavové vlastnosti superslitiny MAR-M-247*. Slévárenství. 2013, LXI(9-10), 346-349.

37. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 185 s. [cit. 2018-05-10]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/137.html
38. KUŇÁK, Jiří. *Název: Zlepšování vlastností turbodmychadel aplikací slitin TiAl*. Brno. 2012. 43 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce prof. Ing. LADISLAV ZEMČÍK CSc.
39. ŠUPÁLEK, Milan. *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*. Brno. 2009. 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.
40. NODA, T. Application of cast gamma TiAl for automobiles, *Intermetallics*, 1998, vol. 6, no. 7-8, s. 709-713
41. TITANIUM 6Al-4V Ti 6-4 / Grade 5 (UNS R56400). In: *Titanium Engineers* [online]. Stafford: Titanium Engineers [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.titaniumengineers.com/uploads/1/7/9/5/17957627/us_size_datasheet_final_64_white_nov_2012_new_logo.pdf
42. KÁRNÍK, Tomáš, Miroslav KURSA a Kamil KRYBUS. *Charakteristika intermetalických sloupenin ze systému Ti-Al*. In: *Metal2011* [online]. 2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/615.pdf>
43. ODLOŽIL, Jan. *Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách při odlévání ve vakuu*. Brno. 2009. 101 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka. CSc.
44. Technické vybavení. In: *PBS Velká Bíteš* [online]. Velká Bíteš: PBS, c2000-2016 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/sluzby-zakaznikum/presne-odlitky/technicke-vybaveni>
45. VAŠKO, Michal. *Odlévání turbínových kol ze slitin TiAl*. Brno. 2008. 28 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.
46. CHRONISTER, Donald J., Shelby W. SCOTT, Donald R. STICKLE, Daniel EYLON a Francis H. FROES. Induction Skull Melting of Titanium and Other Reactive Alloys. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 1986, **38**(9), 51-52.
47. *Consarc* In: Induction Skull Melting Furnaces [online]. Rancocas: Consarc, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://consarceng.com/wp-content/uploads/sites/12/2015/04/ism.pdf>

48. Consarc. In: *Two Chamber Horizontal Induction Skull Melting Furnace* [online]. Rancocas: Consarc, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.consarc.com/product_categories/induction-skull-melting-furnaces-ism
49. VALENTA, Pavel. *Vliv chemického složení oceli na strukturu a vlastnosti korozivzdorných ocelí*. Brno. 2013. 74 s, 13 s příloh. Diplomová Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí diplomové práce. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
50. ELBEL, Tomáš, František HAVLÍČEK, Petr LEVÍČEK, Jan ROUS a Karel STRÁNSKÝ. *Vady Odlitků ze Slitin Železa*. 1. Brno: MATEC, 1992.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
Al_2SiO_5	-	Křemičitan hlinitý
Al_2O_3	-	Oxid hlinitý
ASTM	-	American Society for Materials and Testing
BPA	-	Bisfenol A
CAD	-	Computer Aided Design
CAM	-	Computer Aided Manufacturing
CNC	-	Computer Numerical Control
EVA	-	Etylvinil acelát
hm. %	%	Hmotnostní obsah složky ve slitině
ISM	-	Induction Skull Melting
PBS	-	První Brněnské Strojírny
SiO_2	-	Oxid křemičitý
XLPS	-	Crossed linked polystyren
ZrO_2	-	Oxid Zirkoničitý
Y_2O_3	-	Oxid yttritý
ZnRiO_4	-	Zirkonová moučka

Symbol	Popis
α	Modifikace titanu
β	Modifikace titanu
γ	Modifikace niklu
γ'	Modifikace niklu

