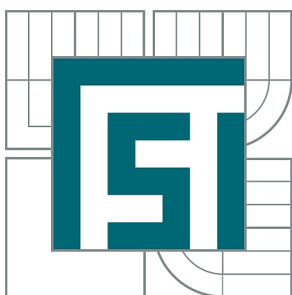




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ TRENDY VYUŽITÍ KERAMICKÝCH JADER PRO LETECKÝ A ENERGETICKÝ PRŮMYSL

MODERN TRENDS OF USING CERAMIC CORES FOR AEROSPACE AND IGT SECTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN URBANOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV TOMEK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Urbanovský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl

v anglickém jazyce:

Modern trends of using ceramic cores for aerospace and IGT sector

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílovým průmyslovým oborem, kam je zaměřen předmět této práce, je odlévání vysoce jakostních odlitků pro letecký, energetický a automobilní průmysl. Zejména v posledních letech společnosti, které se zabývají výrobou vysoce složitých a sofistikovaných odlitků, zvyšují tlak na dodavatele, a roste poptávka po produktech, které by umožnily výrobu kvalitnějších a komplexnějších tvarů. Nedílnou součástí výroby takových odlitků je kvalitní keramické jádro, které umožňuje vyrábět odlitky s tvarově složitou dutinou. Míra složitosti vnitřní dutiny je určována právě keramickým jádrem. Pro složitější jádra při odlévání hliníkových slitin se v poslední době začínají vyvíjet jádra na „nekeramické“ bázi, která jsou pojena pojivy rozpustitelnými ve vodě.

Cíle bakalářské práce:

Zmapování nejmodernějších metod výroby keramických jader a popis aplikací ve zmíněných průmyslových odvětvích.

Seznam odborné literatury:

1. SINGH, N.-P., NEUBAUER, J. N. What Every Commercial, Aerospace, IGT Investment Caster Needs to Know about Ceramic Cores. *Incast.* 2003, vol. 26, no. 4, p.18-21. ISSN 1045-5779.
2. HOLEČEK, S., PRAŽÁK, M. Možnost výroby vodou rozrušitelných jader pro hliníkové slitiny. *Slévárství.* 1999, roč. 43, č. 4, s. 227-229. ISSN 0037-6825.
3. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. *Investment Casting.* Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
4. CAMPBELL, J. *Castings.* Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Tomek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá procesy výroby keramických jader pro slévárny přesného lití. Tato jádra jsou vesměs používána v leteckém a energetickém průmyslu ve výrobě lopatek nejen parních turbín. Jejich konkrétní úloha spočívá ve vytvoření chladících kanálků důležitých pro bezpečný a spolehlivý chod turbíny. Práce prochází všemi kroky ve výrobě od výběru materiálu až po odstranění jádra z hotového odlitku.

Klíčová slova

Keramické jádro, metoda vytavitelného modelu, keramické prášky, pojiva, injekční vstřikování.

Abstract

The work deals with ceramic cores production proces for investment casting. Those cores are using in aerospace and IGT sectors not just in gas turbine blades production. Their specific application is in forming cooling cavities important for safe and reliable turbine. The work is going through the all steps in production, from choosing the correct material, to removing core from cavities.

Key words

Ceramic core, investment casting, ceramic powders, binders, injection molding.

Bibliografická citace

URBANOVSKEÝ, J. *Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Tomek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu v závěru této práce.

Datum:

Jméno a příjmení:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Ladislavu Tomkovi za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této bakalářské práce. Dále děkuji slečně Věře Podlasové za rady týkající se formální stránky práce.

Obsah

Úvod do slévárenských jader	9
1. Plynové turbíny	10
2. Princip metody přesného lití	12
3. Materiály keramických jader	13
4. Požadavky na vlastnosti pojiv	16
5. Proces výroby keramického jádra	17
5.1. Příprava směsi	18
5.2. Stroje na injekční vstřikování keramických jader	18
5.3. Postup vstřikování	20
6. Úprava polotovaru	21
7. Vytvrzení teplem vytvrditelných směsí	23
8. Vypalování jader	24
9. Povrchová úprava jader	25
10. Dokončovací úprava jader	26
11. Aplikace jader	27
12. Rozměrové chyby jader	30
13. Odstranění jader z odlitků	32
14. Shrnutí a závěr	34
15. Seznam použitých zdrojů	35

Úvod do slévárenských jader

Slévárenský průmysl dnes patří mezi velmi sofistikované odvětví umožňující výrobu tvarově složitých součástí. Volbu technologie výroby ovšem neurčuje pouze tvar koncové součásti, ale také jeho požadované vlastnosti. Pro výrobu součástí, které mají vnitřní dutiny či tvar tak komplikovaný, že i výroba modelu by byla velmi náročná, se ve slévárenství používají tzv. jádra.



obr. 1 Jádro pro chladicí kanálky lopatky parní turbíny [1]

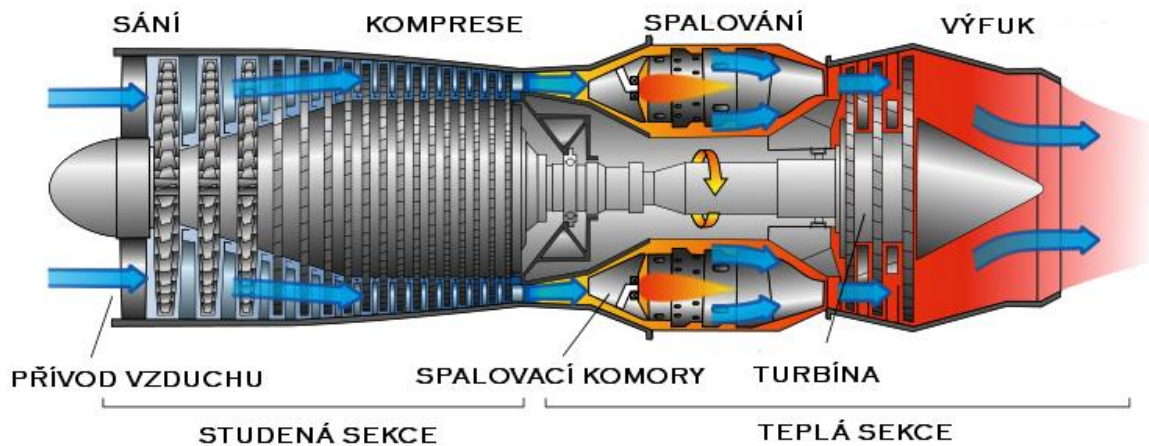
Slévárenská jádra jsou tedy části forem, do kterých nemá zatéci tavenina. V praxi rozeznáváme jádra pravá, které jsou ze všech stran obklopeny taveninou, a jádra nepravá, která se sestavují do rámu formy k výrobě složitějších odlitků. Tvarovou rozmanitost jader v podstatě omezují pouze vlastnosti použitého materiálu pro jejich výrobu, zejména tedy pevnost a žáruvzdornost. Každé jádro totiž musí odolávat vnějším vlivům při výrobě, transportu či samotnému zakládání do formy. A právě zde vynikají keramické materiály, které mají vynikající vlastnosti pro výrobu takovýchto částí forem.

Tato práce je zaměřená na výrobu a s ní spojené problémy jader pro letecký a energetický průmysl. Budeme se tedy zabývat součástmi používanými v těchto odvětvích, což znamená zaměření na lopatky plynových turbín.

1. Plynové turbíny

Plynová turbína byla poprvé patentována roku 1791 Johnem Barberem v Anglii [2].

Princip funkce je následující. V první fázi se plyn nasává a stlačuje v kompresoru. Dále se stlačený plyn smíchává s palivem (v případě spalovací turbíny) a spaluje ve spalovací komoře. Uvolněná energie touto reakcí pohání turbínu, která je spojena s kompresorem a tak stlačuje další vzduch. energii lze použít na tah u leteckých motorů nebo pro krouticí moment na hřídeli v energetickém průmyslu.



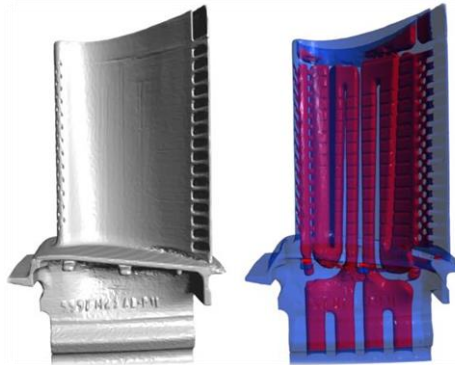
obr. 2 Schéma plynové turbíny [3]

V moderní společnosti zastupují turbíny důležitou roli. Se zvýšením požadavků na výkon je nutno stále vyvíjet nové, důmyslnější turbíny. Nejjednodušší způsob zvýšení výkonu je zvýšit teplotu plynu vstupujícího do turbíny. V dnešních turbínách může vstupující plyn dosahovat teploty až 1500°C. Takto vysoká teplota překračuje teplotu tání slitin, ze které je lopatka vytvořena, a proto je nutné její kompletní chlazení [5].



obr. 3 Turbína s viditelnou teplotní koncentrací [4]

Chladicí médium (vzduch) je vháněno kompresorem do chladících kanálků. Lopatka je tak ochlazená na přibližně 1000°C, což je teplota dostatečně nízká na spolehlivý provoz turbíny. Nicméně zvýšení teploty jen o pár desítek stupňů by mělo za následek zkrácení životnosti lopatky. Z tohoto důvodu je nutné vypočítat přesně teplotní koncentraci a následně se zaměřit v takovém místě na dostatečné chlazení [5].



obr. 4 Příklad použití keramického jádra v lopatce turbíny. Červeně jsou znázorněna místa, která budou při odlévání vyplněna jádrem [6]

Lopatky turbín musejí odolávat nejen zmíněné teplotě, ale také mechanickému namáhání a oxidaci. Z těchto důvodů jsou vyráběny z tzv. superslitin, které mají skvělou odolnost proti vysokoteplotnímu creepu, což je jeden z požadavků na materiál tohoto použití.

Superslitiny jsou obvykle založeny na bázi niklu, případně kobaltu, který je však drahý, a proto výjimečně používány. Vzhledem k neustálému vývoji se již experimentuje se slitinami na bázi niobia, které by byly schopny pracovat při vyšších teplotách.

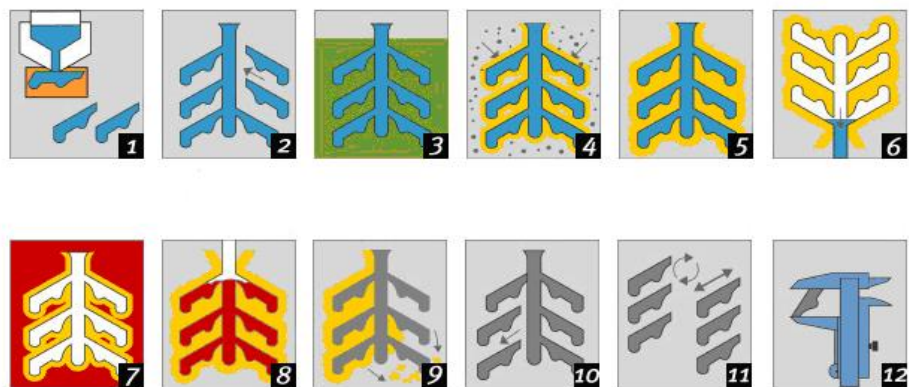
Pro ochranu proti oxidaci jsou lopatky potahovány vrstvou hliníku, případně chromu. Jako termální ochrana lopatek se dnes používá vrstva oxidů např. oxid zirkonu stabilizovaný 10% yttria [7].

2. Princip metody přesného lití

Jelikož každá turbína obsahuje velké množství lopatek, je zde snaha o co nejlepší kvalitu ihned po odlití bez dalšího opracování odlitku. Navíc zmíněné chladicí kanálky uvnitř lopatky znesnadňují produkci. Pro tuto výrobu je tedy vhodné použití přesného lití metodou vytavitelného modelu s využitím keramického jádra.

Tato metoda patří mezi nejstarší a zároveň jednu z nejpřesnějších metod ve slévárenství. Princip metody je následující.

1. Výroba voskového modelu. Nejčastěji vstříkáním roztaveného vosku do formy. V případě zmíněné výroby lopatky, má forma tvar budoucí lopatky, do které je již vloženo keramické jádro, viz kapitola 11.
2. Skládání jednotlivých modelů do stromečku.
3. Namáčení stromečku do keramické břečky.
4. Posyp stromečku žáruvzdorným materiálem o dané zrnitosti.
5. Sušení obalové hmoty.
6. Vytavení voskového modelu. Jádro se stává částí formy.
7. Vypalování keramické formy.
8. Odlévání slitiny do formy.
9. Odstranění keramické skořepiny (formy) včetně keramického jádra.
10. Rozdělení jednotlivých elementů ze stromečku.
11. Dokončovací operace – broušení, leštění atd.
12. Rozměrová kontrola, kontrola kvality.



obr. 5 Princip metody vytavitelného modelu [8]

3. Materiály keramických jader

Materiály pro výrobu jak samotných forem, tak i jader, musí podléhat požadavkům sléváren. Jde především o následující vlastnosti materiálu:

Pevnost

Jádro musí být odolné proti působení vnějších vlivů. Jak již bylo zmíněno dříve, jde především o namáhání během výroby, transportu, zakládání do forem a samotném odlévání kovu.

Tepelná odolnost

Jádro musí být odolné proti teplotnímu šoku v době, kdy přichází do kontaktu s taveninou. Teploty se zde tedy pohybují od 680 do 2000°C v závislosti na druhu odlévaného materiálu. Důležitá je také teplotní roztažnost, jež se má pohybovat pod 2% [9].

Soudržnost

Během samotného odlévání je důležité, aby tvar nebyl rozrušován praskáním nebo otěrem taveniny. Stejně tak je nutné, aby jádro bylo schopné tvořit na odlitku povrch v dostatečné jakosti, neboť dutý prostor vzniklý po jejich odstranění již není často možné dále opracovávat.

Prodyšnost

Je nezbytná ke správnému zatečení taveniny do všech požadovaných míst. Plyn, který je ve formě během lití, nesmí tavenině bránit v zatékání a musí odcházet jednak přes předem vytvořené výfuky a také přímo přes materiál formy a jader.

Rozpadavost

Zvlášť důležitá vlastnost materiálu. Po odlití je třeba z odlitku odstranit veškerý materiál formy a jader. Nízká rozpadavost materiálu by měla za důsledek jeho obtížné odstraňování z těžko přístupných míst.

Ekologie

V rámci zvýšení ekonomičnosti výroby by mělo být možné materiály opětovně recyklovat.

Samotné materiály jsou většinou přesně specifikovány danou firmou, která je vyrábí a jejich přesné chemické složení je výsledkem mnoha zkoumání a experimentů. Proto výrobci obvykle dávají k dispozici pouze minimální informace o složení, zato však poskytují jejich přesné charakteristické vlastnosti.

NÁZEV	I21A	D-200	CTI-107
POUŽITÍ	Velká jádra pro energetický průmysl	Rovnoosé odlitky s neprůchozími otvory	Jádra pro slitiny niklu
SLOŽENÍ	SiO ₂ ->88,5% ZrSiO ₄ ->11,5%	SiO ₂ ->98% Al ₂ O ₃ ->2%	-
MNOŽSTVÍ CRISTOBALITU IHNED PO VYTVAROVÁNÍ	9%	5%	-
MNOŽSTVÍ CRISTOBALITU PO 60 MIN. V 1260 °C	11%	18%	12%
TEPELNÁ ROZTAŽNOST PŘI 1000°C	0,100%	0,071%	
TEPELNÁ ROZTAŽNOST PŘI 1260°C	-0,067%	-0,078%	při 1528°C 0,3%
HUSTOTA	1750kg/m ³	1520 kg/m ³	2810 kg/m ³

tab. 1 Příklady materiálů keramických jader [9]

Jedním z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu keramických jader je dnes oxid křemičitý (až 90% keramických jader je tvořeno SiO₂). Jeho obrovskou výhodou je rozpustitelnost ve vodných roztocích nekoroذujícími odlévaný materiál. Tato vlastnost umožnila výrobu těch nejsložitěji tvarovaných jader, limitovaných pouze možnostmi výrobce a napětím vzniklým při odlévání. Z tohoto důvodu se tyto jádra používají s výhodou k výrobě chladících kanálků v turbínových lopatkách v leteckém a energetickém průmyslu.

Oxid křemičitý začíná při vyšších teplotách měknout a v čistším stavu se může dokonce prohýbat pod svou vlastní vahou. Proto se často ve formě používají přídavné podpory. Jádru se předehřívá z důvodu přeměny na cristobalit, jenž pomáhá vyztužit strukturu. Není možné mít ve struktuře pouze cristobalit, neboť jeho rozrušující fázová přeměna při 220°C by zničila jádro, jakmile by došlo k ochlazení. Je tedy nutné najít rovnováhu mezi SiO₂ a cristobalitem. Při 20% cristobalitu bude mít jádro zhruba poloviční pevnost za pokojové teploty než jádro vyrobené pouze z SiO₂ [11].



obr. 6 Keramické jádro pro chladící kanálky turbínových lopatek [10]

Další alternativou jsou jádra na bázi Al₂O₃. Oxid hlinitý nepodléhá takovému změkčení a neprochází nežádoucími fázemi jako SiO₂, navíc je také méně reaktivní s agresivními slitinami. Avšak rozpouštění Al₂O₃ po odlití je příliš pomalé, aby se stalo vážnou konkurencí pro SiO₂ [11].

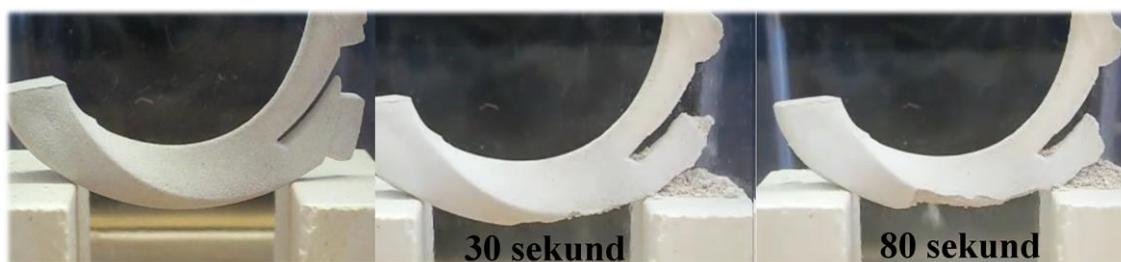
4. Požadavky na vlastnosti pojiv

- výborná zabíhavost
- kompatibilita s ostatními složkami materiálu jader
- stálost během výrobních procesů
- snadné vyhoření z vytvrzeného jádra

Pojiva mohou být buď termoplastická, k vytvrzení dojde po vstřikování a následném tuhnutí v chladné formě (cold-box) nebo tepelně vytvrditelné, které se vytvrdí v teplé formě (hot-box).

K termoplastickým pojivům se řadí vosky (polyetylen glykol, polystyren), zatímco pro tepelně vytvrditelné směsi se využívá silikonových pryskyřic (metyl silan, fenyl silan, polyester). Výhody obou typů pojiv jsou na stejné úrovni. Silikonové pryskyřice jsou pevnější a odolnější proti poškození, ale také dražší a jejich viskozita je větší než u vosků. Použití silikonových pojiv tedy vyžaduje větší vstřikovací tlaky a i tvrdší kalenou vnitřní dutinu zápustky [11].

Mezi použitím těchto pojiv jsou velké rozdíly, a to zejména ve stavu nevytvrzených polotovarů. Materiály pojené silikonovými pryskyřicemi jsou pevné i bez dalšího zpracování, na rozdíl od jader z materiálů pojených vosky, které jsou křehké a potřebují dodatečnou úpravu [11].

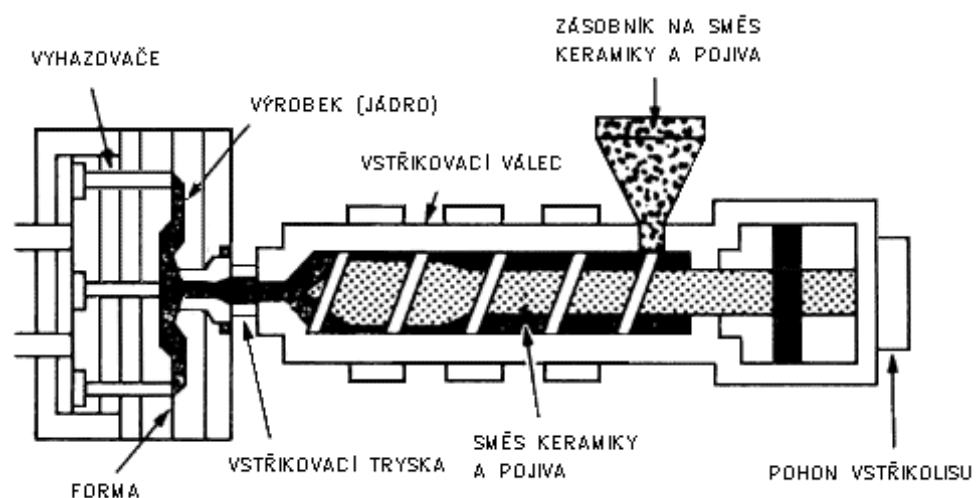


obr. 7 Schéma rozpadu vodou rozpustitelného jádra s časovými intervaly [12]

Při výrobě hliníkových odlitků nelze použít jádra rozpustitelná v roztocích hydroxidu sodného či draselného viz kapitola 15. Tyto roztoky jsou vysoce reaktivní s hliníkem a docházelo by tak k poškození odlitků. Jako alternativu lze použít vodou rozrušitelná pojiva jako je celulóza nebo agar. Fungují jako protiklad k tepelně vytvrditelným pojivům. Mají nízkou viskozitu a skvělou zabíhavost. K rozpadu jádra dojde ihned po kontaktu s kapalinou.

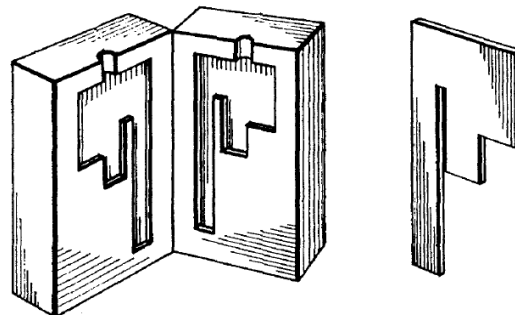
5. Proces výroby keramického jádra

Typickým příkladem procesu výroby keramických jader je vstřikování. Keramická hmota je zde vtlačena pod tlakem do formy. Pokud je tento proces z ekonomického či technologického hlediska náročný, lze použít i jiné metody výroby. Zejména jde o proces lisování keramického prášku a pojiva, jehož tepelným vytvrzením lze dosáhnout požadované tvrdosti a pevnosti jádra. Jakékoliv alternativní metody jsou však vzhledem k vysoké produkci výroby vstřikováním obvykle nevýhodné a neekologické.



obr. 8 Schéma procesu vstřikování jádra do formy šnekovým lisem [13]

Vzhledem k relativní absenci smrštění a mírného změkčení pojiva jádra vydrží i velké teplotní šoky a jeho prodyšnost umožní odstranění plynů vzniklých při výrobě. To ovšem není možné, pokud jádro obsahuje jemný prášek umožňující lisování tenkostěnných jemných částí [11].



obr. 9 Zjednodušená forma a výsledné keramické jádro [14]

5.1. Příprava směsi

Oxid křemičitý se v míchačích mísí s pojivem. Pokud není pojivo se zbytkem směsi správně promícháno, hrozí vytvoření shluků pojiva, jenž po vytavení vytvoří porozitu v jádře, které tím bude oslabeno a může prasknout, případně tvořit nedostatečnou jakost povrchu.



obr. 10 Míchač jádrové směsi EM-30 [15]

5.2. Stroje na injekční vstřikování keramických jader

Pro injekční vstřikování se vesměs používají dva druhy lisů – šnekový a pístový. Šnekový se od pístového liší způsobem dopravy materiálu a zplastizováním pojiva. Zatímco u šnekového velká část tepla vzniká z třecích odporů mezi materiálem, poháněným šnekem, a válcem, u pístového je materiál zahřát kondukčním ohřevem. Kromě toho, v pístovém lisu je tlak na konci stroje mnohem vyšší než u šnekového lisu.



obr. 11 Šnekový lis pro injekční vstřikování keramického jádra [16]

Horizontální šnekový lis patří k nejčastěji používaným lisům. Používá upínací jednotku, vstřikovací jednotku a kontrolní systém.

Vstřikovací jednotka obsahuje šnekový dopravník, tepelnou jednotku a trysku. Šnekový dopravník přesouvá a zároveň promíchává materiál uvnitř vstřikovacího válce, stlačuje ho a tím odstraňuje veškeré plynové bubliny. Tepelná jednotka zahřívá směs na požadovanou teplotu pro snadné formování. Tryska řídí vstřikovací proces, během kterého je jádro pod tlakem vyrobeno. Kontrolní systém moderních vstřikovacích lisů zahrnuje hardware a software, ve kterém jsou nastaveny a uloženy výrobní podmínky.



obr. 12 Pístový lis pro vstřikování keramického jádra [17]

5.3. Postup vstřikování

Proces samotného vstřikování je obdobný jako u vstřikování termoplastů a obsahuje následující fáze:

- 1) Surovina je umístěna v zásobníku na vstřikovacím stroji.
- 2) Pojivo v surovině je taveno v ohřívací jednotce.
- 3) Rozehřátý materiál je vstřikován pod tlakem do dutiny formy, která se montuje do uzavírací jednotky. Surovina musí mít dostatečně nízkou viskozitu, aby snadno zatekla do všech dutin formy.
- 4) Zatímco forma zůstane zavřená, je chladícími kanálky chlazena. Výlisek začne tuhnout.
- 5) Po ztuhnutí pojiva se tryska pohybem vstřikovací jednotky odtáhne od formy. Upínací jednotka otevře formu a výlisek je vyhazovači vytlačen ven. Jelikož je jádro před vypálením extrémně křehké, bývá z formy odstraněno ručně.

Při zpracování keramiky jsou namáhané části vstřikovacího lisu ošetřeny boridovým povlakem nebo alespoň zakaleny.

Po vstřikování jádra se provede kontrola. Tato kontrola zahrnuje zvážení a počítačovou tomografii jádra. Již zde lze odhalit případné poruchy, jako jsou vnitřní praskliny či neúplné části jádra.

6. Úprava polotovaru

Jádra jsou po vstřikování křehké a jejich pevnost je nedostatečná. Před vypálením jádra je tedy třeba směsi tepelně upravit odstraněním přebytečného pojiva a zajištěním dokonalé budoucí celistvosti jádra. Tato úprava se provádí během pomalého ohřívacího cyklu, který trvá až 120 hodin. Během toho cyklu se rozkládá organické pojivo. Pokud pojivo zůstane ve shlucích, mohlo by to vést až k roztržení jádra, neboť následně vzniklé plyny potřebují dostatek času pro difundování k povrchu, což je v keramických jádrech obtížné. Použitím materiálů s jednoduchým přesunem molekul lze ovlivnit tyto teploty a umožnit tak snadnější a levnější proces [18].

Pro zkrácení procesu odplyňování se používají vosky či pryskyřice s nízkou viskozitou. Termoplastická jádra bývají vložena do inertních prášků (např. oxid hlinitý) a poté zahřívána v pecích. Prášek brání rozpadu jádra při dosažení teploty tání voskového pojiva a pomáhá odstranit přebytečné vzniklé plynné složky kapilárním jevem [18].



obr. 13 Pec pro vytvrzení keramických jader [16]

Málokdy se požadované vlastnosti materiálu, vzhledem k množství ovlivňujících faktorů, získají ihned. Jedním ze způsobů zajištění lepších vlastností je smíchání směsi s dalším materiálem, jako je oxid hlinitý nebo zirkonový prášek. Ty sice nejsou rozpustné v louhu, vyloučí se však jako kal.

Zajímavým jevem SiO_2 je, že je čistší než ostatní keramické materiály používané pro lití, hlavně díky čistotě použitého křemičitého písku při výrobě. Většina problémů tedy nevzniká z SiO_2 , ale z jiných přidaných materiálů. Zirkonový prášek mírně snižuje vysokoteplotní pevnost kvůli jeho nečistotám. Vyšší koncentrace Al_2O_3 výrazně snižuje odpor jádra vůči deformacím. Alkalické kovy podporují vznik cristobalitu, o jehož účincích již zde bylo psáno [11].

7. Vytvrzení teplem vytvrditelných směsí.

Molekuly pojiv v těchto směsích jsou vázány do organických skupin. Pokud se směsí zahřejí na teploty kolem 500°C, organické skupiny se rozloží a spálí, zatímco SiO₂ zůstane nezměněn. Poté se jádro vypaluje při teplotách 1000-1400°C po dobu 8-12 hodin dle požadovaného množství vzniklého cristobalitu (obvykle 40-60%) [11].

Metyl silany obsahují cca 80% SiO₂, fenyl silany cca 40% SiO₂. Použitím těchto pojiv, či jejich kombinací se získá jádro s původní vazbou pryskyřic. Takováto směs nepotřebuje přetavovat polymerizované pojivo pro odstranění přebytečných plynů a může být, na rozdíl od voskem pojených materiálů, rovnou vytvrzena. Použití těchto pojiv je také výhodné vzhledem k vysokému podílu zbytkového SiO₂ v jádře. Přidáním více SiO₂ do těchto směsí se snižuje jejich propustnost za současného zvýšení pevnosti jádra. Kombinací poměru čistě organických pryskyřic a silikonů lze upravovat množství SiO₂ v jádře, a tak i jeho vlastnosti [11].

Přidání hrubších prášků by sice omezilo smrštění, zato by ovšem narušilo vstřikovatelnost a plasticitu keramické směsi. Tento problém vyřešili výrobci jader aplikováním mnoha kompromisů, zejména ve vývoji výrobních procesů pro jádra leteckého průmyslu. Většina z nich si začala sama vyrábět křemičité prášky, jelikož dostupné prášky nepodléhají tak přísným normám, které jsou důležité pro výrobu jader. I přes tyto kroky musí být forma pro výrobu jader uzpůsobena jejich smrštění. Při samotném vstřikování je již úkolem technologa udržet rozměry a vlastnosti jádra přijatelné pro daný produkt. Přesnou výrobou formy (tolerance ±0,1%) a správným řízením vstřikovacího procesu lze omezit smrštění jádra pod 2% [18].

8. Vypalování jader

Následující operací po vypálení přebytečného pojiva a tedy vytvrzení jádra je jeho vypálení. Vypalování probíhá v pecích při teplotách kolem 1100°C po dobu dostatečnou k vypálení veškerého již nepotřebného pojiva. Během této fáze se začnou spékat jednotlivé mikrozrna a vytvářet malé množství skelných fází zpevňujících jádro. Přestože je jádro vypálené, zůstává křehké a při pokojové teplotě snadno lámavé [18].



obr. 14 Vypalovací pec firmy CALTHERM [16]

9. Povrchová úprava jader

Jádra s upravenou povrchovou vrstvou jsou užitečná, pokud budeme odlévat slitiny s prvky reagujícími s Si či SiO_2 jako je titan, zirkon, hafnium, hliník, yttrium, cerium či uhlík. To jsou prvky běžně se vyskytující v kobaltových a niklových slitinách.

Za požadavkem získání žáruvzdorné oxidační vrstvy na povrchu jádra se jádro samotné ponoří do lázně z roztaveného kovu obsahující jeden nebo víc reaktivních prvků s volnou energií, pro vznik oxidační vrstvy, menší než -160 kcal/mol při teplotě 1260°C. Za těchto podmínek vznikne požadovaná stabilní a žáruvzdorná oxidační vrstva. Jako lázeň lze například použít slitinu hafnia a niklu, jehož teplota tání je 1450°C. Teplota však může být snížena na cca 960°C přidáním přibližně 29% křemíku [19].

Lázeň obsahuje také značné množství nereaktivních materiálů jako měď, křemík, kobalt či nikl. Vhodnými reaktivními prvky jsou například: zirkonium, hafnium, hořčík, vápník, hliník, titan a další vzácné kovy. Podíl reaktivních prvků v lázni by se měl pohybovat mezi 0,5 -10% [19].

Teplota lázně se určuje v závislosti na požadované síle oxidační vrstvy a pohybuje se většinou nad 1000°C. Kvůli zvýšení rychlosti oxidace může být požadována vyšší teplota lázně. Vysoká teplota nebo dlouhá doba ponoření však může vést ke smršťení nebo zkroucení jádra. Některá jádra mohou vytvořit dostatečnou vrstvu již při 10 – 20 sekundách ponoření do lázně o teplotě cca 1500°C. Naopak při teplotě cca 1100°C může trvat tvorba povlaku řádově i několik hodin. Je zřejmé, že namáčení jader do lázně na několik hodin je nepraktické. V praxi doba louhování netrvá déle než 1 hodinu [19].

Vzhledem k delší době tvorby a rozdílné roztažnosti povlakové vrstvy a jádra jsou obecně tlusté vrstvy oxidačního povlaku nežádoucí. Lze říci, že ideální tloušťka (dle velikosti, tvaru a způsobu odstranění jádra) povlaku je cca 0,01mm.

Povrchová úprava je prováděna pod inertním plynem či ve vakuu. Nejlepších výsledků se dosahuje za použití argonu nebo helia [19].

10. Dokončovací úprava jader

Metoda zahrnuje výše zmíněnou metodu formování polotovaru jádra, při které se vytvoří obecný tvar. Polotovar se vypálí a poté se pomocí laserového paprsku či abrazí speciálním diamantovým břitkem dotvoří jádro s požadovanou přesností tvaru a rozměru.

Použití laseru umožňuje výrobu jádra s prvky menšími než 0,5mm. Lze vyrábět značení jader, ořezávání, vrtání, řezání, leptání, frézování, leštění, vyztužování atd. Dále lze laserem ovlivnit povrchovou vrstvu jádra tak, aby měla velmi vysokou povrchovou energii podporující tok slitiny ve formě [20].

Forma pro výrobu jádra je tvořena ze dvou částí (horní a spodní forma). Mezi těmito dvěma částmi vzniká v závislosti na toleranci a opotřebení dutiny tenká šupina z jádrového materiálu, který se snaží vytlačit ven. Tato šupina musí být samozřejmě před použitím jádra odstraněna a vyhlazena. Laserem lze také vytvářet nejrůznější prvky jádra, jako jsou malé otvory, drážky, štěrby atd. Běžně lze tyto úpravy dělat i obvyklými mechanickými nástroji, ovšem se zmenšujícím se rozměrem jádra je obtížnější i mechanická úprava [20].

Při malých rozměrech jádra totiž i při použití miniaturních mechanických nástrojů vznikají velké působící síly a hrozí nebezpečí jeho poškození. Kromě obtížné mechanické manipulace je problém i s rozměrem nástroje. Při průměru pod 0,5mm se snižuje při rotaci jeho rozměrová stabilita a pevnost. Naproti tomu odstranění otřepů či šupin pomocí laseru umožňuje úpravu jádra s minimálním poškozením a bez hrozby jeho rozpadu [20, 24].

11. Aplikace jader

Nejčastější varianta použití keramických jader je jejich zaformování přímo do samotného voskového modelu. Jádra nám zde vytvářejí místa bez budoucí taveniny, aniž by do nich musela zatéct keramická břecha, což by bylo komplikované vzhledem k často dlouhým a úzkým profilům těchto částí. Poté celý model včetně zmíněného jádra použijeme s metodou tzv. vytavitelného vosku.



obr. 15 Keramické jádro uvnitř formy pro výrobu voskového modelu [16]

Jádro je umístěné ve formě pro výrobu voskového modelu ještě před samotným vstříkem vosku. Po odlití musí být možné jeho odstranění z odlitku spíše rozpuštěním než mechanickým odstraněním, které by mělo za následek poškození povrchu vnitřních dutin.



obr. 16 Voskový model s keramickým jádrem uvnitř vstříkovací formy [16]

Přestože takto tvarovaná jádra zvyšují, v porovnání s přímým vznikem dutých částí metodou vytavitelného modelu, náklady, jsou pro danou výrobu nenahraditelná. Na rozdíl od pískových jader, která si slévárny často vyrábí samy, keramická jádra se vyrábí specializovanými firmami zejména kvůli složitosti výrobního procesu.



obr. 17 Hotový voskový model s keramickým jádrem [16]

Jádra jsou ve formě modelu umístěna ve známkách u svých konců, což umožňuje udržení jádra v dutině formy a následně i v modelu. Znamky jsou vyráběny o něco menší než forma pro adaptaci drobných odchylek rozměrů. Pokud by byly známky shodné s formou, došlo by k rozdrčení jádra, na druhou stranu, pokud by byly vůle velké, snižuje se přesnost umístění jádra vůči voskovému modelu [18].

Poměr velikosti částic pojiva a prášku určuje, jak již bylo dříve zmíněno, velikost tepelné dilatace a další vlastnosti jádra. Jakákoliv drobná segregace, například během injekčního vstřikování pod tlakem povede k nerovnoměrnému smrštění jádra. Tuto segregaci není možné odstranit a může vést ke kroucení jádra. Toto zkroucení je problém, jelikož jádro bude umístěno do kovové formy pro vstřikování vosku a hrozí prasknutí keramiky, přestože je nástroj uzavřen. Proto se každé jádro před použitím pečlivě kontroluje [18].

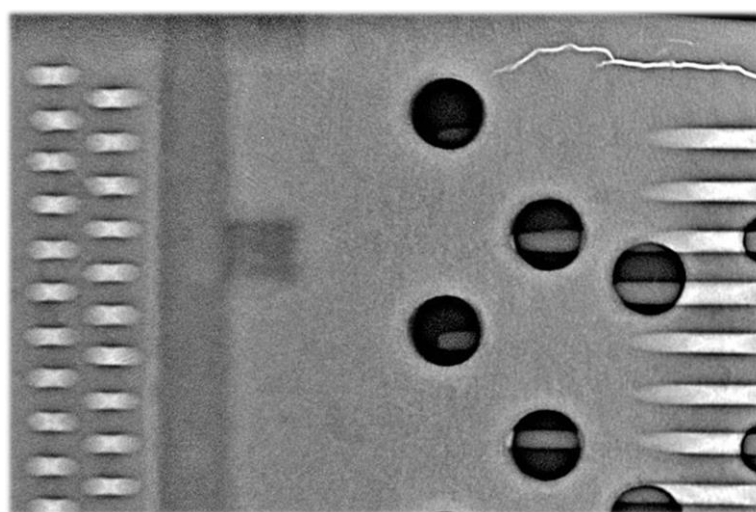
Pro řízené tuhnutí odlitků se používá směs zirkonu a oxidu křemičitého. SiO_2 se před odléváním zahřívá na teplotu kolem 1500°C z důvodu částečné přeměny na cristobalit. Tím vzniknou velmi pevná jádra. Při rychlém ohřevu nad 1200°C však lze očekávat deformaci vlivem vlastní tíhy [18].

K zamezení těchto deformací se používají malé kolíky, které jsou umístěné ve formě a udržují jádro rovně i při ohřevu nad kritické teploty. Po nalití kovu o vysoké teplotě (1500-1650°C) dojde k jejich roztavení, jádro vykrytalizuje v cristobalit a zvýší se tak jeho pevnost. Lze také použít různé směsi s obsahem alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Tedy prvky IA a IIA skupiny periodické tabulky prvků, neboť i ty podporují tvorbu cristobalitu.

Množství a druh prvku je přesně určen k rychlé tvorbě cristobalitu použitelného při teplotě 1650°C a vyšší, pro odlévání speciálních slitin, ze kterých bývají zhotoveny odlitky, jako jsou lopatky turbín. Jednou z úspěšných směsí je sodíkem stabilizovaný oxid křemičitý prodáváný pod obchodními názvy jako „Ludox“, „Synton“ nebo „Nalcoag“ [18].

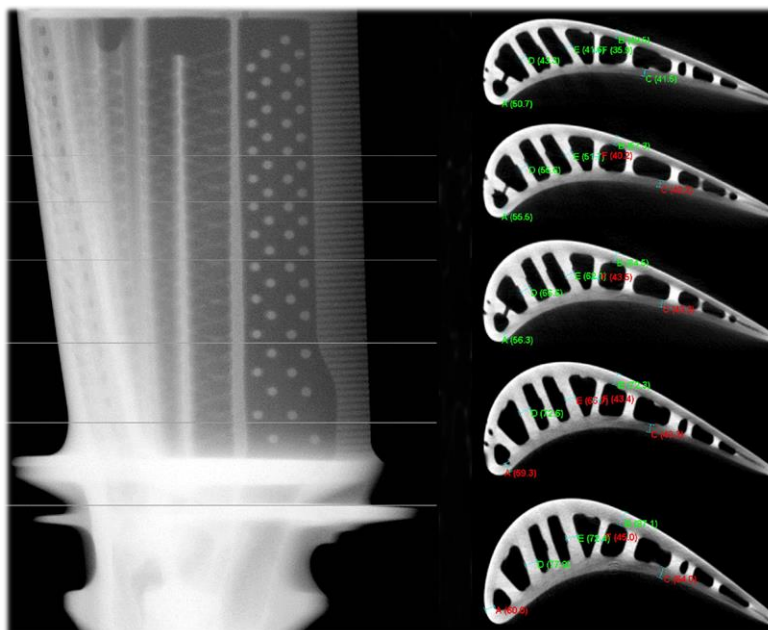
12. Rozměrové chyby jader

Forma jádra může být sama o sobě chybná, jádro má různé smrštění a zkroucení již během výroby. Samozřejmě může být vadné i umístění známek v zápustce modelu. S tím vším musí výroba počítat a při zavedení výroby je nutné podstoupit ladění k dosažení kvalitní a ekonomické produkce. V ladění lze pokračovat i po odlití první šarže, což může mít za následek delší dodací lhůty. I z tohoto hlediska je snaha odlévat vše správně již napoprvé.



obr. 18 Kontrola vnitřních defektů (praskliny, porosita) počítačovou tomografií [21]

Jakmile je jádro umístěné ve známkách uvnitř dutiny formy, je třeba jej přesně udržet v dané poloze vzhledem ke stěnám zápustky. Jelikož je jádro vyrobené z SiO_2 a má velmi malou tepelnou roztažnost, je udržení daného umístění vůči stěnám zápustky komplikované. Je to dáno tím, že forma, pokud tedy není také z SiO_2 , má daleko větší tepelnou roztažnost. Tedy vzdálenost mezi jádrem a zápustkou je při působení tepla rozdílná [11].



obr. 19 Voskový model s jádrem pod rentgenovým zářením v několika průřezech [22]

Jádra i formy se předehřívají v peci na cca 800-1000°C. Jádro změkne a bude náchylné na působení smykového a kroučícího napětí, vzniklého rozdílnou roztažností. K jeho odstranění se natírá jeden konec známky jádra lakem, který shoří při odlévání a vytvoří kluzný spoj. Pokud není jádro uvolněné, je možné, že dojde ke zkroucení ještě před odlitím kovu. I zde se proto provádí kontroly, přestože kontrola kluzného spoje i deformování jádra je díky uzavřené zápustce dosti omezena [11].

13. Odstranění jader z odlitků

Po odlití taveniny, je třeba odstranit keramickou skořepinu a také jádro z jeho vnitřních dutin. Jak již bylo psáno dříve, varianta rozpouštění je vhodnější oproti mechanickému odstranění, při kterém může dojít k poškození odlitku. Rozpouštění se provádí v alkalických hydroxidech, jejichž chemickým složením se upravuje rychlost a kvalita rozpouštění. Keramické jádro má relativně vysokou pórovitost (cca 30%) usnadňující prostupnost louhu jádrem [25].

Používají se vesměs 30-45% vodné roztoky hydroxidu sodného či draselného zahřátých na teplotu varu cca 120-130°C. Během procesu louhování je třeba kontrolovat stabilní koncentraci roztoku. V hlubokých dutinách může být rozpouštění obtížnější, jelikož se zde rozpouštědlo nepohybuje a vytváří se křemičitý gel zabráňující dalšímu rozpouštění jádra. Jako opatření proti tomuto jevu je vhodné s odlitkem pohybovat případně vířit louhem [25].

Pro urychlení odstranění jader lze zvýšit tlak např. použitím autoklávu [18].



obr. 20 Autokláv MK-A100 [23]

Autoklávy pracují obvykle s tlaky kolem 0,7MPa a opakovaným vypouštěním tlaku vznikají v roztoku víry zlepšující rozpouštěcí proces. Ke zlepšení lze také použít vyšších teplot roztoků. Tlaky kolem 7MPa umožňují aplikovat teploty kolem 250°C, při 10MPa již 350°C. Toto zvýšení okolních podmínek zvyšuje účinnost procesu [18].

Při teplotách kolem 350°C má již roztok dvojnásobný objem a je třeba použít pouze 50% množství pro ponoření celého odlitku. Vyšší tlaky se využívají hlavně při odstraňování jader s extrémně složitým tvarem, jelikož se jedná o jediný způsob odstranění takového jádra. Tyto zařízení však mohou být pro slévárny finančním zásahem do rozpočtu.

Dalším způsobem odstraňování odlitků je použitím elektrojiskrového výboje v lázni. Během této metody je nutné zavést jednu elektrodu přímo do vnitřní dutiny odlitku. Druhou elektrodu tvoří samotný odlitek. Vlivem elektrického výboje vznikne v lázni tlaková vlna, která rozrušuje jádro. Výhodou tohoto procesu je jeho bezprašnost a nízká hlučnost [18].

Jako konečný krok po odstranění jádra se používá oplach tlakovou vodou, propláchnutí neutralizačním roztokem (např. slabý roztok kyseliny citronové) a opětovný oplach vodou [25].

14. Shrnutí a závěr

Přestože metoda vytavitelného modelu (vosku) patří mezi nejstarší metody ve slévárenské technologii, aplikace nových technologií ji udržuje stále mezi nejpoužívanějšími procesy výroby odlitků. Při použití keramických jader se dosahuje vysokých přesností s použitím minimálního množství materiálu.

Pro výrobu lopatek v leteckém i energetickém průmyslu navíc keramické jádro představuje jediný ekologicky vhodný způsob sériové výroby složitého tvaru vnitřních dutin. Navíc s použitím moderní chemie lze aplikovat keramické jádra při odlévání nejrůznějších slitin bez jejich vzájemné reakce. Nevýhodou tohoto procesu je, jak již vychází ze samotné metody vytavitelného modelu, nutnost pro každý výrobek vytvořit nový voskový model.

15. Seznam použitých zdrojů

- [1] Investment Casting. *Mikro* [online]. © 2009-2011 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.mikrosystems.com/applications/investment-casting>
- [2] Gas Turbine History. *TurboMachine.com* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.turbomachine.com/history/>
- [3] How Turbine RC Helicopters Work. *RCHeliSite* [online]. 29.9.2008 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://www.rchelisite.com/how_turbine_rc_helicopters_work.php
- [4] Blade Sentry - Turbine Blade Temperature Measurement. *AMETEK Land* [online]. © 2009 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.ametek-land.com/combustion/products/info/blade-sentry-turbine-blade-temperature-measurement?page=overview>
- [5] *The Gas Turbine Handbook: Enhanced Internal Cooling of Turbine Blades and Vanes* [online]. 2006 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/handbook/4.2.2.2.pdf>
- [6] [EDITED BY THOMAS ERTL, Bernd Hamann a Sponsored by IEEE Computer Society Technical Committee on Computer Graphics in cooperation with ACM SIGGRAPH. *Visualization 2000 proceedings: October 8-13, 2000, Salt Lake City, Utah*. Piscataway, N.J: IEEE, 2001. ISBN 07-803-6478-3.
- [7] RILEY, Martin. *Towards inert cores for investment casting* [online]. Birmingham, 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://etheses.bham.ac.uk/1503/>. University of Birmingham.
- [8] Investment Casting Manufacturer in India. *Lost Wax Process* [online]. 29.9.2012 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.investmentcasting-india.com/process-lost-wax.html>
- [9] Materials. *CORE-TECH Precision Ceramic Cores for Investment Castings* [online]. 5.10.2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.core-tech-inc.com/Materials/index.htm>
- [10] *Ceramic core material. Aerospace Engineering* [online]. 30.9.2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.sae.org/mags/AEM/10258>

- [11] BEELEY, Peter R. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486s. ISBN 09-017-1666-9.
- BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 175 s. ISBN 80-704-3491-0.
- [12] Water Soluble Core Demonstration of Solubility. In: Youtube [online]. 3.12.2010 [cit.2013-04-22]. Dostupné z: http://www.youtube.com/watch?v=_huiV6e8z_c. Kanál uživatele clanceramicsltd.
- [13] OSHA Technical Manual. *Occupational Safety and Health Administration* [online]. 20.1.1999 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_1.html
- [14] BOCHIECHIO, Mario B. UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION. *POROUS CERAMIC BODY AND METHOD THEREFOR* [patent]. USA, Connecticut. Užitný vzor, US 8286689 B1. Uděleno 30.8.2011. Zapsáno 16.10.2012. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/8286689.html>
- [15] *Fotogalerie. Formservis* [online]. © 2008 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.formservis.cz/?p=gallery&id=2>
- [16] Picture Gallery. *Turbine Technologies* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://www.turbinetec.com/Picture_Gallery_01.html
- [17] Vertical Automatic Plunger Type Injection Molding Machines. *IndiaMART - Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory* [online]. © 2010 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=3944666633>
- [18] MILLER JR., John J. SHERWOOD REFRACTORIES, Inc. *CORES FOR INVESTMENT CASTING PROCESS* [patent]. USA, Ohio. Užitný vzor, 24586981. Uděleno 6.6.1978. Zapsáno 29.12.1975. Dostupné z: <http://www.directorypatent.com/US/4093017.html>
- [19] HAALAND, Rodney S. *Impregnated ceramic core and method of making* [patent]. Užitný vzor, US 6720028. Uděleno 27.3.2001. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/6720028.pdf>

- [20] MUNTNER, Michael S. ALLIED SIGNAL INC. *LASER MACHINING OF CERAMIC CORES* [patent]. USA. Užiténý vzor, US 5465780-1. Uděleno 23.11.1993. Dostupné z: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/5465780>
- [21] Inspecting turbine blades non-destructively. *YXLON* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.yxlon.com/Applications/Cast-parts/Turbine-blades>
- [22] XT H 450 for turbine blade and casting inspection. *Top Metrology* [online]. © 2011-2013 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.topmetrology.ro/en/video-microscope-measuring/197-nexiv-vmr-10080>
- [23] Autoclave. *Vacuum Casting / Investment Casting / Rapid Prototyping / Rapid Tooling - MK Technology* [online]. [2011] [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.mk-technology.com/autoklave0.html?&L=2>
- [24] SINGH, Nipendra P. a Jane M. NEUBAUER. What Every Commercial, Aerospace, IGT Investment Caster Needs to Know about Ceramic Cores. *INCAST: international news magazine of the investment casting industry*. 2003, vol. 16, no. 4., p.18-21. ISSN 1045-5779.
- [25] LANIK. *Louhování keramických jader MP*. Boskovice, 2013.