OPONENT - prof. Ing. Františka PEŠLOVÁ, Ph.D., FPT, Trenčianskej univerzity A. Dubčeka, Trenčín so sídlom v Púchove, Slovenská republika

Recenzní posudek na disertační práci

VERIFIKACE SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ VOSKOVÝCH MODELů

Autorky: Ing. Ireny Kubelkové

Předložená disertační práce (DP) řeší, v současnosti velmi aktuální problematiku, zabývající se zkvalitněním výroby přesných odlitků pro lopatky plynových turbín. Přesnost lití v daném případě bude spočívat hlavně v preciznosti výroby voskových modelů.

Cílem disertační práce bylo nalezení a uplatnění takového numerického simulačního programu, kterým by bylo možné provést simulaci vstřikování voskového modelu pro vybraný díl lopatky plynové turbíny. Vzhledem k tomu, že se jedná o specifický materiál - vosk, získání vstupních materiálových parametrů do výpočtu je velmi komplikované a náročné. Disertantka, Ing. Kubelková na základě současných poznatků, zvolila simulační software Cadmould, pro který získání a verifikování vstupních parametrů, bylo zahrnuté v dílčích cílech disertační práce.

1. Postup řešení, použité metody

Úvodní kapitola práce obsahuje popis konkrétního dílu (kterému byla v předložené práci věnovaná pozornost), jak z pohledu geometrie, tak i z hlediska potřebných parametrů pro výrobu voskových modelů. Autorka vychází z publikací zahrnující teoretické a praktické zkušenosti z konkrétní výroby voskových modelů. Ve všeobecnosti se jednalo o porovnání dvou materiálů pro aplikované voskové modely. V technické praxi jsou tyto materiály uvedeny pod názvem „panenský vosk Remet Hyfill B 478“, označený v práci jako zelený a „rekonstituovaný vosk Remet Hyfill B 478“, označený jako hnědý. V této kapitole bylo poukázáno na kritická místa voskového modelu, kterým je nutné věnovat pozornost. Literární rešerše je v tomto případě postavena na konkrétních poznatcích z dané problematiky. Tyto poznatky vytvořily ucelenou informaci o aktuálních problémech a limitech řešení, z čeho autorka ve své práci vycházela.

Disertační práce má jasně stanovené cíle, pro jejichž dosažení, autorka v souslednosti navrhla logický postup a metodiku řešení. Důležitým momentem pro splnění cílů DP, byla verifikace získaných výsledků celé koncepce řešení porovnávacím experimentem a s využitím specifických metod. Ověření vybrané metodologie výpočtového modelování, autorka brala jako „primární".

Ing. Irena Kubelková se v experimentální části své práce věnuje *změnám objemu vosku v závislosti na teplotě,* kde pro dané měření navrhla měřící soustavu tak, aby bylo možné snímat korektně všechna data pro další vyhodnocení. Dále provedla *měření tepelné vodivosti v pevném* stavu na dvou teplotních úrovních (22°C, 12 měření a při 40°C, 5 měření). Další experiment se týkal *měrné tepelné kapacity* vosků prostřednictvím měření *celkového toku,* z něhož byla stanovena entalpie (pomocí diferenciálního skenovacího kalorimetru DSC Diamond). Zde byly uvedeny závislosti (na 5ks vzorků) měrné kapacity na teplotě vosků a závislosti entalpie na teplotě vosků (na 5 ks vzorků). Důležitým parametrem jsou i *reologické vlastnosti vosků*, vyjádřené *koeficienty konzistence a indexu toku*, kterým byla věnovaná rovněž patřičná pozornost v rozsahu teplot od 55°C do 72°C. Získané grafické vyjádření závislosti konzistence obou vosků (zeleného a hnědého) a indexu toku na teplotě ukázalo, že k výrazným změnám docházelo mezi 55°C a 65°C. Ing. Kubelková konstatuje, že v tomto teplotním rozmezí je velká pravděpodobnost změny mikrostruktury vosků. V dalším se autorka věnovala i závislosti *smykového napětí a zdánlivé viskozity* na *rychlosti smykové deformace* pro jednotlivé teploty pomocí tzv. reogramů. Vzhledem na získanou *rozdílnost hodnot* v těchto závislostech na teplotách, autorka usuzuje na možnost skresleného měření způsobeného teplotním gradientem ochlazování vosku nebo nízké hodnoty změřeného krouticího momentu při malých smykových rychlostech. Tyto důvody jsou na zvážení a možná i na další ověření případně na jiných voskových směsích.

Měření *viskozity vosků* pomocí kapilárního viskoziměru na základě principu Hagen – Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutého média v trubici s kruhovým průřezem prokázalo, že u rekonstituovaného vosku je viskozita výrazně nižší (při nižších teplotách co dokumentuje i obr. 6. 20).

Pro získání mechanických vlastností vosků, navrhla disertantka *zkoušku ohybem*. Výsledek měření, interpretovaný v deformačně napěťovém diagramu, poukázal hlavně na to, že došlo k porušení (zlomení) obou vosků pod mezí kluzu. Z grafických závislostí poměrné deformace vrs. napětí, autorka vycházela pro výpočet *modulů pružnosti* obou vosků, který je důležitým materiálovým parametrem do výpočtového modelování.

V 7. kapitole dizertační práce (od str. 72 po str. 84), se disertantka zabývala simulací a jejím ověření v reálném procesu odlévání lopatek. Měřením výrobního času prokázala, že doba potřebná na vyjmutí lopatky z formy, je velmi proměnná. Z důvodu eliminace vlivu lidského faktoru, navrhuje autorka změnu konstrukce formy s možností strojního vyhazovače pro ještě horký voskový model.

Autorka DP v závěru této kapitoly zdůrazňuje, že tato část výroby se může zobrazovat v kvalitě konečného odlitku. Na 3D skenech se zobrazily velké rozdíly mezi rozměrovými úchylkami jednotlivých vosků v oblasti bandáže a listu lopatky. Z měření je patrné, že způsob manipulace v průběhu vyjímání voskových modelů lopatek má velký vliv na rozměrovou přesnost. Zda využívat nadále rekonstituovaný hnědý vosk je otázkou, vzhledem na výskyt trhlin v oblasti bandáže, která nemá takové množství kritických míst jako samotný list lopatky.

V konečném důsledku Ing. Kubelková tvrdí, že pomocí modelování s použitím uvedeného softwaru lze uplatnit predikci vzniku slabých míst ve voskovém modelu, který by měl být zárukou kvality budoucího odlitku.

2. Výsledky a přínosy disertační práce

Ing. Kubelková ve své práci uvedla velký počet modelových situací na základě, kterých lze usnadnit lepší orientaci ve výpočtovém modelování. I když v disertační práci byl vybraný numerický simulační software Cadmould, souhlasím s doporučením autorky, že by bylo dobré v budoucnu využit i jiné softwary pro dostupnou škálu voskových směsí, kterými by se dali verifikovat nové návrhy modelů. Z DP je patrné, že vzhledem k časové náročnosti simulace a k dostupnosti vstupních parametrů je předpoklad, nahrazení tohoto programu i jiným programem, který bude moci zahrnout co nejvíc hodnot získaných z jednotlivých měření.

Vzhledem k tomu, že byla vyrobena zkušební série jak z „panenského“ (18ks lopatek), tak z rekonstituovaného vosku (11ks lopatek), mohla disertantka provést seriózní vyhodnocení voskových modelu pomocí 3D skenovacího měření.

Uplatnění výpočtového modelování, formou numerické simulace je velkým přínosem pro predikci možných defektů, v tak náročných geometrických tělesech, jako jsou lopatky plynových turbín.

Ing. Kubelková ke splnění cílů DP přistupovala komplexně, s využitím poznatků jak technologických tak výpočtových, což pozitivně hodnotím. Na základě dosažených výsledků mohla v závěru své práce upozornit na možné úskalí v rámci řešené problematiky a kriticky zhodnotit přínosy pro praxi.

V rámci matematického modelování si autorka uvědomuje rychlý vývoj programových softwarů, které by mohly v budoucnosti vycházet z více vstupních údajů, které by ještě více zpřesnily návrhy modelů, čím by se zabránilo ekonomickým ztrátám, za předpokladu vyšší kvality odlitků, která by se zobrazila i v bezpečnosti provozování náročných konstrukčních dílů.

3. Závěrečné zhodnocení a formální stránka DP

Po formální stránce Ing. Kubelková ve své práci prokázala, že dovede zpracovat ne jen své získané výsledky, ale v symbióze se získanými odbornými poznatky i z praxe zhodnotit možnost jejich zpracování pomocí výpočtového modelování. Počet formálních chyb v práci bylo poměrně málo.
Dále v této práci vysoce hodnotím využití moderních metod měření a využití zařízení pro kvalitní analýzy specifických vlastností.

Možná by si některé kapitoly (konkrétně i vyobrazení) v DP zasloužily podrobnější interpretace získaných výsledků z výpočtového modelování pomoci software Calmoud.

Závěrem mohu konstatovat, že byly v dizertační práci splněny všechny postavené cíle, čímž se tato stává velkým odborným a vědeckým přínosem ne jen pro rozšíření teoretických poznatků, ale i pro praxi.

Přiložený autoreferát splňuje všechny předpisy pro něj stanovené. Přehledně a stručně informuje o průběhu řešené problematiky s uvedením publikací a všech získaných závěrů z dizertační práce.

K dizertační práci mám do diskuze jen dvě otázky pro upřesnění pohledu na řešení tak náročné problematiky:

a) Popište jakou formou se v současné praxi přistupuje k návrhu voskových modelů a pokud je vám známo, jaké programové software se ve slévárnách používají.

b) Bližší vysvětlení posledních vět na str.103: *Na základě vyhodnocení simulace lze tvrdit, že průběhy deformací odpovídají skutečně naměřeným hodnotám. Jejich hodnoty je však třeba 2-3násobit.*

Na základě prostudování předložené dizertační práce mohu konstatovat, že autorka prokázala vysoké odborné znalosti a zkušenosti z prezentované oblasti a předložená práce splňuje všechny podmínky pro doporučení k obhajobě.

Dizertační práci doporučuji k obhajobě a po úspěšném obhájení doporučuji udělit titul

„PhD“

V Púchově 13. 4. 2019

prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D.

Ul. I. Krasku 491/30
020 01 Púchov
Slovensko

Tel.: 042/2851811
e - mail:
IČO: 31118259

Banka: Štátna pokladnica
7000065367/8180
DIČ: 2021376368