

VERIFIKACE SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ VOSKOVÝCH MODELŮ

Autor: Ing. Irena Kubelková

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie

Školitel: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

• ÚVOD

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku možnosti využití numerické simulace pro predikci chování vstřikovaných voskových modelů lopatek plynových turbín. Byly zjištěny vlastnosti panenské a rekonstituované voskové směsi Remet Hyfill B478, které byly jako materiálový model naimportovány do simulačního softwaru Cadmould. Výsledky provedené simulace byly verifikovány pomocí výsledků z 3D skenovacího měření voskových modelů. Výzkum zveřejněný v disertační práci byl podpořen projektem TRIO č. FV10105, Výzkum zvýšení tvarové přesnosti voskových modelů pro odlitky lopatek turbodmychadel a stacionárních plynových turbín v rámci spolupráce s firmou První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s.

• CÍLE PRÁCE

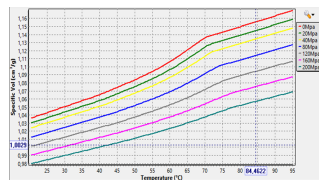
Práce si klade za cíl, po zjištění materiálových dat voskových směsí, na numerickém simulačním programu provést simulaci vstřikování konkrétního dílu lopatky plynové turbíny, přičemž by výstupy ze simulace byly verifikovány s modely vyrobenými reálným výrobním procesem.

Další dílčí cíle práce jsou:

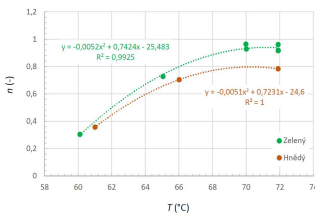
- Na základě požadavků simulačního softwaru na vstupní data, sestavit a provést soubor zkoušek voskových směsí s ohledem na význam těchto výsledků pro numerickou simulaci.
- Analyzovat, na základě výsledků experimentů, rozdíl v chování panenského a rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478.
- Vyrobit zkušební sérii modelů lopatek plynové turbíny z panenského a z rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478. Následně vyhodnotit jakost výrobních voskových modelů lopatek pomocí 3D skenovacího měření.
- Zhodnotit užití rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478 při zachování požadované přesnosti.
- Provést numerickou simulaci vstřikování voskového modelu lopatky z obou výše uvedených voskových směsí a verifikovat výsledky simulace s voskovými modely vyrobenými reálným vstřikovacím procesem.
- Kriticky zhodnotit možnost ovlivnění přesnosti voskové modely lopatky lidským faktorem.

• EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ VISKOELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ VOSKOVÝCH SMĚSÍ

Pro provedení numerické simulace vstřikování voskových modelů je třeba znát celou řadu vlastností voskové směsi, jelikož materiálové databáze tyto hodnoty neobsahují. Údaje, které poskytují výrobci voskových směsí, jsou pro účely simulace nedostatečné, a proto se další požadované parametry musí zjišťovat experimentálně.



Obrázek 1 Diagram závislosti η vT pro zelený vosk

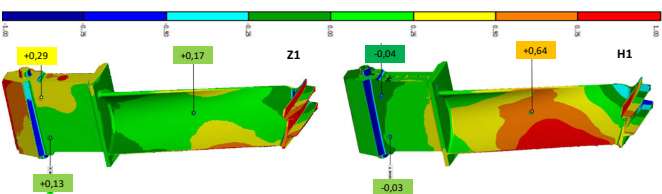


Obrázek 2 Závislost indexu toku obou vosků na teplotě

V rámci disertační práce byly měřeny tepelné vodivosti vosků, určena měrná tepelná kapacita vosků, měřeny reologické vlastnosti vosků, viskozita, stanoveny ohybové vlastnosti a zjišťovány závislosti změn objemu vosku v závislosti na teplotě. Pro poslední zmiňovanou zkoušku bylo navrženo a sestaveno experimentální měřicí zařízení. Příklady naměřených závislostí jsou na obrázku 1 a 2.

• 3D NÁMĚRY VOSKOVÝCH MODELŮ LOPATEK

Pro ověření správnosti navrženého procesu v simulaci, bylo zapotřebí provést 3D scan výrobních lopatek. Použily se voskové modely, které byly vyjímány po nejkratší dobu – pro zelený panenský vosk Remet Hyfill B478 lopatka Z1 a pro hnědý rekonstituovaný vosk lopatka H1., aby se eliminovalo ovlivnění výsledků vyjímáním modelů z formy.

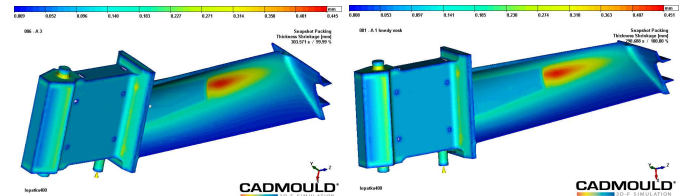


Obrázek 3 Rozměrové odchylky vnitřní strany listu modelu lopatky od CAD modelu.

• NUMERICKÁ SIMULACE LOPATEK

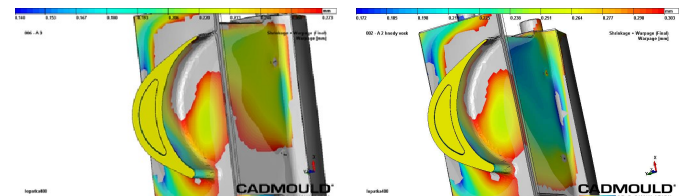
Z analýzy průběhu plnění nastaly při plnění hnědého vosku větší problémy s plněním než u vosku zeleného. Tvarová dutina se hnědým voskem hůře zaplnila, ačkoliv pro vstřikování byly zadané shodné technologické podmínky. Byly analyzovány různé dlouhé doby plnění. Dle provedené analýzy, z hlediska úplného naplnění tvarové dutiny a mírně nižších deformací, nejlépe vyhovuje rozsah doby plnění od 55 s do 80 s, což bylo potvrzeno reálným lisovacím procesem. Simulace průběhu plnění dále odhalila problémy s nerovnoměrným plněním a místy s nebezpečným uzavíráním vzduchu. Toto se projevilo u obou vosků, přičemž u hnědého vosku jsou tyto negativní jevy podstatně markantnější.

Na základě analýzy průběhu tuhnutí vosku, v procentu zatuhlých vrstev od konce plnění, bylo zjištěno kritické místo nad koncem zálitku na listu lopatky. Toto místo pak bylo vyhodnoceno jako kritické místo pro vznik propadů i na základě prvotní analýzy tloušťek stěn v programu Solidworks. Tato predikce se potvrdila při vlastní analýze propadů lopatky u simulace obou vosků.



Obrázek 4 Propady u panenského (vlevo) a rekonstituovaného vosku (vlevo)

Stěžejní pro vyhodnocení simulací byla průběhy deformací. Získané deformační stavy byly převedeny na ekvivalentní jednoosý deformační stav a analyzovány jednotlivé redukované deformace. Redukovaná deformací je průměrný stav, kdy od vypočítaného smrštění a deformace je „odečten“ rozměrový vliv průměrného smrštění.



Obrázek 5 Rez lopatkou a pohled na oblast bandáže – panenský vosk vlevo, rekonstituovaný vosk vpravo

Dle předpokladu, je velikost maximální úchytky u řezu tj. 0,172 mm u hnědého vosku, větší než vypočtená úchytky u zeleného vosku a to 0,14 mm. Simulací bylo ověřeno, že při porovnání průběhu simulovaných deformací a deformací naměřených, je největší hodnota úchytky na vnitřní straně listu lopatky. Její hodnota je však ovlivněna obtížným vyjímáním modelu z formy. Bude-li do budoucna forma opatřena vyvažovací, lze předpokládat, že se hodnoty budou více blížit skutečnosti. Na základě vyhodnocení simulace lze tvrdit, že průběhy deformací odpovídají skutečným naměřeným hodnotám.

• ZÁVĚR

V disertační práci byl pro simulování vstřikování voskového modelu lopatky plynové turbíny použit simulační software Cadmould 3D-F, který byl zvolen z toho důvodu, že i když je původně určen pro vstřikování plastů, tak vosková směs, zkoumaná v této práci, má příbuzné vlastnosti. Po naimportování materiálových dat byla provedena numerická simulace a verifikována s výsledky ze 3D skenovacího měření lopatky z reálného výrobního procesu.

Rozdíl mezi panenským a rekonstituovaným voskem Remet Hyfill B478 jednoznačně dokazují výsledky provedených měření vlastností vosků, které se vzájemně lišily, Rekonstituovaný vosk vykazoval ve všech měřeních odlišné parametry než vosk panenský.

Z panenského vosku Remet Hyfill B478 byla vyrobena zkušební série 18 kusů lopatek. Z vosku rekonstituovaného bylo vyrobeno 11 kusů lopatek plynové turbíny. Obě série byly vyráběny za stejných procesních parametrů. Dle předpokladů se u lopatek z obou druhů vosků projevily, v závislosti na délce vyjímání ze vstřikovací formy, deformace ve střední části listu a v oblasti bandáže.

Numerická simulace potvrdila přítomnost dvou kritických míst na modelech lopatek – oblast střední části listu a oblast bandáže. Dále upozornila na problematické doplnění hrany tvaru listu u hnědého vosku. V zámkové části u obou lopatek docházelo k uzavírání vzduchu a nacházejí se zde místa s rizikem vzniku studených spojů. Výsledky simulace predikovaly kritická místa v oblasti střední části listu a bandáže, která 3D skenovací měření potvrdilo. Vyčíslené odchylky byly řádově srovnatelné s výsledky simulace. Pro voskový model je kritický především průběh deformací a deformační místa, která byla u skenovacího měření a simulace totožná.

Na základě vyhodnocení všech experimentů, rekonstituovaný vosk nelze použít na výrobu lopatek, ale nalezne uplatnění při výrobě vtoků a technologických částí.