

# PROBLEMATIKA SIMULACÍ LISOVÁNÍ VOSKOVÝCH MODELŮ K TECHNOLOGII PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ VOSK

Aleš HERMAN, Marek ČESAL

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Technická 4, 16607 Praha 6,  
ales.herman@fs.cvut.cz

## Úvod

Tento příspěvek se zabývá parametry ovlivňujícími přesnost jak voskového modelu tak i odlitku při lití na vytavitelný model, zvláště se v tomto příspěvku soustředíme na přesnost voskového modelu.

Jako typový odlitek byl zvolen odlitek lopatky pro energetiku. V simulacích se jedná o reálnou simulaci procesu s využitím software ProCAST (moduly HPDC, Thermal a Stress) a stanovení vlivu řízeného chlazení a rovnání modelu na deformaci voskového modelu. Experimenty jsou hodnoceny z hlediska teplotního pole, prostřednictvím termokamery, a z hlediska deformací měření na souřadnicovém měřicím stroji.

## 1. Problematika získávání termomechanických dat voskových směsí

Simulační software ProCAST obsahuje databázi celé řady materiálů, obsahuje i jeden přestavitel vosku, který však nedává dobré výsledky. Takže databázi je tak nutné doplnit o vlastnosti materiálu – vosku, potřebné pro výpočet simulace. Pro simulaci průběhu tuhnutí a deformací je využíváno modulů Thermal a Stress, pro tyto moduly je potřeba do softwaru dodat následující materiálové parametry:

### Modul Thermal

- Součinitel tepelné vodivosti [W/m/K]
- Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]
- Měrná tepelná kapacita [kJ/kg/K]

### Modul Stress

- Youngův modul [MPa]
- Poissonův poměr
- Součinitel teplotní roztažnosti [1/K]
- Modul pružnosti ve smyku

Pro jednotlivé parametry jsou zadávány jejich závislosti na teplotě.

Dále se ukázalo, že tato data zcela nepostačují (bez simulace dotlaku voskové směsi – tedy plnění voskové formy docházelo ke vzniku deformací stažením voskové směsi již ve formě), takže musela být zahrnuta i data potřebná k plnění – zejména viskozita, podíl tekuté frakce.

K získání těchto termomechanických dat je možné použít různé kalorimetrické metody, pro vosky se nejčastěji používá metoda diferenční skenovací kalorimetrie (differential scanning calorimetry – DSC), tato metoda je také nejrozšířenější metodou termické analýzy polymerů. Pomocí DSC je tedy zjišťováno množství tepla dodaného nebo odebraného v průběhu reakce (fázové přeměny). Výstupem z DSC je graf – křivka závislosti tepelného toku na čase nebo teplotě (obr. 1).

Reakce se projeví změnou vnitřní energie – entalpie H, zvyšování entalpie dochází v průběhu endotermických reakcí (ohřev, vypařování, skelný přechod), exotermické

reakce vedou ke snížení entalpie soustavy (krystalizace, vytvrzování). Kde plocha píku na křivce je rovna množství tepla pohlceného nebo uvolněného při reakci. Entalpická změna,  $\Delta H$ , je definována jako změna vnitřní energie v závislosti na čase

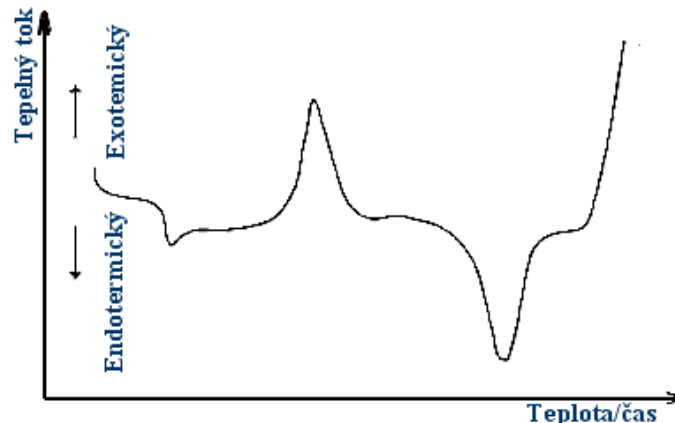
$$\Delta H = \int c_p dT$$

kde  $c_p$  [ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku

Pro určení použijeme rovnici pro tepelný tok:

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot v_H$$

kde  $m$  je hmotnost vzorku,  $v_H$  je rychlost ohřevu.



**Obr. 1:** Průběh křivky DSC [1]

### 1.1 Princip DSC

Metoda je založena na porovnávání tepelných toků mezi měřeným a referenčním vzorkem. U referenčního vzorku nesmí v celém teplotním rozsahu měření docházet k žádným změnám, změně měrné tepelné kapacity, fázovým přeměnám atd. Rozlišují se dvě základní formy DSC:

- ✓ Power compensation DSC - referenční a měřený vzorek je umístěn každý v jiné cele (testovací komoře). Do obou komor je dodáváno stejné množství tepla, rozdíl teplot je nulový, v momentě kdy dojde u měřeného vzorku ke změně, která je doprovázena poklesem nebo nárůstem teploty, je tato kompenzována změnou příkonu do komory s měřeným vzorkem. Změna v dodané energii je pak zaznamenávána.
- ✓ Heat-flux DSC - měřený i referenční vzorek jsou umístěny v jedné komoře, oběma je tedy dodáváno stejné množství tepla. Změna teploty u měřeného vzorku se opět zaznamenávána, a následně přepočítána na změnu tepelného toku.

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $W/m/K$ ] vyjadřuje schopnost látek vést teplo. Číselně vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky, při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. Princip měření spočívá v zaznamenávání teplot v bodech různě vzdálených od zdroje tepla. Pro měření tepelné vodivosti lze dnes využívat automatické přístroje s příložitými sondami. Sonda má pro pevné materiály obvykle kruhový tvar, v jejím středu je umístěn tepelný zdroj, okolo zdroje jsou pak v různých vzdálenostech umístěny teplotní senzory, po tepelném impulsu pak zaznamenávají rozdíly teplot.

## 1.2 Termomechanická analýza a tenzometrická analýza

Termomechanické analýzy je metodou při níž je vzorek vystaven statickému či dynamickému zatížení, průběh deformace je pak zaznamenáván v závislosti na teplotě, či čase. Je možné tímto způsobem zjišťovat délkovou teplotní roztažnost, teploty skelného přechodu, tavení, měknutí, dále moduly pružnosti, je také možno vyšetřovat creepové vlastnosti zkoumaného materiálu.

Pro experimentální zjišťování stavu napjatosti a deformace materiálu se dnes využívá tenzometrických snímačů. Princip spočívá v lineární závislosti odporu na prodloužení materiálu tenzometru. Dnes jsou nejrozšířenější foliové tenzometry, vyráběné metodou tištěných spojů, nebo různé formy polovodičových tenzometrů. Tenzometrické snímače jsou nabízeny v širokém sortimentu velikostí a tvarů měřicích mřížek podle účelu použití.

V případě vosků je nejvhodnější tenzometr přímo zatavit do zkoumaného vzorku. V případě součinitele teplotní roztažnosti pak můžeme zahříváním vzorku snadno zaznamenat průběh délkové roztažnosti, následně pak i koeficient  $\alpha$ . Při měření délkové roztažnosti je možné použít jednomřížkový tenzometr.

Vzhledem k tomu, že modul pružnosti v tahu, smyku i Poissonův poměr jsou ve vzájemném vztahu, je možné je také určit z jediné zkoušky a to zkoušky tahem, kdy se deformace zkušební tělesa měří pomocí tenzometrů.

Pro detekci změny délky zároveň i průměru je potřeba použít tenzometr dvěma na sebe kolmými mřížkami. Teplotní závislost pak zjišťujeme zahřátím vzorku na příslušnou teplotu a zaznamenáním závislosti napětí-deformace.

K vlastnímu zjišťování: Pro experimentální zjišťování stavu napjatosti materiálu se dnes využívá tenzometrických snímačů. Princip v lineární závislosti odporu na prodloužení materiálu tenzometru. Tenzometrické snímače jsou nabízeny v širokém sortimentu velikostí a tvarů měřicích mřížek, je tedy snadné najít snímač vhodný pro konkrétní experiment.

Průběh relaxační křivky je dalším podstatným vstupem, důležitým pro simulaci deformací modelu.

Relaxační křivka se určí tak, že zkoumaný vzorek je deformován konstantní rychlostí, při konstantní teplotě až do určitého napětí. Následně poté co je zastavena deformace je sledován pokles napětí v závislosti na čase.

## 2. Postup simulace v software ProCAST

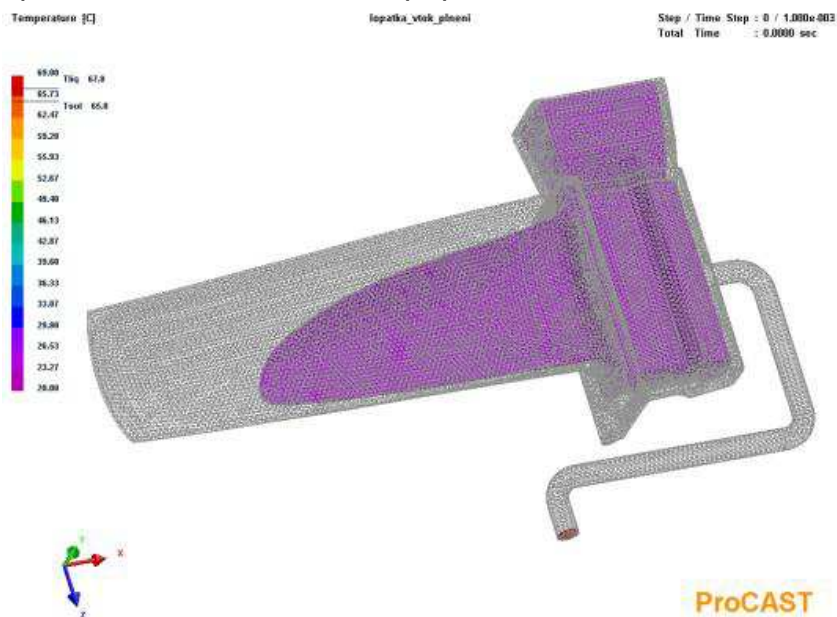
Pro omezení nutnosti při každé navržené úpravě technologických parametrů lití vytvořit ověřovací sérii odlitků, je používán slévárenský simulační software ProCAST 2012. Vzhledem k obrovské šíři parametrů, které umožňuje software ProCAST měnit, bylo možné použít simulace jak tuhnutí voskových modelů, tak odlitků ze slitiny Inconel 738 LC.

Simulační software ProCAST je založen na FEM výpočtech, tedy prvním krokem je vytvořit 3D modely všech simulovaných součástí, druhým krokem je vytvořit na modelech tetragonální síť (viz obr. 2 a 3), třetím krokem pak je nastavit správně všechny parametry procesu lití či tuhnutí přesně podle skutečného děje. Poté můžeme spustit samotný výpočet a zbývá již jen vyhodnotit výsledky.

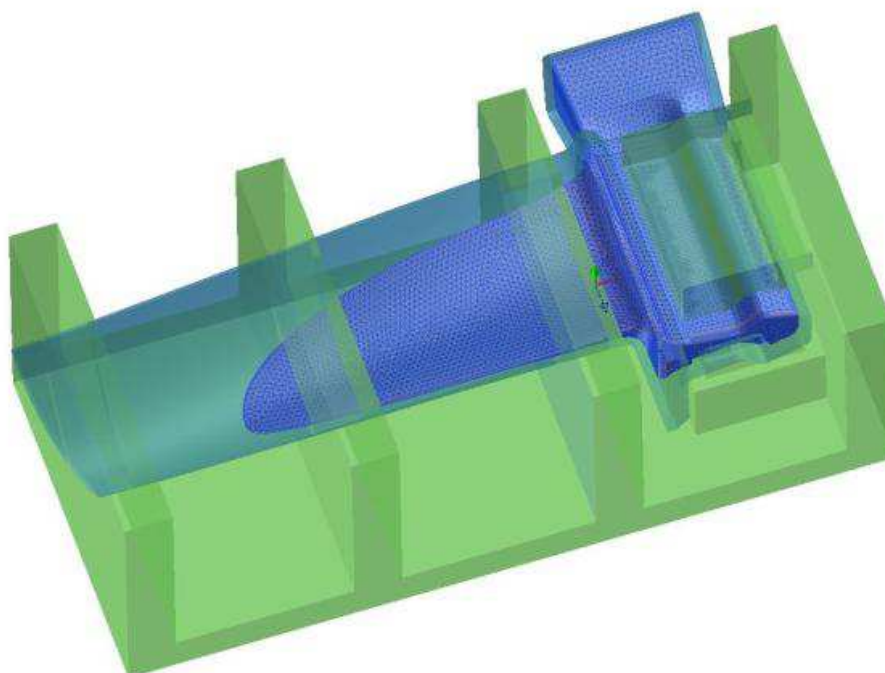
### 2.1 Vytváření 3D modelů

Pro potřeby naší simulace bylo třeba vytvořit modely lopatky, voskového zálitku (chladítka) a fixačního přípravku (úpinku) pro tuhnutí. 3D model lopatky vycházel z původní výkresové dokumentace a modelů použitých pro výrobu formy na vstřikování vosku. Model přípravku byl vytvořen na základě zjednodušení 3D modelu

skutečného přípravku. Pro tvorbu 3D modelů byl použit modelovací software SolidWorks 2012. Pro potřeby simulačního software je třeba mít modely co nejvěrnější ve všech funkčních rozměrech, oproti tomu co nejjednodušší, aby se daly lépe pokrýt tetragonální sítí. Na modelu lopatky tedy došlo oproti skutečnému odlitku k několika zjednodušením, jako např. odstranění popisků lopatky, odstranění drobných výstupků atd. Model upínku je zcela věrný v dosedacích plochách a všech rozměrech, které na tuhnoucí lopatce fixuje, ovšem ve všech tvarových detailech, které nejsou pro přesnost simulace důležité je zjednodušen na základní tvary. Dosedací plocha byla sdílena lopatkou i upínkem, tedy počítá s idealizovanou situací, že lopatka dokonale dosedá do přípravku.



**Obr. 2:** Tetragonální 3D mesh lopatky se zálitkem



**Obr. 3:** Mesh lopatka – zálitok – fixační přípravek

## 2.2 Tvorba sítě

Pokrytí získané modely plošnou trojúhelníkovou sítí a následně vyplnit modely objemově tetragonální sítí byl časově velmi náročný úkol. Přestože samotné pokrytí ploch sítí probíhá automaticky, je třeba pro každou hranu zvolit počet požadovaných uzlů, tím tedy požadovanou jemnost sítě v daném místě. Na styčných plochách obou těles je třeba zajistit pokrytí stejnou sítí, aby nedocházelo k prolnutí těles, s čímž si samotný simulační software umí poradit jen zřídka. Na samotné funkční ploše lopatky bylo nutné vytvořit mnoho menších ploch, jelikož parametricky definovanou plochu není možné pokrýt automaticky sítí trojúhelníků. Po vytvoření povrchové sítě bylo nutné důkladně zkontrolovat síť na celém povrchu modelů a všechny chyby opravit tak, aby síť měla požadované parametry trojúhelníků. Tedy odstranit příliš ostré úhly u vrcholů a příliš malé trojúhelníky vznikající na styčných ploch. Po opravě povrchových sítí bylo vytvořeno několik výsledných tetragonálních sítí pro termomechanické výpočty v simulačním software ProCAST. Komplikací bylo, že bylo třeba zachovat číslování uzlů pro jednotlivé případy tuhnutí, tedy samotná lopatka z vosku, lopatka z vosku v upínku a odlitek lopatky ze slitiny Inconel 738 LC. Toto bylo třeba z důvodů načítání výsledků mechanických deformací a pnutí z jednotlivých kroků simulace vždy jako počáteční podmínky do dalšího kroku. Tzn., že bylo nutné provedení sítě na všech objemech (voskový zálitok – chladítko, lopatka a upínek) zároveň a v následujících výpočtech musely být jednotlivé objemy potlačeny. Z tohoto pohledu se software jeví trochu nelogicky, protože logika věci znamená načítat každou součást jako samostatnou část a objem (parts a volume), ale pak nejde vytvořit mesh. Je tedy nutné objemy přičítat a pak provést vyhledání intersekcí (je nutný aby byl 1 parts a např. 3 volumes).

Na obrázcích 2 a 3 je vidět povrchovou trojúhelníkovou sítí lopatky v upínku. Je patrné, že v různých místech modelu je síť různě jemná tak, aby byly v důležitých místech zachovány detaily. Výsledná prostorová tetragonální síť měla v tomto případě 5,3 mil. prvků. Bez optimalizace jemnosti sítě měla výsledná tetragonální síť 10,2 mil. prvků.

## 2.3 Nastavení parametrů simulace

Jak již bylo naznačeno, simulace se snažila zcela přesně kopírovat fyzický proces tuhnutí, tedy v jednotlivých krocích bylo využito možnosti software ProCAST načíst jako výchozí stav deformace a pnutí v odlitku výsledky z předchozí simulace. Jednotlivé kroky simulace, které bylo třeba provést, byly tyto:

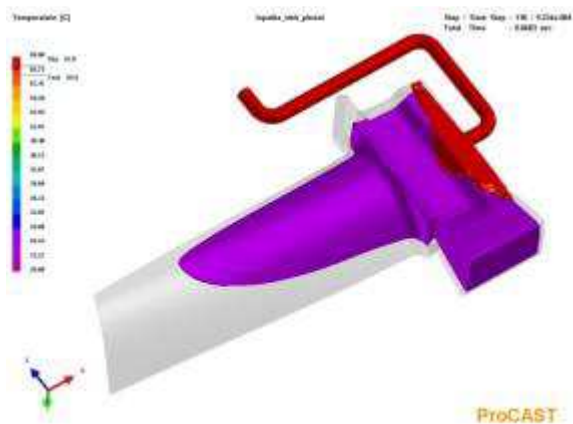
- ✓ plnění kovové formy voskem (vstříknutí vosku na vstříkstroji)
- ✓ tuhnutí vstříknutého vosku v kovové formě
- ✓ volné chladnutí voskové lopatky na vzduchu během upevňování do upínku
- ✓ dotuhnutí voskové lopatky fixované ve fixačním přípravku
- ✓ volné tuhnutí voskového modelu uloženého ve skladu
- ✓ tuhnutí výsledného odlitku ze slitiny Inconel 738 LC
- ✓ relaxace voskového modelu

V této primární fázi výzkumu byly při simulacích jako materiál pro voskový model lopatky použity experimentálně naměřené vlastnosti voskové směsi.

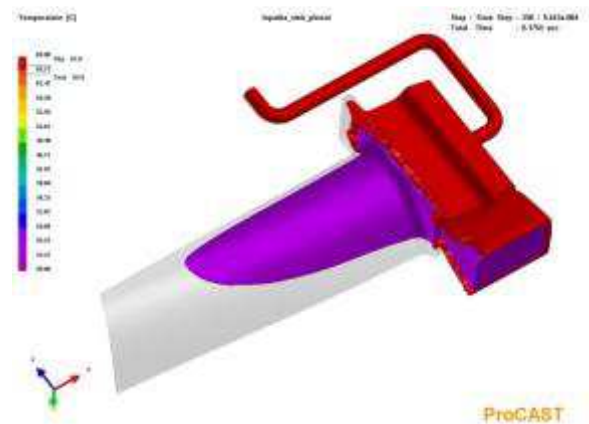
Parametry plnění simulace:

- Vosk s PS plnivem – vstříkovací teplota 69°C
- Teplota zálitku – 20°C (materiál totožný s lopatkou)
- Teplota vstříkovací formy – 30°C
- Chladnutí v přípravku – na vzduchu, teplota okolí

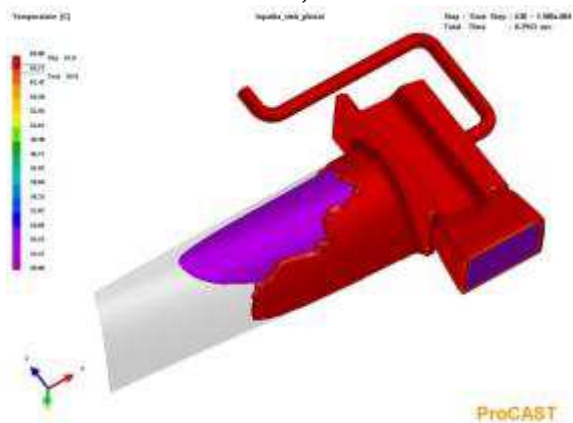
- Relaxace – ponecháno za teploty okolí
- Cyklus – 50s ve formě, 60 s manipulace bez přípravku, 300 sekund chlazení v přípravku



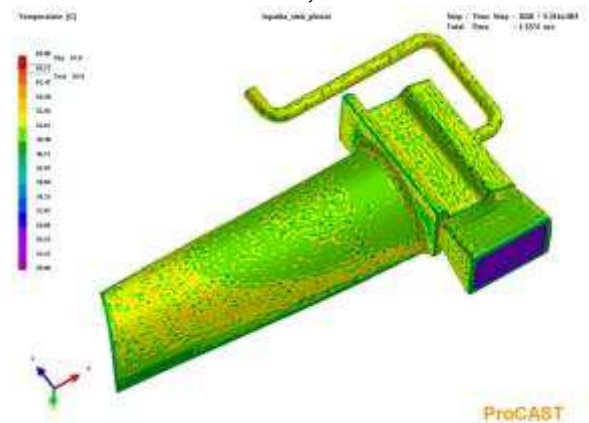
**Obr. 4:** Plnění voskové lopatky čas 0,07 s



**Obr. 5:** Plnění voskové lopatky čas 0,18 s



**Obr. 6:** Plnění voskové lopatky čas 0,3 s



**Obr. 7:** Teplotní pole voskového modelu ihned po naplnění

## 2.4 Simulace

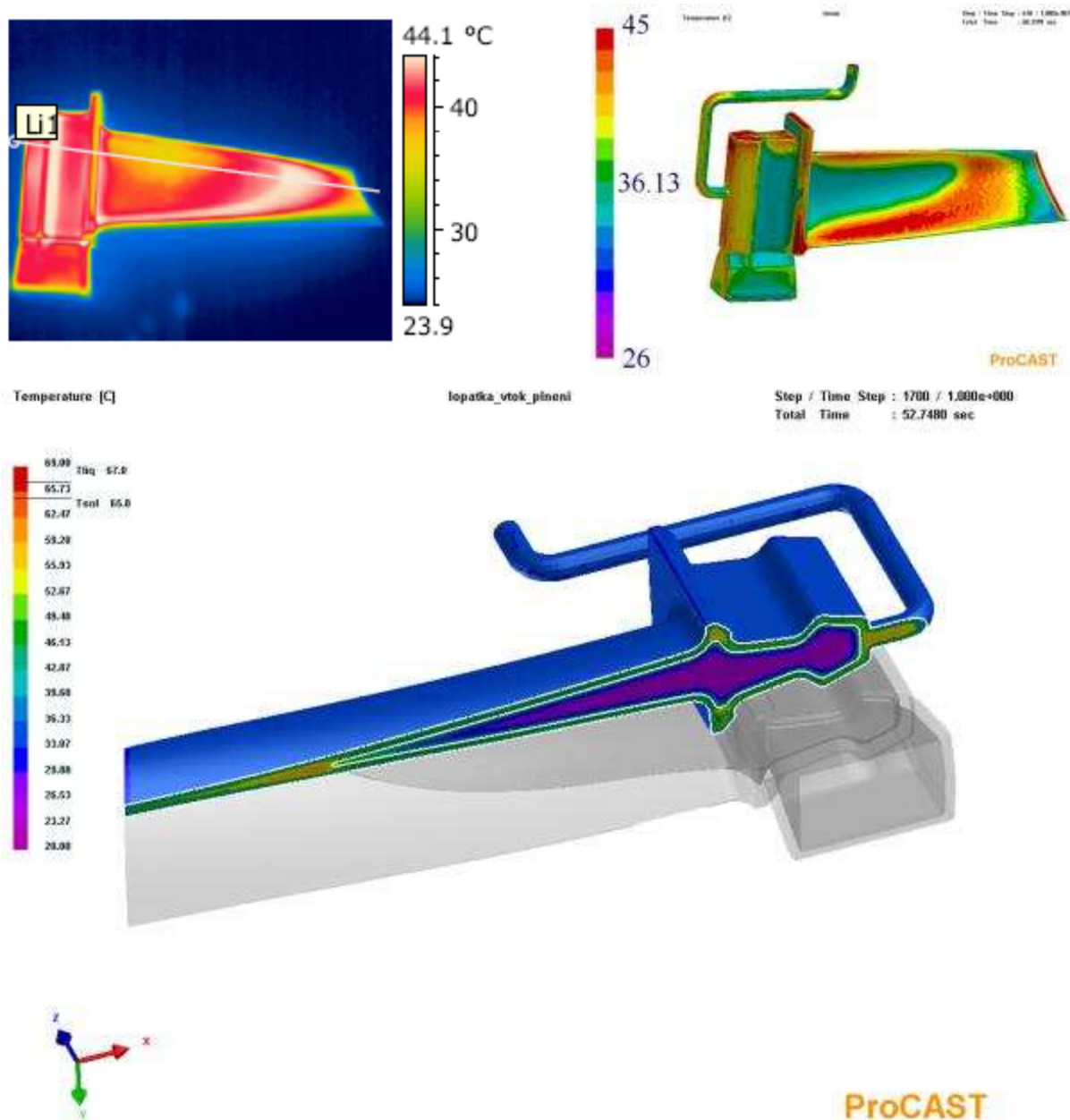
Simulace samotná probíhá zcela autonomně a jediný požadavek, který v tomto případě vznikl, byl značný výpočetní výkon. Výpočty probíhaly na výpočetní stanici osazené 6 jádrovým procesorem AMD 1100T (6x3,4GHz) a 16GB RAM. Díky tomu, že použité modely měly velmi jemnou síť, aby bylo dosaženo přesných výsledků, probíhaly simulace v řádech desítek hodin na jednu. Zajímavostí je, že během výpočtu využíval software ProCAST až 14GB operační paměti a CPU mělo 4 jádra vytižena kompletně na 100% po celou dobu výpočtu. Plnění voskového modelu lopatky ukazují obr. 4 – 7 – včetně pole rozložení teploty na konci plnění.

## 2.5 Výsledky

Po odstranění všech chyb v celém procesu simulace byly získány výsledky teplotního pole, rozložení tekuté a tuhé části jak vosku, tak slitiny Inconel 738 LC, pnutí a deformace na všech částech a ve všech krocích. Přímé porovnání výsledků ze simulací a naměřených dat ukázalo, že řádově dochází ke shodě deformací z hlediska amplitudy, bez výjimky došlo k deformaci stejným směrem jak v simulaci, akorát s ohledem na to, že numerický model počítá s chováním kovů nikoliv

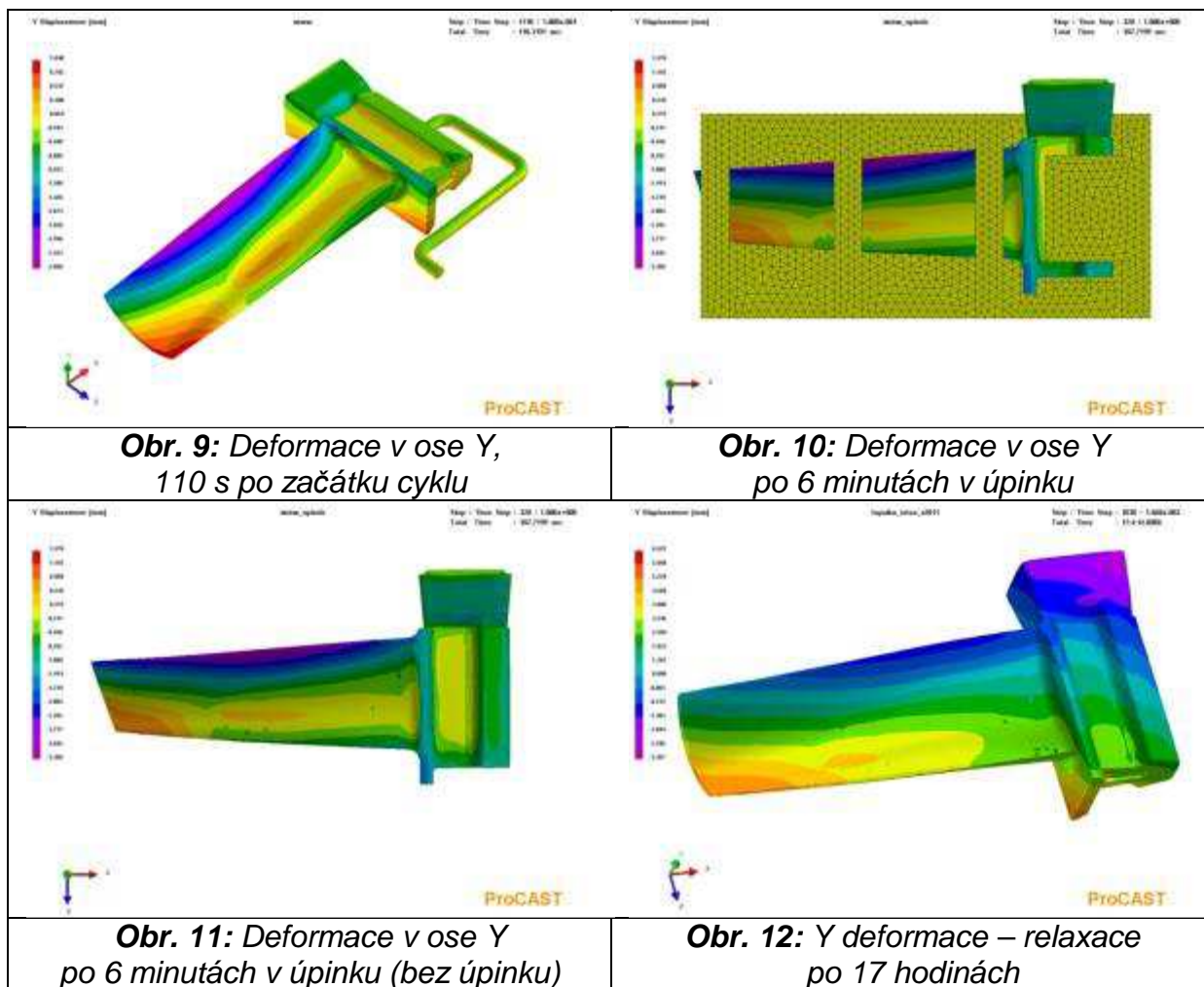
polymerů, bude třeba některé termomechanické veličiny upravit tak aby výsledky plně odpovídaly reálným hodnotám zjištěných na laserscanech a 3D souřadnicovém měřícím stroji.

Srovnání teplotního pole - simulace a reálná teplota snímaná termo-kamerou – viz obr. 8 a-c.



**Obr. 8 a, b, c:** teplotní pole po 50 s (tedy po vyjmutí z formy – simulace ve srovnání s termokamerou a řez lopatkou

Deformace – byly sledovány zejména v ose Y, která je z pohledu zákazníka nejdůležitější. Obrázky výsledků simulace deformace v ose Y ukazují obr. 9 – 11. Relaxační chování voskového modelu po 17 hodinách obr. 12. Reálně naměřenou deformaci lze vidět na obr. 13.



Naměřená deformace odpovídá deformaci simulované.

### Závěr

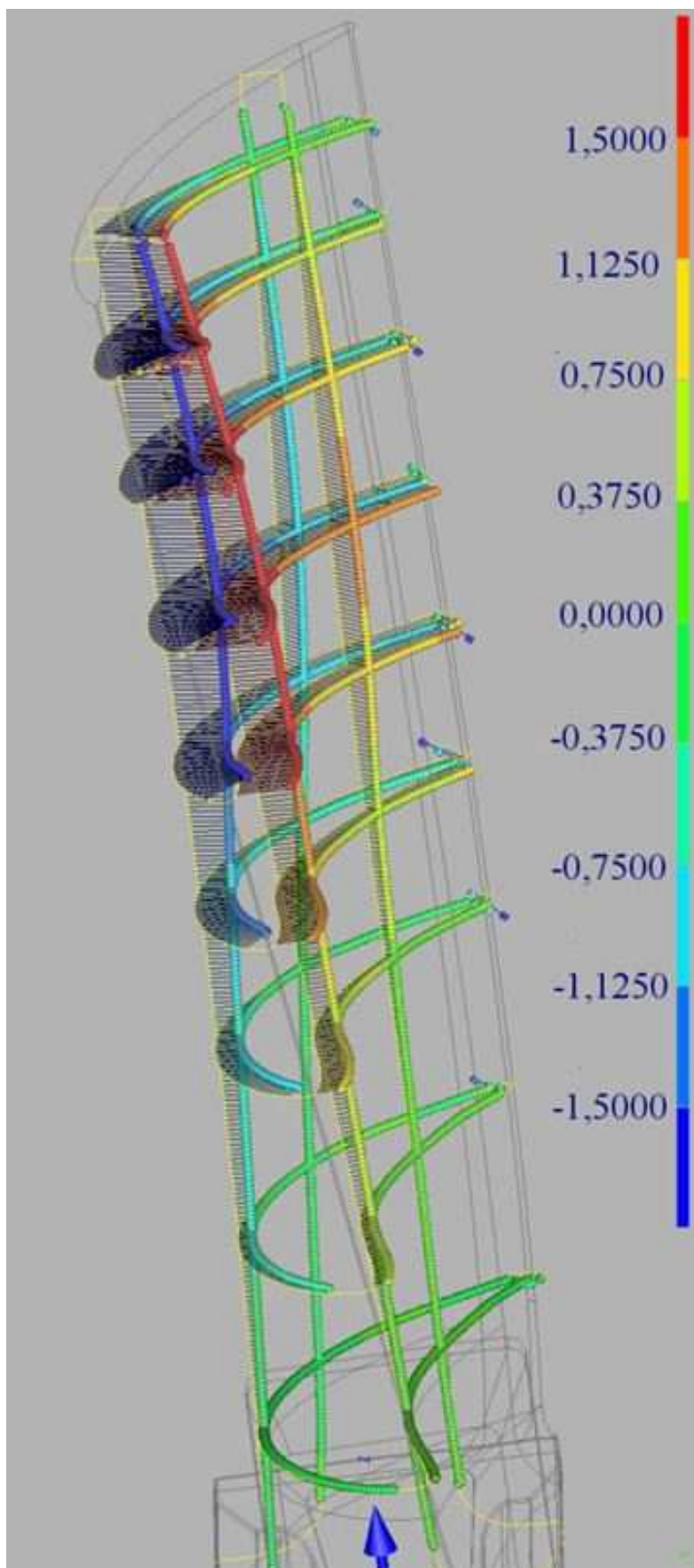
Z předložených výsledků je vidět, že experimentálně zjištěná data pro daný typ vosku vedou opravdu k odpovídajícím výsledkům, pokud se týká deformací a teplotních polí. Vše bylo ověřeno pomocí termokamery, laser scanu a 3D měřicího stroje.

Nyní lze akorát provést drobné retuše v termofyzikálních vlastnostech vosků, aby skutečně simulace dávali reálné výsledky. Jak bylo popsáno výše polymery (vosky) se chovají zcela jinak než kovy a s tím matematický model již nepočítá – takže bude nutná úprava těchto experimentálních dat, aby výsledky již zcela odpovídaly realu.

### Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za podpory projektu TA01011425 „Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu.“ vypsáno Technologickou agenturou ČR v rámci programu ALFA.





**Obr. 13:** Skutečná deformace naměřená na 3D SMS

## LITERATURA

- [1] ŠTARHA, Pavel a Zdeněk TRÁVNÍČEK. Termická analýza. In: [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011, [cit. 2012-02-21]. Dostupné z: [http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka\\_analyza.pdf](http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka_analyza.pdf)
- [2] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMEN. Experimentální Mechanika [online]. Brno: VUT v Brně, 2003 [cit. 2012-02-21]. Dostupné z :[http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/\\_studium\\_/opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium_/opory/Experimentalni_mechanika.pdf)
- [3] BĚLOHLÁVEK, Luboš. Stanovení hustoty plastů imerzní, pyknometrickou a flotační metodou. In: [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/laboratore/N/4aa.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/laboratore/N/4aa.pdf)
- [4] BONK, David a Phil HANCOCK. Advanced Wax Testing and Subsequent Wax Development [online]. 2011. vyd. 13th World Conference on Investment Casting, Kyoto, Japan: The Blayson Group Ltd, 2012 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl20.pdf>
- [5] Nick CANNELL, Mark SAMONDS, Adi SHOLAPURWALLA a Sam SCOTT. ESI GROUP NA. Predicting Pattern Tooling and Casting Dimension for Investment Casting [online]. Bloomfield Hills, 2008 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/1024605/1024605.pdf>
- [6] Yi-wei DONG, Kun BU, Yang-qing DOU a Ding-hua ZHANG. TRANSACTIONS OF NONFERROUS METALS SOCIETY OF CHINA. Determinaton of wax pattern die profile for investment casting of turbine blades [online]. Xi'an China, 2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/1024605/1024605.pdf>
- [7] Yi-wei DONG, Kun BU, Yang-qing DOU a Yangliu DOU. FOUNDRY WORLD. Reversing design methodology of investment casting die profi le based on ProCAST [online]. Xi'an China, 2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/201052861524421.pdf>
- [8] REZAVAND, S. A. M. a A. H. BEHRAVESH. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2006, s. 580-587 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606008405>
- [9] DROZD, Zdeněk. Deformační zkouška - cesta k poznání mechanických vlastností materiálu. FyzWeb [online]. 2001 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://fyzweb.cuni.cz/knihovna/deformace/index.htm>
- [10] HORÁČEK, Milan. ACCURACY OF INVESTMENT CASTINGS. In: [online]. Brno: VUT v Brně, 2005 [cit. 2012-06-14]. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/2004/accuracy-of-investment-castings.pdf>
- [11] BROWN, Robert J. REMET UK. The Effects of Fillers on the Physical Properties of Investment Casting Waxes. Rochester, UK, 1998.