

# POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název posuzované práce:

NUMERICKÉ SIMULAČNÍ VÝPOČTY VE SLÉVÁRENSKÝCH  
PROCESECH A MATERIÁLECH

Doktorandka:

**Ing. Josef Horáček**

Školitel:

**prof. Ing. Iva Nová, CSc.**

Recenzent:

**prof. Dr. Ing. Libor BENEŠ, IWE**

*Fakulta výrobních technologií a managementu, katedra technologií  
a materiálového inženýrství*

Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem

Oponovaná disertační práce, předkládaná ve studijním programu P2303 *Strojírenská technologie*, resp. ve studijním oboru 2303V002 *Strojírenská technologie*, na *Katedře strojírenské technologie*, Fakulty strojní, Technické univerzity v Liberci, vychází z části teoretické, zaměřené na základy slévárenství, tepelných dějů a tepelně-fyzikálních veličin slévárenských materiálů.

Následuje shrnutí dosavadních poznatků v oblasti simulačních výpočtů, jež jsou v podstatě jádrem celé práce, dále pak výčet a diskuse dosažených výsledků, vycházejících z řady experimentů, realizovaných na řadě vybraných grafitických litin a směřujících k návrhu predikce chování u této skupiny materiálů.

Jedná se vesměs o sofistikované výpočtové nástroje na popis procesu tuhnutí a chladnutí odlitků, které ve spojení s perspektivními technologiemi a materiály řeší mechanické namáhání na úrovni mikrostruktury (při zatěžování vnější silou), přičemž dokáží posoudit, resp. eliminovat její nehomogenitu, a tím i umožňují predikci chování struktury odlitku v rámci působení napěťových stavů a případných materiálových defektů.

Proto z hlediska inženýrsko-aplikačního, tzn. s ohledem na následné využití presentovaných výstupů v technické praxi, se jedná o velice zajímavé a bezesporu perspektivní výpočtové (simulační) nástroje, jakož i materiály a technologie, vhodné pro široké spektrum aplikací, od automobilového (viz příklady na str. 133) až po spotřební průmysl. Proto zvolené téma disertace považuji za velice aktuální, což významným způsobem zvyšuje potenciál získaných výsledků. Celkovým zaměřením předmětná problematika disertace rovněž i plně vyhovuje danému studijnímu oboru, resp. programu. Pro daný obor lze tedy práci označit za přínosnou.

Z metodického pohledu bylo zvoleno posouzení vybraných slitin neželezných kovů (Al, Zn, AlSi12) pro simulační výpočty tepelných polí. Druhou skupinu materiálů pro výpočtové modelování pak představují grafitické litiny, pro které byly vytvořeny tři různé simulační modely, z reálných snímků mikrostruktury. Z pohledu recenzenta hodnotím celkově předmětnou disertační práci po stránce obsahové i formální jako poměrně dobře propracovanou a koncepčně vyváženou. Pro čtenáře je přehledná a konsistentní, a to nejen z hlediska celkového uspořádání, systematického členění, zvolené struktury a logických návazností.

Disertant při samotném zpracování dílčích úloh, jednotlivých experimentů a výpočtových simulací vycházel z přístrojového, laboratorního i personálního zázemí, kterým disponuje školící pracoviště. Nutno zde zmínit také dobře provedenou, byť poněkud stručnou, rešerši současného stavu poznání v dané oblasti, zahrnující celkem 57 citovaných prací z odborné literatury (domácí i zahraniční). O publikační aktivitě autora pak svědčí uvedených 9 výstupů v odborných časopisech a na mezinárodních konferencích, které se přímo vztahují k řešené problematice.

Předložené závěry (od str. 137), jakož i přínosy práce považuji, v souladu s vytyčenými záměry a cíli, za vhodně koncipované a zdařile propracované. Z porovnání samotného zadání (jednotlivých úloh) hodnocené práce, tak jak je uvedeno ve specifikaci „cílů disertační práce“ (str. 9), s obsahem jejích jednotlivých částí (závěrečného shrnutí), mohu konstatovat, že posluchač beze zbytku naplnil stanovené požadavky, čímž splnil i zadané cíle.

Jako hlavní přínos a těžiště celé posuzované práce spatřuji především její experimentálně-výpočtovou částí, která má poměrně široký záběr a logicky navazuje na samotné zadání, vyplývající z provedené analýzy *state of the art*. Autor zde předkládá poměrně velký objem původních výsledků, podpořených vhodně provedeným experimentálním aparátem, včetně diskuse a formulace dílčích závěrů. Proto mohu závěrem svého posudku konstatovat, že oponovaná doktorská disertační práce je přínosná svým zaměřením i vkladem nových poznatků, zejména z oblasti fyzikálně-metalurgické interpretace provedených experimentů a následně předkládaných výpočtových simulací, navíc s přímým dopadem do aplikační sféry.

#### **K hodnocené práci mám následující otázky, resp. náměty do diskuse (k obhajobě):**

- Aniž bych chtěl jakkoliv snižovat úroveň této práce, nemohu si zde odpustit určitou výhradu, týkající se její formální stránky, resp. poměrně častého výskytu gramatických a stylistických nepřesností. Na str. 70 zmiňuje autor (viz popisek k Obr. 4.1.7) tzv. „Ztuhlí odlitek ...“. Na str. 104 potom uvádí „...dodržení jednotlivých faktory ...“; na str. 105 „Z toho vyplývá...“; na str. 108 komentuje strukturu po „sledování na laserovým konfokálním mikroskopu“; na str. 138 mu pak „Čisté neželezné kovy usnadnil...“ aj.
- Musím dále konstatovat, že mi nebyl příliš jasný systém označování obrázků a tabulek. Není v souladu ani s pořadím kapitol (např. v kapitole 5.6 je na str. 105 zařazena Tab. 5.3, ale hned na další straně se objevuje obrázek s označením Obr. 4.4.9), ani s vzestupným číslováním v logickém sledu.
- V kapitole 5.6 si autor poněkud protiřečí, když na str. 107 ukazuje „model odlitku tělesa volantu ze slitiny hořčíku“, ale hned na str. 109 uvádí, že „uvažované slitiny hliníku pro výrobu volantů musí vykazovat vyšší tažnost atd“.
- Zajímalo by mne, podle jakého „klíče“ bylo u *Simulačních výpočtů predikce chování grafitických litin* (kap. 6) voleno *zatížení modelu*, resp. tzv. „*zatížení vnější silou*“, na které se autor odvolává i v závěrečném resumé získaných výsledků (str. 133).

#### Závěrečné shrnutí:

**Závěrem mohu shrnout, že hodnocená disertační práce pana Ing. Josefa Horáčka má požadovanou odbornou úroveň, je vědecky přínosná a zároveň předkládá nové poznatky vedoucí i k praktickým aplikacím. Jejím vypracováním disertant prokázal způsobilost k samostatné a tvořivé vědecké práci.**

**Recenzovanou práci proto doporučuji k obhajobě.**

**V případě úspěšné obhajoby doporučuji Ing. Josefu Horáčkovi udělit vědeckou hodnost Ph.D.**

prof. Dr. Ing. Libor Beneš,

doc. Ing. Libor Čamek, Ph.D.  
VŠB-TU Ostrava, FMMI

## OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační práce

---

Název: **Numerické simulační výpočty ve slévárenských procesech a materiálech**

Práci předkládá: **Ing. Josef Horáček**

Téma předložené disertační práce je vysoce aktuální a dosažené výsledky jsou cenné právě tím, že je bude možné postupně promítnout jako pomocné nástroje do provozní praxe.

Po obecných úvodních kapitolách následuje třetí kapitola, která tvoří teoretický základ práce a zároveň ji lze označit za popis současného stavu poznání s názvem *Podmínky pro simulace tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenské formě*. V první části je uvedena řada komerčních softwarů pro sledování tuhnutí odlitků v předešlých letech a v současnosti. Další část se věnuje tepelným dějům při plnění a tuhnutí mezi odlitkem a formou, kde dochází k procesům sdílení a přenosu tepla mezi povrchy odlitku a formy, případně mezi odlitkem, mezerou a formou. Následuje výpis tepelně-fyzikálních veličin slévárenských materiálů významných při řešení pomocí numerických simulačních výpočtů u tepelných procesů mezi odlitkem a formou především pro tuhnutí a chladnutí odlitků, který je doplněn popisem fyzikálních veličin kovů a slitin odlévaných materiálů, které výrazným způsobem ovlivňují celý definovaný proces. Kapitola simulační výpočty uvádí význam a rozvoj CAE, jeho nástroje, skladbu řešení při jeho uplatnění ve slévárenství. Jsou zde představeny nejpoužívanější numerické metody využívané pro modelování slévárenských procesů. Poslední podkapitolou této teoretické části je představení funkce matematického modelu v programu QuickCAST, který byl využíván v rámci této disertační práce.

Čtvrtá kapitola je druhou teoretickou částí práce, která se věnuje teoretickým základům grafitických litin. Popisuje charakteristiku jednotlivých druhů litin, jejich strukturní složky a krystalizaci litin. Uvádí mechanické vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem, statické mechanické vlastnosti, matematické vztahy k jejich výpočtu včetně výpočtu mechanických vlastností nutných pro určení velikosti sil nutných při simulaci a popisu vlivu deformace na chování mikrostruktury LLG. Popisuje vliv dynamických mechanických vlastností litiny s lupínkovým grafitem, vliv termomechanické únavy LLG. Poslední částí teoretického úvodu tvoří podkapitola s úvodem do problematiky chování grafitických litin.

Významnou částí práce je pátá kapitola, která obsahuje experimenty, které byly prováděny za účelem zjišťování časových závislostí v tepelné ose odlitku a v různých místech slévárenské formy při proměnlivých teplotách a různých odlévaných materiálech. Tato kapitola je nazvaná *Experimentálně-výpočtová část tepelných procesů*, kde byly experimenty zaměřeny na zjištění hodnot součinitele prostupu tepla mez odlitkem a formou za pomoci simulací.

První dvě podkapitoly se zabývají popisem měřicího zařízení pro potřeby experimentů a definují použití slévárenských materiálů z oblasti neželezných kovů.

Třetí část této podkapitoly se věnuje obsahu souhrnu výsledků experimentů z dílenských měření teplotních polí v odlitku a kokile. Výsledky z některých experimentů byly vybrány pro účely simulačních výpočtů.

Navazující část se věnuje simulačním výpočtům tuhnutí a chladnutí odlitků pro vybrané materiály v ocelové kokile, které byly označeny jako čistý hliník, čistý zinek a slitina hliníku (silumin). Výpočty

byly prováděny v programu QuikCAST. Obsah chybějící databáze programu byl doplněn tepelně fyzikálními veličinami včetně nových materiálů. Simulační výpočty byly vždy vedeny podle základních kroků aplikace CAE. Z možností poslední dosažitelné verze programu QuikCAST bylo možné definovat hodnoty součinitele prostupu tepla společně s hodnotami času, teplot a tepelného přechodového odporu.

Z následujícího souhrnu výsledků simulačních výpočtů pro časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a kokile vyplývá, že průběhy v ose odlitku se v konečném důsledku shodují s naměřenými experimenty. Rozdíly v průbězích jednotlivých křivek pro kokilu jsou uvedeny jako nepatrné detaily a souvisí se stavbou programu QuikCAST.

Poslední část kapitoly představuje pro odzkoušení a použití metodiky simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitku tělesa volantu ze slitiny hořčíku.

Druhou významnou částí disertační práce je šestá kapitola, která je zaměřena na tvorbu výpočtového simulačního modelu struktury grafitické litiny. Tato kapitola je nazvaná *Simulační výpočty predikce chování grafitických litin*. Současně byly provedeny simulační výpočty predikce chování litiny s lupínkovým grafitem při zatěžování vnější silou. Výpočtový model je založen na numerické metodě konečných prvků. Vychází z mikrostruktury litiny s lupínkovým a červíkovitým grafitem. Pro možnost zahrnutí vlivu velikosti a rozložení grafitu byly použity tři typy mikrostruktury litiny. Dva s různou velikostí rozložení grafitu ve formě lupínků a jeden ve formě červíků ve struktuře litiny.

V první podkapitole se autor zaměřuje na tvorbu modelu a jeho nastavení pro simulační výpočty. Stanoví materiálové vlastnosti, popis okrajových podmínek pro model mikrostruktury litiny, vazby mezi grafitem a maticí, volí zatížení modelu.

V následující části byla provedena vizualizace nasimulovaných výsledků. Závěrečná část byla zaměřena na zhodnocení výsledků. Jako nejvíce vyhovující byla určena podle typu interakce simulace „vázaný kontakt“.

Sedmá kapitola se věnuje v první části poměrně rozsáhlé diskuzi poznatků a dosažených výsledků, které byly získány z provedených experimentů a široké řady simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků při zkoumání tepelných jevů a jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin. Druhá část diskuse výsledků je zaměřena na výsledky a poznatky, které byly získány pomocí výpočtového simulačního modelu struktury grafitické litiny a mají vést k ujasnění chování vazeb mezi grafitem a maticí. Bylo prokázáno, že dosažené deformační charakteristiky se přibližují charakteristikám z reálného měření.

V závěru práce doktorand správně shrnul dosažené výsledky a jejich přínos a správně se soustředil na výsledky z experimentálních částí práce. Vysoce lze ocenit množství provedených experimentů, širokou řadu simulačních výpočtů a dále i vyvozené závěry.

### Formální nedostatky

Předložená práce je přes svoji obsahovou hodnotu zatížena několika formálními nedostatky

- Seznam použité literatury není zcela zaznamenán do textu práce. Ztěžuje ověření uváděných vztahů. Zvláště nevhodné je to v teoretické části. Nejsou zaznamenány odkazy na literaturu, například celá řada [1-25]. Také uvedené odkazy na použitou literaturu nejsou značeny v pořadí uvedeném na str. 142. Ve vlastním seznamu použité literatury na str. 142 není u některých odkazů datum vydání publikace
- Publikace doktoranda [4] uvedená na str. 10 práce není uvedena v označeném časopise
- Chybí značení jednotek uvedených veličin anebo není čitelné, například obr. 1.7 a obr. 2.0
- Pořadí číslování některých obrázků není zcela srozumitelné a ztěžuje orientaci, například na str. 61, 63, 65 a obr. příloha č. 2
- O osnově práce nejsou doplněny v textu označené podkapitoly 5.4.5.1-5.4.5.6
- Některé obrázky mají obtížně čitelné teplotní stupnice, například na str. 81, 85 a str. 108

**Připomínky a dotazy**

- Na str. 9 jsou v závěru kap. cíle DP, uvedeny možné přínosy DP. V závěru práce nejsou zcela zřetelně uvedeny ty, které přinášejí přínos pro praxi. Které z předpokládaných přínosů a do jaké míry byly splněny?
- Jaký je možné odvodit praktický závěr z výsledků bohaté přílohy č. 2?
- Jaké je současné využití simulačního programu QuikCAST v rámci katedry strojírenské technologie a jaký bude další postup při vývoji a využití tohoto programu?

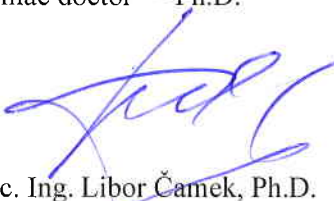
**Závěrečné hodnocení**

Doktorandská disertační práce Ing. Josefa Horáčka zpracovaná na téma „Numerické simulační výpočty ve slévárenských procesech a materiálech“ je z hlediska tématu aktuální a splňuje kritéria této práce. Přináší nové poznatky do oblasti numerických simulačních výpočtů, které dále zpřesňují výsledky, které umožní kvalitnější využívání simulačních programů sléváren.

Doktorand předvedl schopnost tvůrčího přístupu k řešení problému. Doktorand splnil cíle disertační práce. Doktorandská disertační práce svědčí o odpovídajících znalostech autora z oblasti strojírenské technologie, jeho schopnosti dobré orientace v odborné literatuře a schopnosti samostatně pracovat.

Doktorandská dizertační práce splňuje všechny podmínky kladené na tyto práce ve smyslu zákona o vysokých školách a lze ji proto doporučit k veřejné obhajobě. Po jejím úspěšném průběhu doporučit, aby byl Ing. Josefu Horáčkovi udělen akademický titul „philosophiae doctor“ – Ph.D.

V Ostravě dne 22. července 2016



doc. Ing. Libor Čamek, Ph.D.

**Oponentní posudek disertační práce**

<i>Téma:</i>	<b>NUMERICKÉ SIMULAČNÍ VÝPOČTY VE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESECH A MATERIÁLECH</b>
<i>Školící pracoviště:</i>	<b>TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, Fakulta strojní, katedra strojírenské technologie</b>
<i>Doktorand:</i>	<b>Ing. Josef Horáček</b>
<i>Školitel:</i>	<b>prof. Ing. Iva Nová, CSc.</b>
<i>Oponent:</i>	<b>doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc. Technická univerzita v Liberci Fakulta strojní, katedra materiálu</b>

Obecné hodnocení

Předložená disertační práce se zabývá aktuálním technickým námětem, o čemž m.j. svědčí i skutečnost, že dosažené výsledky byly využity již v průběhu řešení k simulaci tuhnutí hromadně pod tlakem odlévaného odlitku pro automobilový průmysl.

Rozsah práce je přiměřený. Tvoří ji 146 stran textu rozdělených do devíti kapitol a dále 34 stran příloh.

Úvod ve čtyřech stranách a dvou dílčích kapitolách „Cíle disertační práce“ a „Publikace doktoranda“ specifikuje námět práce a jeho řešení. Práce se zabývá dvěma poměrně odlišnými předměty simulací, jež by samostatně stály za témata prací. Souvisí to určitě se stáží doktoranda na univerzitě v švédském Linköpingu. Zde ho nadchla práce na simulaci napětíových poměrů v komplikovaných strukturách litin natolik, že ji přiřadil do své disertace. Uveden pro doktorandy běžný počet publikací (9, z toho 3 v angličtině – bez ohledu na jejich váhu).

Pak následuje na 54 stranách ve dvou kapitolách teoretická příprava řešené problematiky. Čtenář získá přehled o technice simulací, o tepelných dějích mezi odlitkem a formou, o krystalizaci a chování litin. Rešeršní činnost lze považovat za vyhovující. Cituje 57 literárních pramenů, z toho 34 zahraničních. Doktorand se měl věnovat důslednějšímu průběžnému přiřazování citací z použitého seznamu padesáti sedmi literárních pramenů. Některé odborné skutečnosti jsou převzaty bez patřičného citu (transformaci) k předmětu zadání.

Poměrně rozsáhlé a náročné experimenty byly provedeny na půdě TUL. Srozumitelně jsou uvedeny experimentální postupy a dosažené výsledky měření převážně formou grafů a tabulek přehledně v kap. 5 a 6 na více jak 60-ti stranách textu a v 33-ti přílohách. Ze souboru měření během provedených termických analýz doporučeny teplotní průběhy vlastností nezbytných pro věrné simulační výpočty.

Vyhodnocení experimentů v diskusi obvykle spočívalo v jejich průběžném popisu, připomínání obecných skutečností z rešerše a konstatování s omezenou výzkumnickou „kreativitou“. Funkci diskuse a závěru práce dizertant příliš nerozlišuje a nerozvíjí souvislosti, korelace. Byly potvrzeny souvislosti...Nezdůrazněno rozhraní stávajících poznatků a přínosu disertace. Za stěžejní poznatek práce považuji v 2. části dizertace (str.133) uvedený 2. bod odhalující skutečný vztah povrchů grafitu a matrice litin při namáhání.

Doktorand cituje jen v úvodu disertace jméno největšího slévárenského odborníka TUL prof. Ing. Jaroslava Exnera, CSc. Přitom necituje žádnou jeho práci, ačkoliv by jejich poznatky pomohly významně podpořit účinek výsledků disertace v oblasti hledání mezních stavů namáhání litin v simulacích. Výsledky nelineárních simulací průběhů namáhání struktur litin s lupínkovým a červíkovým grafitem nutno transformovat do pro techniky a konstruktéry potřebných modulů pružnosti, mezních stavů namáhání (fyzikální meze únavy a „kluzu“) po derivaci průběhů. Pak by měla práce pro zkušebnictví litin a slitin Al průlomový přínos.

#### Konkrétní poznámky a dotazy k práci.

V textu se vyskytují časté gramatické chyby. Zejména záměna „i“ a „y“ (str.76., 121, 133, 139...). Jazyk není odborně vyříbený. Četné formulace do odborných publikací nepatří. Nešikovné formulace vět...Přehled symbolů a zkratk bývá uveden v obsahu. K formálním náležitostem práce (odkazy, skladba...) nemám připomínek.

Obr.3.0., 3.1. ukazují zkoušku pevnosti v tahu litin s lupínkovým grafitem. Tvarem však odpovídají zkoušce na oceli.

Na str. 57 píše doktorand o smluvní mezi kluzu v podkapitole o litině s lupínkovým grafitem. Existuje postup, jak tuto mez získat? Jaký průběh zkoušky pevnosti v tahu má skutečná litina s lupínkovým grafitem.

Ze str. 103 – co to je „okamžik chladnutí odlitku“?

Poznatky ze str, 104 patří i do diskuse, závěru.

Vysvětlit fyzikální metalurgií tvrzení ze str. 130, že čistý Al díky absenci přídavných prvků tuhne kratší dobu, než je tomu u slitin Al.

Závěrem bych chtěl konstatovat, že předložená práce přispěla k prohloubení poznatků v oboru strojírenská metalurgie. Získané výsledky jsou využívány v technické praxi. Práce i přes citované nedostatky splňuje požadavky pro udělení vědecké hodnosti Ph.D. podle § 47 zákona č. 111/1998 sb. Proto navrhuji, aby Ing. Josefu Horáčkovi byla udělena vědecká hodnost po úspěšné obhajobě disertační práce.

V Liberci 2016-07-21



Doc.Ing. Břetislav Skrbek, CSc.