

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedra fyziky

**Diplomová práce**

**Analýza tepelných procesů při laserovém  
svařování plastů**

Vedoucí práce:  
Ing. Jiří Martan, Ph.D.

Vypracovala:  
Bc. Martina Benešová

Plzeň, 2018

## Prohlášení

Předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Jiřího Martana, Ph.D. a odborným dohledem Ing. Zdeňka Veselého, Ph.D. a že jsem uvedla všechny použité prameny a literaturu, ze kterých jsem čerpala.

V Plzni dne 25. 5. 2018

.....

podpis

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Jiřímu Martanovi, Ph.D. za vstřícné vedení a cenné rady při vypracovávání této práce. Rovněž bych chtěla poděkovat konzultantovi Ing. Zděňkovi Veselému, Ph.D. za další cenné rady a připomínky. Děkuji svým rodičům za veškerou podporu a zázemí a v neposlední řadě i svému příteli Radimovi a kamarádům, kteří mě během celého studia podporovali.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá zkoumáním tepelných procesů při laserovém svařování plastů. V práci je shrnuta teorie laserového svařování plastů a současný stav v modelování této problematiky. Je popsána tvorba simulačního modelu laserového svařování plastů v programu COSMOSM, ze kterého jsou získány rozložení teploty a časové průběhy teploty na povrchu a rozhraní vzorku. Část práce je věnována popisu výpočtů intenzity tepelného vyzařování ze vzorku v programu Matlab. Byl vytvořen výchozí model rozložení teploty ve vzorku pro dvě tloušťky horního polopropustného plastu ve svařované konfiguraci. Dále je prozkoumán vliv materiálových a procesních parametrů na časový průběh teploty na povrchu a rozhraní vzorku. V druhé části diplomové práce je porovnávána intenzita vyzařování v závislosti na čase z rozhraní a povrchu s měřením pomocí kamery FLIR SC7650 a kamery C14041-10U s citlivostí v krátkovlnné infračervené oblasti. Při měření kamerou FLIR SC7650 byly používány různé optické filtry, které jsou uvažovány i ve výpočtech v Matlabu. Při porovnávání intenzity vyzařování byly použity dva druhy propustnosti horního plastu, difuzní a přímá.

**Klíčová slova:** laserové svařování plastů, program COSMOSM, program Matlab, teplotní analýza, výpočet intenzity vyzařování

## Abstract

This thesis studies thermal processes during laser welding of plastics. It summarizes theories about the problematics and current status of its modelling. Further, creation of the simulation model of laser welding of plastics through the COSMOSM software is described. From the model, temperature distribution dependencies and temperature time dependence on the sample's surface and interface are obtained. Part of the thesis is dedicated to the description of the thermal radiation intensity calculations from a sample in Matlab software. The underlying model of the temperature distribution in sample for two thicknesses of upper semitransparent polymer in welded configuration was created. Further, the effect of material and process parameters to the temperature time dependence on the surface and the interface of the sample is explored. The second part of the thesis compares the radiation intensity in dependence on the time from the interface and the surface with FLIR SC7650 and C14041-10U camera measurement with sensitivity in short wavelength infrared. During the measurements with the FLIR SC7650 camera were used various optical filters which are also used in the Matlab calculations. Two types of semitransparent polymer transmissivity are used during the comparison of radiation intensity, hemispherical and normal.

**Key words:** laser welding of plastics, software COSMOSM, software Matlab, temperature analysis, radiation intensity calculations

# Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2. Současný stav problematiky</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Laser</b>	<b>7</b>
2.1.1. Princip laseru	7
2.1.2. Vlastnosti laserového záření	8
2.1.3. Typy laserů	8
2.1.4. Využití laserů	10
<b>2.2. Laserové svařování plastů</b>	<b>11</b>
2.2.1. Materiálové vlastnosti plastů	12
2.2.1.1. Typy plastů	12
2.2.1.2. Tepelné vlastnosti	14
2.2.1.3. Optické vlastnosti	16
2.2.2. Laserové zdroje pro svařování plastů	17
2.2.3. Proces laserového svařování plastů	19
2.2.3.1. Typy procesů TTLW	20
2.2.4. Měření procesů při laserovém svařování plastů	21
2.2.4.1. Řízení a kontrola před procesem	22
2.2.4.2. Řízení a kontrola při procesu	23
<b>2.3. Modelování laserového svařování plastů</b>	<b>25</b>
2.3.1. Analytické modely	25
2.3.2. Jednorozměrné modely (1D)	26
2.3.3. Dvourozměrné modely (2D)	27
2.3.4. Trojrozměrné modely (3D)	28
2.3.5. Shrnutí současného stavu modelování laserového svařování plastů	30
<b>3. Cíle diplomové práce</b>	<b>32</b>
<b>4. Metody zpracování</b>	<b>33</b>
<b>4.1. Experimenty</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Modelování v programu COSMOSM</b>	<b>35</b>
4.2.1. Software COSMOSM	35
4.2.2. Tvorba modelu a volba parametrů	35
<b>4.3. Výpočty v programu MATLAB</b>	<b>38</b>
4.3.1. Software MATLAB	38
4.3.2. Tvorba výpočtů a volba parametrů	39
<b>5. Výsledky a diskuze</b>	<b>42</b>
<b>5.1. Časové a prostorové průběhy teploty</b>	<b>42</b>
5.1.1. Výchozí model	42
5.1.2. Vliv propustnosti horního plastu na časový průběh teploty	50
5.1.3. Vliv tepelné vodivosti na časový průběh teploty	52
5.1.4. Vliv fázové přeměny a tepelné kapacity na časový průběh teploty	54
5.1.5. Vliv přestupu tepla na časový průběh teploty	58

5.1.6.	Vliv parametrů procesu laserového svařování.....	60
<b>5.2.</b>	<b>Intenzita vyzařování z povrchu a rozhraní.....</b>	<b>69</b>
5.2.1.	Porovnání výpočtů s výsledky z kamery FLIR SC7650 .....	69
5.2.2.	Porovnání výpočtů s výsledky z kamery Hamamatsu C14041-10U .....	80
<b>6.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>86</b>
	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>89</b>
	<b>Publikace autora.....</b>	<b>91</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>92</b>
	Příloha A – Skriptový soubor výchozího modelu v programu COSMOSM.....	92
	Příloha B – Grafy veličin potřebných pro výpočet vyzařování v Matlabu.....	95
	Příloha C – Časové průběhy, rozložení teploty a profily teploty pro variantu s tloušťkou horního plastu 1 mm .....	98

# 1. Úvod

Laser, jehož první zmínky se datují do roku 1958, slouží k zesílení světla s využitím stimulované emise záření. Jde o optický zdroj elektromagnetického záření. Světlo z laseru vychází ve formě úzkého svazku a mezi jeho důležité vlastnosti patří směrovost, monochromaticnost a vysoký stupeň koherence. Existuje celá řada různých typů laserů, například lasery pevnolátkové, plynové, polovodičové, barvivé či excimerové. Laser lze využít v mnoha různých odvětvích, zejména v průmyslu, medicíně, vojenství, spotřební elektronice, ve výzkumu či kosmetice.

Laserové svařování plastů je další oblastí, kde lze laser využít. V počátcích 90. let 20. století se začalo uvažovat o možnosti svařování plastových částí pomocí laseru. Jednou z prvních průmyslových aplikací využití laseru při svařování plastů byla výroba elektrického klíče pro automobil Mercedes Benz 190 v roce 1997. Mezi výhody této metody patří lokalizovaný přístup tepla na rozhraní svaru bez poškození vnitřních částí, velmi úzký svařovací paprsek, vysoká kvalita a mechanická pevnost svarů, zachování geometrie dílů a vizuálního vzhledu. Pomocí laserového svařování plastů je možné vyrábět originální výrobky s různou geometrií, stejně tak ho lze využít v masové produkci. Během svařování plastů je nezbytné znát tepelné a optické vlastnosti použitých polymerů. Dále musíme vědět vlastnosti použitého laseru, zejména vlnovou délku, rozložení intenzity a šíření paprsku.

V průmyslu se dnes používá hlavně transmisní laserové svařování (TTLW), jehož základním principem je vytvoření svaru na rozhraní dvou součástí, z nichž horní plast propouští laserové záření a spodní ho absorbuje, tím se taví a vzniká svar. Během procesu svařování je možné sledovat kvalitu výrobku a provádět online kontrolu svařovacího procesu. Tím se zabrání ekonomickým ztrátám. Jednou z možností kontroly tvorby svarů je sledování rozložení teploty termovizní kamerou. Další možností, která nám umožňuje více porozumět a kontrolovat proces svařování, je jeho modelování, při kterém musíme uvažovat různé technické parametry. Již více prací se zabývalo modelováním fyzikálních procesů, například vedením tepla. Během modelování je nutné přistoupit k určitému zjednodušení reálného problému, aby bylo možné proces simulovat. Mezi zjednodušení patří například zanedbání šíření tepla prouděním či radiací na hranicích, zanedbání závislosti materiálových vlastností na teplotě či modelování 1D a 2D modelů.

Cílem této práce je vytvořit numerický model kvazisisimultánního transmisního laserového svařování, pomocí kterého bude možné určit vliv parametrů procesu na teplotní pole v materiálu. V programu COSMOSM bude vytvořen model, který poskytne rozložení teploty a časové průběhy teploty v T spoji z materiálu POM. V druhé části práce budou využity časové průběhy teploty pro výpočet infračerveného vyzařování z rozhraní a povrchu vzorku při svařování. K tomuto výpočtu bude použit program Matlab. Výsledky vyzařování budou porovnány s měřeními termovizními kamerami FLIR SC7650 a C14041-10U. Cílem výpočtu a porovnání je lepší pochopení tepelného vyzařování a vysvětlení měřených signálů z procesu.

## 2. Současný stav problematiky

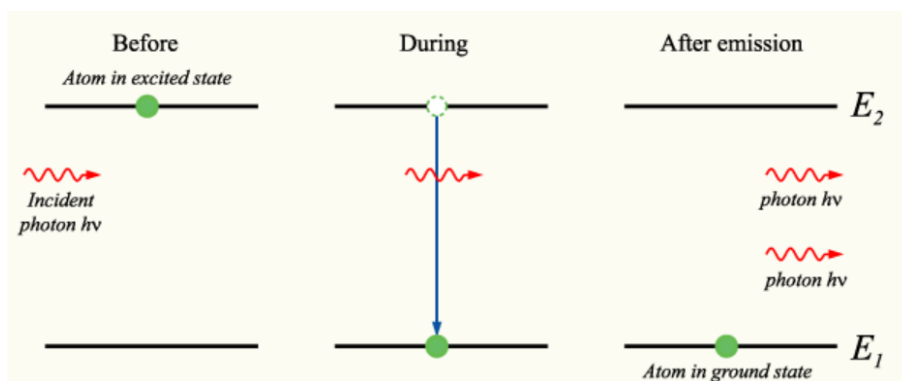
### 2.1. Laser

Princip laseru poprvé popsal v roce 1917 Albert Einstein, ale první zmínky o samotném laseru pocházejí z roku 1958. Laserový princip byl experimentálně ověřen v roce 1960 doktorem T. H. Maimanem. V roce 1963 C. K. N. Patel vynalezl plynový CO<sub>2</sub> laser. O rok později byla za výzkumy v oblasti kvantové elektroniky udělena Nobelova cena za fyziku N. G. Basovovi, A. M. Prochorovovi a C. H. Townesovi. Tyto výzkumy vedly k vytvoření maserů a laserů, tj. generátorů a zesilovačů nového typu.

Název laser vznikl z počátečních písmen názvu Light Amplification by means of Stimulated Emission of Radiation (česky zesílení světla s využitím stimulované emise záření). Laser vychází z maseru, který zesiluje mikrovlny stimulovanou emisí záření. Laser na podobném principu zesiluje záření z optické spektrální části. Nejprve se zdálo, že tato metoda bude mít jen laboratorní využití, ale později byla použita k objasnění některých velmi intenzivních a úzkých spektrálních čar vyzařovaných z mezihvězdných oblaků. V roce 1980 byl efekt zesilování a generace záření o vlnové délce 10 μm objeven v atmosféře Marsu. V laboratorních podmínkách byla získána generace stimulovaného záření v širokém spektrálním oboru na nejrůznějších materiálech [1, 2].

#### 2.1.1. Princip laseru

K pochopení principu laseru je nejprve nutné objasnit pojem „stimulovaná emise záření“. Představme si atom, který byl při předchozí absorpci vybuzen na vyšší hladinu, kde setrvává. Na tento atom dopadne foton, jehož velikost energie odpovídá energetickému rozdílu mezi „původní“ a „vzbuzenou“ hladinou atomu. Foton stimuluje vzbuzený atom k návratu na původní hladinu a k vyzáření fotonu, který má stejné vlastnosti jako foton dopadající. Na výstupu tedy máme dva stejné fotony. Celý proces je znázorněn na Obr. 2.1 a můžeme ho považovat za proces zesílení dopadajícího záření [1].



Obr. 2.1: Stimulované emise záření. Převzato z [3].

Samotný laser se skládá z aktivního prostředí, rezonátoru a zdroje energie. Zdroj energie, což může být například výbojka, dodává energii do aktivního prostředí, čímž dojde k excitaci,



tj. vybudí se elektrony aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší hladiny. Tím se většina elektronů dostane do vyšších hladin a vzniká inverze populace. Nyní může dojít ke stimulované emisi záření popsané výše. Aktivní část laseru je umístěna v rezonátoru, který může být složen například ze zrcadel. Díky tomu dochází k odrazu paprsku fotonů a ten opět projde prostředím. Tím se podporuje stimulované emise a dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Dostaneme výsledný svazek fotonů, který vychází z rezonátoru skrz výstupní polopropustné zrcadlo [1,2].

### 2.1.2. Vlastnosti laserového záření

Pokud zvolíme jako zdroj energie výbojku, máme v případě laseru výhodu velmi malého šumu. U laserů dochází ke generaci fotonů jen na tom přechodu, kde je realizovaná inverzní populace, což spolu s optickou kladnou zpětnou vazbou způsobuje zvýšení počtu stimulované emitovaných fotonů, takže spontánně vyzařující fotony způsobují jen zbytkový šum.

Důležitou vlastností laserového záření je jeho směrovost, která je způsobena Fabryovým-Perotovým rezonátorem. Krátkovlnné záření má menší rozbíhavost než dlouhovlnné a delší rezonátor vykazuje menší rozbíhavost než krátký rezonátor. Laserové záření se na rozdíl od klasických zdrojů jeví jako složené z drobných svítivých bodů, což je způsobeno jeho monochromaticností a vysokým stupněm koherence. Fázová shoda vyzařovaných fotonů způsobuje to, že snadno dojde k interferenci a zrnění je způsobeno interferencí záření rozptylovaného stínítkem na sítnici oka.

Kvalitu záření můžeme hodnotit pomocí koherenční délky  $l$ , což je dráhový rozdíl, při kterém je ještě vidět interference, a koherenční doby  $\tau$ . Záření se šíří rychlostí světla  $c$ , potom příslušný zdroj vysílá koherentní záření po koherenční dobu [2]:

$$\tau = \frac{l}{c}. \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Typy laserů

Laserů existuje celá řada, protože stimulované emise lze dosáhnout v různém aktivním prostředí, které má různé skupenství. Z velkého výběru se používá ale jen několik laserů, které jsou jednoduché, nebo můžeme jejich záření jednoduše detekovat. Používají se také lasery, které způsobují neobvyklé hodnoty parametrů, například vysoké výkony v impulzu. Dále budou uvedeny jednotlivé typy laserů podle skupenství jejich aktivního prostředí.

První skupinou jsou lasery pevnolátkové, jejichž aktivní prostředí tvoří pevné krystalické nebo amorfni látky dopované příměsí vhodných iontů. Pevná látka je jen nosná kostra aktivního prostředí. K optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí, jejichž koncentrace bývá maximálně 1 %. Pokud jako aktivní prostředí slouží krystal, musí být přesně orientován podle optických os, protože krystaly jsou anizotropní, takže jejich vlastnosti jsou směrově závislé. Za příměsí krystalických aktivních prostředí se nejčastěji berou ionty ze skupiny prvků vzácných zemin či prvky ze skupiny 6B periodické tabulky prvků.

Jako nosné prostředí pro ionty se většinou volí skla, oxid hlinitý, fluorid vápenatý nebo wolframan vápenatý. Aktivní prostředí z těchto materiálů má většinou tvar válečku. Tím se přizpůsobuje tvaru optického rezonátoru. Pro tento typ laserů se většinou používá optické buzení, kdy se využívá vnější světelný zdroj ke změnám v obsazení energetických hladin. Potřebujeme dosáhnout co největšího využití energie, která vyzařuje z výbojky všemi směry. K tomu se nejprve používaly spirálně stočené výbojky s krystaly umístěnými v jejich osách. Později se používaly různé odrážače, například eliptický odrazný válec. Existují různé varianty generace impulzů laserů, například synchronizace módů či režim Q-modulace rezonátoru. Účinnost pevnolátkových laserů nebyla příliš velká, ale s objevem diskových a vláknových laserů dosahuje účinnost až 30%. Oba lasery vycházejí ze staršího Nd:YAG laseru, jehož aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu dopovaného ionty neodymu nebo yterbia. U diskových laserů je aktivní prostředí tenký disk, u vláknových dlouhé optické vlákno. Výhodou diskových laserů je rovný teplotní profil po celém disku, který umožňuje dosáhnout velkých výkonů s dobrou kvalitou výstupní svazku. Používají se hlavně pro svařování a řezání kovů. Vláknový laser je technologicky nejmodernější z této skupiny laserů. Aktivním prostředím je dlouhé optické vlákno dopované yterbiem. Jejich výhodou je jednoduchost, robustnost, vysoká účinnost (30 – 35 %), životnost, nízké provozní náklady a malé nároky na údržbu. Mezi další pevnolátkové lasery patří například rubínový laser nebo laser Nd:sklo.

Druhou skupinou laserů jsou lasery plynové. Jejich aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo směsí plynu. Plynný stav lze popsat jako soubor částic s kvantovými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí. Částice se zde neustále pohybují, což se projeví na povaze emisních a absorpčních čar. Šířku čáry určují hlavně vnitřní síly v částici. Tato šířka se pak označuje jako lorentzovská, protože představuje přirozenou šířku čáry a její tvar je popsán Lorentzovou funkcí. Šířka spektrální čáry v plynu ale převyšuje o několik řádů šířku přirozenou, což souvisí s translačním pohybem částic v plynu. Pohybující se částice mění emisní frekvence v důsledku Dopplerova jevu. Spektrální čára je rozšířena o frekvence, které odpovídají rychlostem částic, které se chaoticky pohybují v prostoru. Dopplerovo rozšíření spektrálních čar se projevuje hlavně u spekter zředěných plynů. V hustých plynech se uplatňuje hlavně vliv vzájemného působení částic při srážkách. Rozšíření tohoto typu se nazývá srážkové a je různé pro různé přechody. Buzení plynových laserů můžeme provádět různými způsoby, například doutnavým výbojem, elektronovým svazkem či adiabatickou expanzí. Buzení lze také provádět opticky, stejně jako u pevnolátkových laserů, ale účinnost tohoto typu buzení je malá. Mezi plynové lasery patří He-Ne laser, argonový iontový laser, He-Cd laser, CO<sub>2</sub>-laser nebo dusíkový laser.

Lasery mohou být také polovodičové. Polovodiče mají výhodu v miniaturizaci a nižší energetické náročnosti oproti předchozím typům. Hodnota zesílení vztažená na jednotku objemu aktivního prostředí je u polovodičových laserů až o tři řády větší než u jiných typů. Díky tomu stačí pro generaci koherentního záření použít rezonátor o velikosti desetin milimetru. V mnoha polovodičových laserech se využívá možnost plynulého přeladění frekvence záření v široké spektrální oblasti. Excitace a generace záření u těchto laserů souvisí

s pásovou strukturou jejich energetických hladin. Aktivní prostředí se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. Buzení se většinou provádí průchodem proudu přes přechod PN polovodiče, ale může se použít i optické buzení či buzení elektronovým svazkem. Účinnost polovodičových laserů je až 70 % a dá se zvětšit pomocí heterostruktury aktivního prostředí, v níž jsou kraje krystalu tvořeny materiálem s větším energetickým rozdílem mezi valenčním a vodivostním pásem a s menším indexem lomu. Polovodičové lasery se dají přeladovat a tím se docílí emise monochromatického záření s proměnnou vlnovou délkou. Mezi základní typy polovodičů používaných v laserech patří GaAs, InAs, InSb nebo PbS.

Existuje mnoho dalších typu laserů. Můžeme zmínit například barvivové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří roztoky organických barviv. Jejich význam spočívá hlavně v excitaci mimořádně velkého pásma přeladitelnosti. Jejich nevýhodou je omezená stálost molekul organických barviv při ozařování velmi intenzivními zdroji. Další kategorií jsou chemické lasery, ve kterých k buzení aktivního prostředí přispívá energie uložená v chemické vazbě. Výhodou těchto laserů je vysoká účinnost a specifický mechanismus buzení. Příkladem chemického laseru je HF-laser. Existují také excimerové lasery, při jejichž buzení a generaci dochází k tvorbě a rozpadu chemických vazeb. Uvedme poslední skupinu laserů, tou jsou lasery s volnými elektrony. Ty mají aktivní prostředí tvořené modulovanými svazky elektronů [2].

#### **2.1.4. Využití laserů**

Lasery mají velmi široké využití v mnoha odvětvích. Uplatňují se zejména v průmyslu, medicíně, vojenství, spotřební elektronice, pro datové přenosy prostřednictvím optických vláken, ve výzkumu či kosmetice. Při používání laserů musíme brát v potaz bezpečnostní rizika, protože laserový paprsek může trvale poškodit zrak. Lasery se dělí do několika bezpečnostních tříd, které udávají potřebnou míru ochrany očí. Dále bude uvedeno několik aplikací laserů.

Velmi významné je využití laserů v medicíně, kde se setkáváme s interakcí živé hmoty a koherentního, často intenzivního záření. Lékařské použití laserů lze rozdělit na diagnostické a terapeutické. Poprvé se laser použil v očním lékařství, kde se k diagnostickým účelům využívá kontinuální He-Ne laser s velmi malým výkonem. Laserem je možné zjišťovat kvalitu optické soustavy oka. Využívají se také pro kriminalistické účely, kde se určuje doba úmrtí podle stupně zákalu rohovky z rozptylu laserového záření způsobeného zákalem. V oční chirurgii se argonový laser používá k přichycování odchlípené sítnice. Pomocí laserů se také odstraňují malé nádory na sítnici, používají se při operaci zeleného zákalu nebo při odstraňování očních vad. Nejčastěji se v lékařství používá optický skalpel, kde se využívá velká energie nesená laserovým svazkem k odpařování tkáně. Pro tuto aplikaci se nejčastěji používá CO<sub>2</sub>-laser. Další oblastí v medicíně, kde mají lasery uplatnění, je ve stomatologii. Zde se používá k „odpařování“ zubního kazu, v akupunktuře nebo při odstraňování nádorů.

Druhou skupinou využití laserů je záznam informací. V polygrafickém průmyslu se využívají v termotisku, kdy rozmítaný svazek výkonného laseru s modulovanou intenzitou záření zaznamená při dopadu na termocitlivý materiál požadovaný grafický záznam. Výhodou

je vysoká rychlost. Lasery se využívají v laserových tiskárnách, kde pracují na principu přenosu částeček barviva na ionizovaná místa. Lasery byly také použity ke zhotovení diapozitivů z obrazových předloh. Laserový svazek s malým výkonem vypaluje v daných místech otvory podle světlosti předlohy. Čtecí stroje pro dešifrování čárového kódu také využívají laser. Zde se využívá rozdílu v absorpci nebo rozptylu záření na označených a neoznačených plochách. Lasery se užívají v televizním promítacím zařízení, nebo v datových přenosech prostřednictvím optických vláken.

Dalším odvětvím, kde se uplatňují lasery, je vojenství. Lasery se používají ke střežení objektů, kdy svazek kontinuálního laseru prochází skrz soustavu zrcadel kolem střeženého objektu a je registrován detektorem. Při průchodu osoby touto zónou se registruje přerušování svazku a zapne se poplašné zařízení. Pokud se použije laser emitující infračervené záření, pak není stopa svazku vidět. Pro zpřesnění střelby se používají laserové dálkoměry, které se využívají hlavně u tanků. Jiné zpřesnění palby umožňuje používání laserem naváděné munice, tzv. samonaváděcí střely. Další aplikace laserů nalezneme při sledování létajících cílů, pro spojení s ponorkami nebo v optickém gyroskopu [2].

V jaderné fyzice se používá například laserový urychlovač částic, kde prostředím procházejí dva laserové svazky s různou frekvencí, vzniknou jejich zázněje, které formují plazmovou vlnu šířící se menší rychlostí, než je rychlost světla. Elektrické pole uvnitř plazmové vlny urychluje částice vstříknuté do plazmatu vnějšího zdroje, jímž může být jiný urychlovač na menší energii. Lasery se využívají v termojaderných reakcích k jejich řízení či při separaci izotopů, tj. atomů se stejným atomovým číslem, ale různým nukleonovým číslem [1].

Toto byl pouze stručný výčet několika využití laserů. Ještě nebylo zmíněno použití laserů v oblasti, o které pojednává tato práce. Laser se dá využít ke svařování a o laserovém svařování plastů bude pojednávat následující kapitola.

## **2.2. Laserové svařování plastů**

Začátky laserového svařování plastů sahají do počátku 90. let 20. století, kdy se uvažovalo o možnosti svařování plastových částí pomocí laseru. V té době se daly pro svařování plastů použít jen CO<sub>2</sub>-lasery a Nd:YAG lasery, ale kvůli vysokým nákladům nebyly uplatnitelné v průmyslu. Průlom tohoto typu svařování nastal s objevem transmisního laserového svařování (TTLW) a vysoce výkonových diodových laserů. Možnost masové produkce a velká efektivita těchto laserů, snižující se náklady a nový TTLW proces způsobily uvedení této metody na trh. Jednou z prvních průmyslových aplikací svařování plastů pomocí laseru byla výroba elektrického klíče pro automobil Mercedes Benz 190 v roce 1997. Poté se tato metoda velmi rychle rozšířila jako alternativa k běžným spojovacím technologiím, kterými jsou například tepelný kontakt nebo ultrazvukové a vibrační metody.

Mezi výhody laserového svařování plastů patří lokalizovaný přístup tepla na rozhraní svaru bez poškození citlivých vnitřních částí, například elektroniky, velmi úzký svařovací paprsek a zachování geometrie dílů a vizuálního vzhledu. Další výhodou je vysoká kvalita a

mechanická pevnost svarů. Tato metoda umožňuje flexibilní výrobu originálních výrobků s různou geometrií, stejně tak ji lze využít pro masovou produkci s velkými objemy produktů. I přesto, že se tato metoda jeví jako nákladná, je ekonomicky a logisticky výhodnější než jiné svařovací techniky. Oproti jiným metodám se vyznačuje vysokou kvalitou svarů a je možno produkovat větší množství výrobků. Díky dobře vyvinuté kontrole kvality a kontrole procesu během samotného svařování vzniká velmi malé množství zmetků [4].

### **2.2.1. Materiálové vlastnosti plastů**

Plasty (nebo polymery) jsou složeny z makromolekulárních řetězců, které se skládají z monomerních jednotek pomocí chemických reakcí. Typické reakce pro vytvoření řetězců jsou polyadice a kondenzační polymerace. Monomerní jednotky jsou molekuly na bázi organického uhlíku. Kromě uhlíku a vodíku mohou být v monomerní jednotce přítomny také kyslík, dusík, síra, fluor nebo chlór. Druhy prvků, jejich poměr v látce a umístění v monomerní jednotce vytváří možnost vyrobit různé druhy plastů.

Fyzikální vlastnosti plastů jsou většinou dány jako průměrné hodnoty díky statistickému utváření makromolekulární struktury. Na rozdíl od kovů, dochází v určitých teplotních rozsazích ke změnám fází plastů. Šířka těchto teplotních rozsahů závisí na homogenitě struktury materiálu. Fyzikální a chemická struktura makromolekul je dána primární vazební silou mezi atomy. Sekundární vazební síly, například interakce dipól-dipól, vazba vodíkovým můstkem nebo Van der Waalovy síly, mají přímý vliv na makroskopické vlastnosti plastů, jako jsou tepelné, mechanické, optické, elektrické nebo chemické vlastnosti [4].

#### **2.2.1.1. Typy plastů**

Podle chemické struktury a stupně síťování molekul, tj. když jsou řetězce makromolekul vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť, mohou být plasty rozděleny na termoplasty, elastomery a termosety. Poslední kategorií plastů jsou sloučeniny složeny z několika základních materiálů, mezi které patří polymerní směsi, kopolymery a kompozity. Tyto sloučeniny mohou být vytvořeny na fyzikální bázi (polymerní směsi a kompozity) nebo na chemické bázi (kopolymery).

Termoplasty se skládají z makromolekulárních řetězců bez křížových vazeb mezi řetězci. Řetězce jsou u sebe drženy pouze mezimolekulárními interakcemi. Termoplasty jsou chemicky odolné a vykazují rezistenci proti vlivům prostředí, například proti UV záření. Tento typ plastů může být zcela opticky průhledný i neprůhledný v závislosti na typu a struktuře materiálu. Uvnitř neprůhledných materiálů je světlo rozptýleno molekulární strukturou a propustnost světla je velmi nízká. Snižuje se se zvyšující se tloušťkou plastu. Termoplasty lze opakovaně tavit a nechat tuhnout bez významných změn mechanických a optických vlastností. V průmyslu se používají k vytlačování fólií, plechů, profilů a k tvarování dílů. Termoplasty se dělí na amorfní a polykrystalické. Amorfní termoplasty bývají opticky průhledné a většinou křehké. Patří mezi ně například polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA), polystyren (PS) nebo

polyvinylchlorid (PVC). Polykrystalické termoplasty jsou obvykle neprůhledné a tuhé. Můžeme sem zařadit polyamid (PA), polypropylen (PP) nebo polyoxymetylen (POM).

Druhou skupinou plastů jsou elastomery. Používají se místo termoplastů a vulkanizovaných kaučuků. Lze je jednodušeji zpracovávat a recyklovat. Jsou to plasty s velkým zesíťováním mezi molekulami. Obvykle se nemůžou roztavit bez degradace struktury molekul. Mají měkké i tvrdé domény a různé teploty zesíťování. Nad teplotou skelného přechodu  $T_g$  jsou měkké a pružné a pod teplotou  $T_g$  jsou tvrdé a křehké. Hodnota teploty skelného přechodu se zvyšuje se zvyšujícím se počtem zesíťování. Elastomery se vyznačují vysokou houževnatostí, citlivostí na vlhkost a rozdíly teplot při zpracování. Příkladem elastomerů jsou polybutadieny (BR), styren-butadienové kaučuky (SBR) nebo polyuretany (PUR).

Dalším druhem plastů jsou termosety, jež jsou opakem termoplastů, protože po tepelném vytvrzení je nelze novým ohřátím uvést znovu do tvárného stavu. Termosety jsou tvrdé a křehké. Jejich mechanická pevnost a pružnost nejsou závislé na teplotě, jako u termoplastů nebo elastomerů. Termosety nemohou být taveny a spojovány tepelnými procesy, jako je ultrazvukové nebo laserové svařování. Řadí se mezi ně epoxidové pryskyřice (EP), fenolytické pryskyřice (PF) nebo polyesterové pryskyřice (UP).

Nyní se přesuneme k polymerním sloučeninám, kam patří polymerní směsi, kopolymery a termoplastické elastomery (TPE). Polymerní sloučeniny jsou fyzikálně a chemicky složené z různých polymerů za účelem dosažení speciálních vlastností materiálu, například pružnosti nebo únavové pevnosti. Polymerní směsi jsou kombinací různých plastů, které se míchají v roztaveném stavu. Jejich chemické, tepelné a mechanické vlastnosti závisí na typech polymerů a jejich poměru ve směsi. Polymerní směsi mohou být spojovány tepelnými procesy, jako je ultrazvukové nebo laserové svařování. Řadí se sem PC/ABS, PC/ASA nebo PPE/SB. Kopolymery jsou vyráběny chemickým složením alespoň dvou různých monomerních jednotek. Podle řazení monomerů se dělí na střídaté, statistické, blokové a roubované. Příkladem kopolymerů jsou akrylonitrilbutadienstyren (ABS) nebo styren-butadien-styren (SBR). Termoplastické elastomery jsou pružné, flexibilní polymery s podobnými vlastnostmi jako elastomery nebo kaučuk, ale jsou termoplastické povahy. Díky tomu mohou být zpracovány vytlačováním nebo litím a mohou být spojovány navzájem nebo s jinými termoplastickými materiály. Existuje několik druhů termoplastických elastomerů s různou tvrdostí. Lze je připravit kopolymerací, například TPE-E nebo TPE-U, nebo mísením základního polymeru (např. PP nebo PE) s elastomerní složkou (např. EPDM). Tyto TPE se pak označují jako polyolefinové termoplastické elastomery (TPE-O).

Poslední skupinou plastových materiálů jsou polymerní kompozity, jež jsou tvořeny polymerním matricovým materiálem (termoplastem nebo termosetem) a organickým nebo anorganickým plnivem (například minerálními pigmenty, krátkými nebo dlouhými vlákny nebo papírem). Pro zvýšení tvrdosti matricového materiálu se používají minerální prášky, dřevo nebo saze. Ke zvýšení únavové pevnosti se používají různě dlouhá vlákna ze skla, uhlíku nebo

aramidu. Mechanické vlastnosti kompozitů závisí na orientaci vláken. Kompozity s termoplastickou maticí mohou být na rozdíl od kompozitů s termosetovou maticí upravovány tepelnými procesy [4].

### 2.2.1.2. Tepelné vlastnosti

Při tepelném zpracování termoplastů pomocí laserového záření je nezbytné znát tepelné vlastnosti použitých materiálů. Potřebujeme znát teplotní rozsahy fázových přechodů a vlastnosti materiálu spojené s vedením tepla souvisejícím s výkonem laseru a rychlostí pálení laseru. Tyto vlastnosti termoplastů závisí na jejich molekulární struktuře, tj. na orientaci, délce, počtu a rozložení makromolekulárních řetězců, na krystalické struktuře a na úrovni molekulárních vazeb. Dále pojednáme o základních tepelných vlastnostech termoplastů.

V závislosti na chemické a fyzikální struktuře termoplastů se se zvyšující se teplotou projevují fázové přechody. Při fázových přechodech se změny vlastností materiálů zrychlují nebo dokonce mění skokem. Takové oblasti se nazývají přechodovými teplotami, mezi které patří teplota skelného přechodu ( $T_g$ ), teplota viskózního toku ( $T_f$ ), teplota tání ( $T_m$ ) a teplota tepelného rozkladu ( $T_d$ ). U amorfních termoplastů dochází k samovolné deformaci při dosažení teploty  $T_g$ . Pro polykrystalické materiály je stěžejní teplota  $T_m$ . Termosety jsou při zvyšování teploty téměř neměnné, pokud nezačne docházet k chemickým změnám v důsledku zvýšení teploty. Při dosažení teploty  $T_d$  již dochází k nevratné degradaci plastů, změní se tedy jejich struktura a nastává rozklad. Výběr konkrétního polymeru závisí na jeho použitelnosti pro různé teploty. Pro laserové svařování plastů jsou důležité fázové přechody při vysokých teplotách. Hodnoty tání a rozkladu pro některé plasty jsou uvedeny například ve [4].

Objem termoplastů se zvyšuje s rostoucí teplotou, což je způsobeno větší oscilací atomů a molekul uvnitř materiálu. Teplotní závislost specifického objemu se liší pro amorfní a polykrystalické polymery. Při teplotě skelného přechodu lze specifický objem amorfních termoplastů popsat lineární rovnicí:

$$V(T) = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (2.2)$$

kde  $V_0$  je objem materiálu před začátkem ohřívání,  $\beta$  je koeficient objemové teplotní roztažnosti a  $\Delta T$  přírůstek teploty. Pod teplotou skelného přechodu a nad teplotou tání specifický objem polykrystalických plastů s teplotou také roste lineárně. Pro ostatní teploty je průběh závislosti specifického objemu na teplotě složitější [4].

Tepelná kapacita pevného materiálu závisí na schopnosti jednotlivých částí (atomů, molekul, řetězců) se vychylovat z rovnovážných poloh. Síla kmitů závisí na vazebních silách a na hmotnostech těchto částí. Tepelná kapacita při konstantním objemu  $c_v$  je dána integrací:

$$c_v = k \cdot \int \left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)^2 \cdot \frac{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)}{\left(\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1\right)^2} \cdot \rho(\omega) d\omega, \quad (2.3)$$

kde  $\hbar$  je Planckova konstanta,  $\omega$  frekvence oscilací,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $T$  teplota a  $\rho(\omega)$  je rozložení hustoty oscilačního spektra. Přesné řešení rovnice (2.3) není možné kvůli

neznámu rozložení hustoty oscilačního spektra, ale k vyhodnocení se používají modely podle Einsteina a Debye. Tepelná kapacita  $c_v$  se hodí pro teoretické stanovení oscilací atomů, molekul a řetězců, ale pro výpočty rozložení teploty v materiálu se používá tepelná kapacita při konstantním tlaku  $c_p$ . Tato tepelná kapacita popisuje množství tepla  $Q$ , které je třeba dodat do materiálu o hmotnosti  $m$ , aby se ohřál o teplotu  $\Delta T$ :

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]. \quad (2.3)$$

V roztaveném stavu mají plasty větší tepelnou kapacitu než ve stavu tuhém. Pokud je srovnáme s kovy, je hodnota tepelné kapacity v tuhém stavu asi pětkrát vyšší.

Vedení tepla v termoplastech je dáno šířením pružných kmitů řetězců. Podle Debyeho lze závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a šířením elastických kmitů popsat vztahem:

$$\lambda = K \cdot \rho \cdot c \cdot u \cdot l, \quad (2.4)$$

kde  $K \sim \frac{1}{3}$  je bezrozměrná konstanta,  $\rho$  hustota,  $c$  tepelná kapacita,  $u$  rychlost přenosu pružných kmitů a  $l$  představuje volnou délku elastických kmitů. Typ vazeb, který se v materiálu vyskytuje, je důležitý pro velikost tepelné vodivosti, protože například tepelná vodivost pro kovalentní vazbu je přibližně desetkrát vyšší než v případě van der Waalsovy vazby. Závislost tepelné vodivosti na teplotě se liší pro amorfnní a polykrystalické polymery. Amorfnní termoplasty vykazují výrazně nižší teplotní závislost tepelné vodivosti v porovnání s polykrystalickými termoplasty, kde tepelná vodivost závisí na krystalizaci materiálu. Zvyšující se krystalizace zvyšuje hustotu materiálu, která vede k intenzivnější tepelné vodivosti.

Součinitel tepelné vodivosti popisuje vedení tepla v látce, tj. rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části do jiných, chladnějších částí. Teplotní rozdíl  $\Delta T$  způsobuje tepelný tok  $q$  z teplejší do chladnější části materiálu, který můžeme popsat vztahem:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T), \quad (2.5)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti. Je-li tepelný tok homogenní a ustálený, lze vztah (2.5) přepsat na:

$$\lambda = \frac{l}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta T} \Delta Q, \quad (2.6)$$

kde  $\Delta Q$  je množství tepla, které za časový interval  $\Delta t$  projde mezi dvěma shodnými plochami o obsahu  $A$ , které jsou kolmé ke směru toku a vzájemně posunuté o vzdálenost  $l$ , pokud je mezi nimi rozdíl teplot  $\Delta T$ . Obecná rovnice vedení tepla se součinitelem tepelné vodivosti nezávislým na poloze má tvar:

$$\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \text{div}(\text{grad}(T)) = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.7)$$

kde zlomek  $\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  představuje součinitel teplotní vodivosti  $a$ , který vyjadřuje, jak snadno se v látce vyrovnávají teplotní rozdíly.  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti,  $c$  je tepelná kapacita a  $\rho$  je specifická hustota materiálu. Změna teploty je tím rychlejší, čím vyšší je tepelná vodivost a čím



nižší je tepelná kapacita a specifická hustota materiálu. Jelikož  $\lambda$ ,  $c$  i  $\rho$  závisí na teplotě, součinitel teplotní vodivosti  $a$  je také funkcí teploty a liší se pro amorfni a polykrystalické materiály. Podrobně je tato problematika popsána například v [4] a jsou zde také uvedeny průměrné hodnoty součinitele teplotní vodivosti pro různé termoplasty [4].

### 2.2.1.3. Optické vlastnosti

Kromě tepelných vlastností mají i optické vlastnosti vliv na zpracování termoplastů pomocí laserů. Optické vlastnosti termoplastů jsou závislé na struktuře makromolekulárních řetězců a druzích vazeb v materiálu. Interakce elektromagnetického záření s materiálem závisí na vlnové délce záření. Optické vlastnosti dále závisí na teplotě, protože struktura materiálu termoplastů je ovlivněna teplotou.

K tomu, abychom mohli určit optické vlastnosti materiálu v různých částech spektra, potřebujeme znát optické konstanty této látky. Ty jsou dány popisem šíření elektromagnetického vlnění v různých látkách. Ve skutečnosti to ale nejsou konstanty, nýbrž funkce, kde nezávislou proměnnou je frekvence elektromagnetického vlnění, resp. jeho vlnová délka ve vakuu. Mezi optické konstanty související s elektrickým polem se řadí komplexní index lomu, permitivita, elektrická susceptibilita, měrná elektrická vodivost, měrný elektrický odpor a impedance. Permeabilita a magnetická susceptibilita jsou optické konstanty související s magnetickým polem. Tyto konstanty nejsou navzájem nezávislé a v širokém rozsahu elektromagnetického spektra se mění.

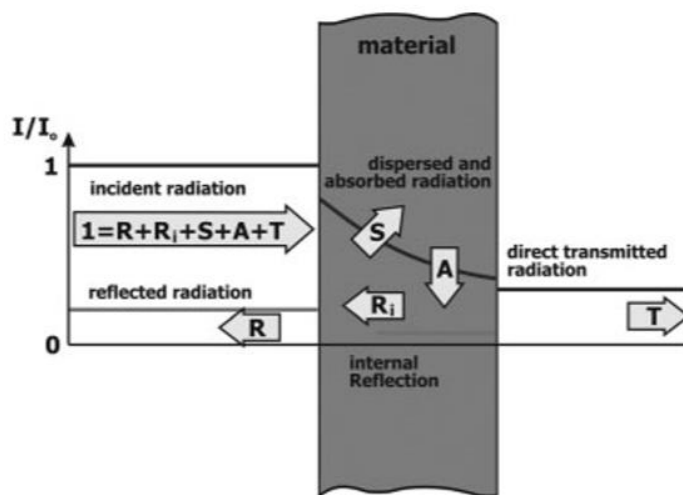
Optické vlastnosti popisují odezvu materiálu na dopadající elektromagnetické záření. Dopadající záření je pro každý materiál částečně propuštěno, odraženo a pohlceno. Tento proces je znázorněn na Obr. 2.2. Všechny tyto vlastnosti závisí na druhu a stavu materiálu, vlnové délce, směru dopadajícího a propuštěného světla a na polarizaci světla. Odrazivost a propustnost záření může být měřena spektrálním fotometrem. Absorpci (pohltivost) můžeme vypočítat z naměřených hodnot odrazivosti a propustnosti pomocí Kirchhoffova zákona tepelného vyzařování:

$$A = 1 - R - T, \quad (2.8)$$

kde  $A$  je absorpce,  $R$  odrazivost (reflektance) a  $T$  propustnost (transmitance). Z experimentů bylo zjištěno, že při průchodu světla o intenzitě  $I_T$  vrstvou látky o tloušťce  $z$  dojde k zeslabení této intenzity o hodnotu  $dI_T$ , která je úměrná původní intenzitě světla a síle vrstvy. Toto popisuje Lambertův absorpční zákon:

$$I_T(z) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa}{\lambda} \cdot z\right), \quad (2.9)$$

přičemž  $I_0$  je intenzita prošlého světla pro nulovou tloušťku materiálu a  $\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa}{\lambda}$  je absorpční koeficient, který závisí na vlnové délce záření  $\lambda$  a na materiálových vlastnostech zahrnutých v absorpční konstantě  $\kappa$ . Se zvyšující se tloušťkou materiálu tedy propustnost záření klesá exponenciálně [4].



Obr. 2.2: Záření dopadající na materiál se částečně odrazí od povrchu a od vnitřku, částečně je rozptýleno a absorbováno uvnitř a část projde skrz materiál. Převzato ze [4].

Další důležitou optickou vlastností je emisivita  $\varepsilon$ , jež je vlastností povrchu materiálu, která udává schopnost materiálu vyzařovat energii. Můžeme ji vyjádřit jako poměr vyzařování povrchu objektu a vyzařování povrchu absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nabývá hodnot v intervalu 0 – 1. Emisivita absolutně černého tělesa je 1, pro reálná tělesa je  $\varepsilon < 1$ . Emisivita není pro daný povrch konstantou, ale závisí na mnoha parametrech, například na úhlu odklonu od normály povrchu, teplotě objektu, vlnové délce a struktuře povrchu. Existují různé druhy emisivity. Spektrální emisivita se počítá v závislosti na určité vlnové délce. Pásmová emisivita je vztažena k určitému intervalu vlnových délek [5,6].

Kromě absorpce dochází v plastech ke ztrátám intenzity dopadajícího záření rozptylem způsobeným nehomogenní strukturou materiálu. V polymerních materiálech může být rozptyl záření způsoben strukturou makromolekul samotných, krystalickými fázemi v amorfních fázích, výplněmi, vlákny nebo barevnými pigmenty vloženými do polymerní matrice. Druh rozptylu souvisí s vlnovou délkou záření a velikostí disperzní struktury, která také může absorbovat záření. Shrnutí jednotlivých druhů struktur v plastech a jejich rozptyl záření pro různé vlnové délky můžeme najít například v [4]. Přírodní termoplasty mají malou absorpci ve vlnových délkách blízkého infračerveného záření (NIR, 0,8 – 1,4  $\mu\text{m}$ ), proto se do nich přidávají různé přísady (uhlíková čern, pigmenty, barviva), aby se jejich absorpce v NIR zvýšila a mohly se plasty laserově svařovat pomocí diodového, Nd:YAG nebo vláknového laseru, které pracují v těchto vlnových délkách. Ve vyšších vlnových délkách (MWIR a LWIR, 3 – 15  $\mu\text{m}$ ), kde pracuje například CO<sub>2</sub> laser, je absorpce termoplastů vyšší [4].

### 2.2.2. Laserové zdroje pro svařování plastů

O vlastnostech laserového záření a různých druzích laserů a jejich využití bylo obecně pojednáno v kapitole 2.1. Zde se zaměříme pouze na lasery a jejich vlastnosti využitě při svařování plastů. Nejdůležitějšími vlastnostmi laseru při laserovém svařování jsou vlnová

délka, rozložení intenzity a šíření paprsku, protože ty ovlivňují zaostřovací vlastnosti a interakci laserového záření s materiálem. Vlnová délka laseru závisí na typu použitého aktivního média. Rozložení intenzity laserového záření je dáno optickým rezonátorem, který sestává nejméně ze dvou zrcadel a je popisováno různými matematickými funkcemi, např. s Gaussovským tvarem. Laserové paprsky mají většinou velmi nízkou divergenci a šíří se na velkou vzdálenost bez rozptylu paprsku. Pro zpracování materiálu pomocí laseru potřebujeme paprsek zaostřit pomocí optických prvků (čoček nebo zrcadel). Díky vlastnostem laserového paprsku můžeme záření zaměřit do menší stopy než u běžného záření. Velikost této stopy závisí na ohniskové vzdálenosti zaostřovacího prvku a na vlnové délce laserového záření.

Tab. 2.1: Typy laserů pro laserové svařování plastů. Převzato z [4].

Druh laseru	Vlnová délka	Kvalita paprsku	Účinnost	Absorpce na přírodním plastu	Potřeba další absorpční součásti
Diodový laser	808 nm	nízká	>35%	projde skrz	ano
	940 nm	nízká	>40%	projde skrz	ano
	980 nm	nízká	>40%	projde skrz	ano
	1550 nm	nízká	>10%	v objemu	ne <sup>a)</sup>
	1940 nm	nízká	>6%	v objemu	ne <sup>a)</sup>
Vláknový laser	1050 nm	dobrá	n.a.	projde skrz	ano
	1070 nm	dobrá	>25%	projde skrz	ano
	1090 nm	dobrá	n.a.	projde skrz	ano
	1550 nm	dobrá	>10%	v objemu	ne <sup>a)</sup>
	2000 nm	dobrá	>5%	v objemu	ne <sup>a)</sup>
Nd:YAG	1064 nm	střední	<5%	projde skrz	ano
CO <sub>2</sub> laser	10,6 μm	dobrá	10%	na povrchu	ne

a) Pokud je intenzita laseru dostatečně vysoká.

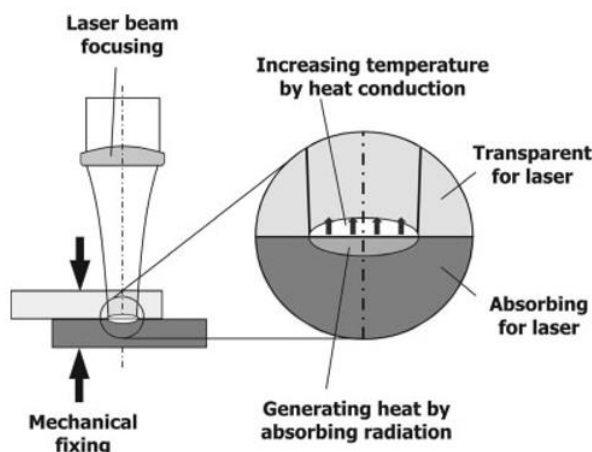
Volba laseru při laserovém svařování plastů závisí na absorpčním chování použitých plastů, na požadavcích na geometrii svarů a dalších faktorech. Většinou se používají diodové, Nd:YAG nebo vláknové lasery s vlnovými délkami v blízkých infračervených délkách (NIR) a infračervených krátkých vlnových délkách (SWIR) mezi 800 a 2500 nm, protože dokážou do určité míry proniknout plastem. Vláknové lasery jsou vhodné pro svařování malých součástí kvůli vysoké kvalitě laserového svazku. CO<sub>2</sub> lasery s vlnovou délkou 10,6 μm se používají pro speciální aplikace, například při svařování tenkých plastových folií. Při využívání většiny laserů musíme použít absorpční části, které pohltí laserové záření. Pokud použijeme například diodové lasery s vlnovými délkami 1500 nm až 2000 nm nebo vláknové lasery s vlnovými délkami nad 1200 nm, můžeme svařovat i transparentní plasty, ale takové laserové zdroje jsou dražší. V Tab. 2.1 jsou shrnuté různé druhy laserů s typickými vlnovými délkami, kvalitou

paprsku a účinností při laserovém svařování plastů. V posledním sloupci je uvedena potřeba absorpční součásti při svařování [4].

### 2.2.3. Proces laserového svařování plastů

Laserové svařování plastů je proces tepelné fúze vyvolaný absorpcí laserového záření a vytvořením procesního tepla. Historicky je proces laserového svařování plastů rozdělen na svařování na tupo a transmisní laserové svařování (TTLW). Dnes se TTLW běžně používá v průmyslu pro svařování plastových dílů pomocí laseru. S novými lasery, které pracují s vlnovými délkami nad 1200 nm, najde uplatnění i svařování na tupo. Dále budou podrobněji rozebrány oba druhy procesů.

Při svařování na tupo se svařují paralelní povrchy dvou součástí. Zaostřený paprsek laseru dopadne na povrch a v závislosti na vlnové délce a optických vlastnostech materiálu se absorpce může rozdělit na povrchovou a objemovou. Povrchová absorpce nastane například při použití CO<sub>2</sub> laseru nebo NIR laserů (laserů s blízkým infračerveným zářením) v kombinaci s vysoce absorpčními přísadami v plastu, například sazemi. Energie laseru se převede na procesní teplo na povrchu a bude vedením tepla rozptýlena do plastu, který se díky tomu začne tavit. Tento proces je použitelný pouze v případě tenkých plastů, například fólií, kvůli nízké tepelné vodivosti materiálu. Objemová absorpce nastane, pokud je hloubka optické penetrace laserového záření v rozsahu tloušťky materiálu. Přírodní plasty jsou více či méně transparentní pro NIR lasery a přidáváním absorpčních přísad do plastů nebo použitím laserů s vlnovými délkami nad 1200 nm můžeme hloubku optické penetrace nastavit tak, abychom dosáhli svařování podél celé tloušťky materiálů při současném použití vhodného upínacího tlaku.



Obr. 2.3: Proces transmisního laserového svařování. Převzato z [4].

Dnes se v průmyslu používá hlavně transmisní laserové svařování (TTLW). Základním principem této metody je vytvoření svaru na rozhraní dvou součástí, z nichž vrchní plast propouští laserové záření a spodní ho absorbuje. Laserový paprsek dopadne na transparentní součást a projde skrz ní do součásti pohlcující záření. V části absorbující záření se energie laseru přemění na procesní teplo a plast se začne tavit. Zároveň na plasty zespoda působí

přítlak. Na rozhraní součástí se začne vytvářet svar. Proces transmisního laserového svařování je znázorněn na Obr. 2.3. Termoplasty obvykle propouští NIR záření. Aby termoplasty pohlcovaly vlnové délky mezi 800 nm a 1100 nm, ve kterých pracují diodové, vláknové nebo Nd:YAG lasery, musí se do plastů přidat příměsi, například saze. Existuje speciální typ TTLW, který používá povlaky pohlcující laserové záření a umožňuje tak svařovat vizuálně průhledné plasty [4].

### 2.2.3.1. Typy procesů TTLW

Transmisní laserové svařování se obvykle používá ve třech modifikacích – konturové, simultánní a kvazi-simultánní svařování. Kromě těchto tří modifikací existují ještě další varianty, například maskové svařování, globo-svařování nebo hybridní svařování.

Při konturovém svařování se laserový paprsek pohybuje po kontuře svaru. Během procesu laserový paprsek lokálně zasáhne rozhraní součástí, ohřívá vrstvy plastů a vytváří svarový spoj. Přítlak působí po celou dobu na součásti zespoda a podporuje svařovací proces. Základní procesní parametry konturového svařování jsou výkon laseru, rychlost svařování, velikost laserové stopy a přítlak. Poměr výkonu laseru a rychlosti svařování udává velikost energie dodané laserem na jednotku délky. Kvalita laserového svařování přímo souvisí s použitou velikostí energie na jednotku délky. Nízká hodnota vede ke svaru s malou pevností, ale optická kvalita svaru může být dobrá. Vysoká hodnota energie na jednotku délky také vede k malé pevnosti svaru. Optimální hodnota se tedy nachází někde mezi těmito extrémy, více například v [4]. Pohyb laserového paprsku nad součástmi může být proveden několika možnostmi. Můžeme pohybovat svařovanými díly a laserový paprsek mít pevný nebo opačně. Někdy se používá i kombinace těchto metod. Pro přemísťování laserového paprsku se většinou používá skenovací optické zařízení. Při konturovém svařování musí být svařované součásti v neustálém kontaktu.

Stejně jako při konturovém svařování, i kvazi-simultánní svařování je založeno na pohybu jednoho laserového svazku. Rozdíl je v tom, že v případě kvazi-simultánního svařování se svazek pohybuje po kontuře vícekrát s velkou rychlostí. Pokaždé, když paprsek dospěje do daného bodu kontury, teplota na rozhraní plastů se zvyšuje. Po několika opakování dosáhne plast teploty tavení a součásti se začnou svařovat. Rychlost procesu a počet opakování musí být zvolen podle tepelných vlastností použitého materiálu. Při tomto typu svařování se taví celá dráha laserového svazku ve stejný čas. Přítlak zde může být použit k nastavení stlačovacího toku k vyplnění mezer mezi povrchy plastů, čímž vzniknou vysoce kvalitní svary. Mezi základní procesní parametry kvazi-simultánního svařování se řadí energie laseru, čas svařování, který je dán rychlostí procesu a počtem opakování, zaostření laserového svazku a přítlak. Analogicky ke konturovému svařování můžeme definovat energii laserové linky, která je zde dána jako poměr součinu energie laseru s časem svařování a délky svaru. K dosažení vysoké procesní rychlosti se používá skenovací optické zařízení sestavené ze dvou zrcadel a systému zaostřovacích čoček. Počítačové řízení zrcadel umožňuje flexibilní programování dráhy svařování.

Třetí modifikací TTLW je simultánní svařování, jež využívá jiné techniky oproti výše uvedeným druhům svařování. Celá dráha svaru je ozařována laserovým svazkem současně a svar se tvoří bez manipulace s laserovým svazkem. Proces simultánního svařování může být realizován dvěma odlišnými technikami buď za použití několika laserových zdrojů, nebo použitím jednoho laserového zdroje a optiky pro tvarování paprsku. Pokud svařujeme komponenty se složitější geometrií, můžeme použít flexibilní pole diodových laserů. Proces simultánního svařování není tak flexibilní jako konturové nebo kvazi-simultánní svařování. Tento typ svařování je vhodnější pro masovou produkci komponent se stejným tvarem svaru, ale v současnosti se v průmyslu téměř nevyužívá kvůli špatné flexibilitě a z ekonomických důvodů.

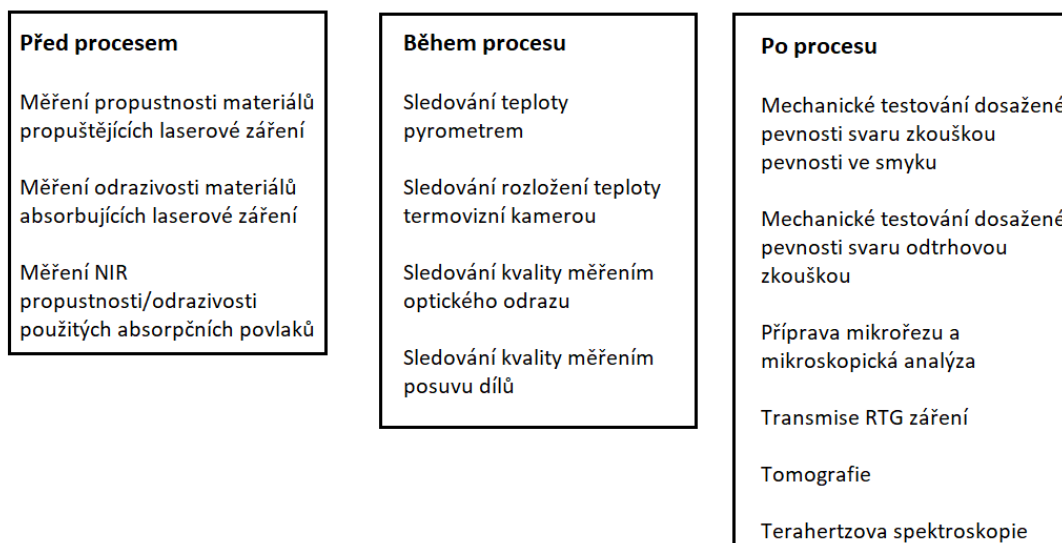
Existují další modifikace procesu laserového svařování plastů. Pro svařování složitých kontur s malou velikostí se používá svařování s maskou, kde je požadovaný tvar svaru dán kovovou maskou, ve které se vyřízne laserem nebo chemickým leptáním požadovaný tvar. Masky je umístěna nad svařovanými součástmi a je ozařována laserovým paprskem ve tvaru čáry, který se pohybuje podél masky. Globo-svařování je druh konturového svařování s integrovaným upínacím systémem se skleněnou kuličkou. Zaostrovací optika pro laserové záření a skleněná kulička jsou sestaveny dohromady v procesní hlavě. Zaostrění na svařované součásti se provede přes skleněnou kuličku. Hybridní svařování kombinuje běžné konturové svařování s infračerveným zářením pro další ohřátí součástí. Infračervené záření je vytvořeno několika halogenovými lampami. Použitím dodatečného infračerveného záření se dosáhne zvýšení procesní rychlosti a zlepšení kvality svarů [4].

#### **2.2.4. Měření procesů při laserovém svařování plastů**

Ve většině průmyslových aplikací je laserové svařování plastových součástí na konci výrobního řetězce. V tomto stádiu už svařovaný produkt prošel různými předchozími procesními kroky, například lisováním součástek nebo montáží vnitřních mechanických a elektrických komponent. Součásti určené ke svařování tedy už nabyly určitou peněžní hodnotu a špatně provedené laserové svařování by byl velký ekonomický problém zejména v masové produkci. Během celého procesu svařování je možné sledovat kvalitu výrobku a provádět online kontrolu svařovacího procesu a zabránit tak ekonomickým ztrátám. Sledování kvality a kontrolu procesu můžeme provádět před, během i po procesu. Různé možnosti sledování a kontroly procesu jsou znázorněny na Obr. 2. 4.

Možnostmi, jak sledovat proces svařování, jsou například kontrola správné absorpce materiálu s přidanými příměsemi před svařováním, sledování, zda jsou součásti během procesu v kontaktu, řízení teploty nebo pohled na svar po dokončení svařování. Monitorovací metody jsou schopné podat informace o většině sledovaných vlastnostech, ale ke zjištění kompletní kvality a pevnosti svaru je nutné použít destruktivní metody. Podrobnější rozbor o tom, jaké metody se hodí ke zjišťování různých vlastností a jaké metody použít pro různé druhy svařování, najdeme například v [4].

## Řízení a kontrola laserového svařování plastů



Obr. 2.4: Sledování kvality a techniky kontroly pro laserové svařování plastů. Převzato z [4].

### 2.2.4.1. Řízení a kontrola před procesem

Optické vlastnosti použitých plastů jsou důležitým faktorem pro úspěšné svaření součástí pomocí laseru. Stěžejní vlastností je propustnost a pohltivost materiálu. Optické vlastnosti by měly být jasně stanoveny dodavatelem materiálu, ale při změně dodavatele plastů nebo při úpravě materiálu dodavatelem se mohou optické vlastnosti měnit i přesto, že se jedná o stejný druh plastu. Příliš malá propustnost horního materiálu vede k rozptylu nebo absorpci záření, a tím se sníží intenzita laserového záření na rozhraní a může dojít k vytvoření nekvalitního svaru. Stejně tak příliš vysoká nebo malá pohltivost spodního materiálu vede k tvorbě nekvalitních svarů. Proto potřebujeme zkontrolovat optické vlastnosti použitých plastů, což můžeme udělat několika způsoby.

Na trhu jsou dostupné různé měřicí zařízení pro zjištění optických vlastností v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. Takové zařízení může být například vybaveno laserovou diodou s nízkým výkonem, která má stejnou vlnovou délku jako laserové záření použité při svařování. Pokud se z nějakého důvodu přeruší svařovací proces, materiál může být zkontrolován na propustnost, aby se zjistilo, jestli není porucha způsobena nedostatečným propuštěním laserového záření. Přístroje pro měření optických vlastností mohou být použity přímo na výrobní lince v průmyslové produkci, aby byly svařeny pouze materiály se správnými vlastnostmi. Takové přístroje porovnávají naměřenou propustnost s předem stanovenou požadovanou hodnotou a vzorky, které neodpovídají, jsou vyřazeny z výrobního řetězce.

Další alternativou pro měření optických vlastností jsou spektrální fotometry, například spektrometry VIS-NIR. Ty kombinují sledování propustnosti/pohltivosti a zbarvení daných materiálů. Tyto přístroje mohou měřit propustnost a pohltivost v celém spektrálním rozsahu vlnových délek ve viditelných (VIS) a blízkých infračervených (NIR) oblastech. Pro rychlou analýzu optických vlastností můžeme použít nízkonákladový vláknový VIS-NIR spektrometr,

který se skládá ze zdroje světla, který je spojený s držákem vzorku s integrovanou sférou, která je opět připojena ke spektrometru. Takový spektrometr se dá upravovat podle měření dané optické vlastnosti.

Speciálním případem kontroly kvality před procesem je analýza povlaků pohlcujících záření pomocí NIR zobrazování. V závislosti na optických vlastnostech součásti může být měření provedeno pomocí NIR záření, kdy sledujeme propustnost nebo pohltivost daného povlaku. Pokud je snímání obrazu prováděno elektronickou CCD kamerou, pořízené snímky mohou být zpracovány a analyzovány počítačem [4].

#### **2.2.4.2. Řízení a kontrola při procesu**

Výhodou laserového svařování plastů je možnost použití různých technik k monitorování svařovacího procesu za účelem kontroly kvality zpracovaných dílů. Techniky využívající tepelné, optické nebo mechanické snímání během procesu svařování jsou dobře vyvinuty pro průmyslovou aplikaci a jsou schopny kontrolovat zpracovávané součásti během samotného procesu. Některé monitorovací techniky mohou být použity k regulaci výkonu laseru během svařování, aby se dosáhlo vysoce kvalitních svařených dílů. Dále bude popsáno několik monitorovacích technik používaných v průmyslových aplikacích.

Laserové svařování plastů je založeno na absorpci laserového záření a vytváření tepla na rozhraní dvou svařovaných komponentů. Teplo vytvořené na rozhraní materiálů vyvolává emisi tepelného záření s rozdělením intenzity a vlnové délky, které koreluje s teplotou plastů podle Planckova vyzařovacího zákona. Planckův vyzařovací zákon říká, že s rostoucí teplotou tělesa se maximum spektrální intenzity vyzařování přesouvá do nižších vlnových délek a dosahuje vyšších hodnot. Tyto změny lze pozorovat pomocí spektrometrů, které ale nebývají dostatečně rychlé pro sledování během probíhajícího procesu nebo jsou příliš drahé.

Intenzita tepelného záření při teplotách tavení plastů je velmi malá a její maximum se nachází na vlnové délce 8-10  $\mu\text{m}$ . Proto je potřeba velmi citlivý detektor. Příkladem takového přístroje je pyrometr vybavený optickým detektorem citlivým na záření NIR. Většinou se používají InGaAs detektory s citlivostí na vlnové délky v oblastech VIS a NIR. Před detektorem se umísťuje optický filtr, který „odstřihne“ nežádoucí kratší vlnové délky laseru, které se odrazí od povrchu plastu. Optický detektor převádí naměřenou tepelnou intenzitu na elektrický signál, který je zesílen a poslán do řídicího zařízení, kde ho software převede na informaci o teplotě během svařování. Mezery ve svaru, nečistoty v materiálu či jiné poruchy způsobí vyšší intenzitu vyzařování, a tím i změny elektrického signálu zaznamenané pyrometrem, takže můžeme sledovat proces svařování a zamezit tak vzniku nekvalitních svarů. Pokud probíhá kontrola procesů v uzavřené smyčce, pak může být měřená teplota porovnána s přednastaveným teplotním rozsahem a je možné ovlivňovat procesní parametry (zejména energii laseru) tak, aby se teplota pohybovala v daném teplotním rozmezí.

Problémem při měření teploty pyrometrem je propustnost tepelného záření a absorpce a rozptyl laserového záření na horní součásti, proto je vhodné mít horní součást co nejtenčí.



Pyrometr tedy nemusí detekovat teplotu na rozhraní částí, ale tepelný vývoj procesu na povrchu horního plastu. Kvůli tomu není použití pyrometru vždy vhodné a je třeba před měřením otestovat jeho spolehlivost. Pyrometry se většinou používají při konturovém svařování. Pro kvazi-simultánní a simultánní svařování nejsou vhodné, takže v těchto případech se spíše využívá termografie s IR kamerou nebo digitální zobrazování s kamerami citlivými na NIR záření, například CCD nebo CMOS kamery.

Termovizní kamery pracují ve spektrálním rozsahu infračerveného záření. IR kamery nemohou být integrovány do laserové zaostřovací hlavy jako pyrometry, ale jsou umístěny samostatně v prostoru. Úhel pozorování IR kamerou by měl být co nejbližší ose laserových paprsků, aby se snížilo zkreslení snímaného obrazu. Dále bychom měli zamezit IR vyzářování z okolních upínacích prvků a horní součást by měla být co nejtenčí, aby probíhalo lepší tepelné snímání na rozhraní svařovaných částí. Ovladač IR kamery je spojen s ovladačem svařovacího systému, tím je možné současně spustit/zastavit proces a snímání procesu. Díky tomu lze pro každý vzorek sledovat tepelný vývoj během procesu a vytvořit tak kvalitní svar na jednotlivých dílech při sériové výrobě. Použitím termovizní kamery můžeme přizpůsobovat rozložení intenzity laseru regulací jeho výkonu a nastavovat laserové moduly tak, aby vznikaly jednotné svary. Pomocí IR kamery můžeme detekovat defekty svarů, jako jsou mezery či přehřátí.

CCD nebo CMOS kamery v kombinaci s elektronickým zpracováním obrazu se používají jako digitální zobrazovací techniky pro sledování laserového svařování plastů. Tyto kamery jsou citlivé na spektrální rozsah VIS a NIR vlnových délek a mohou být integrovány do laserové zaostřovací hlavy. Citlivost kamery zvýšíme použitím dodatečných světelných zdrojů, které osvětlují svařovanou oblast. Některé kamery mohou být citlivé i na vlnové délky nad 1000 nm, pak je nutné používat optické filtry k odfiltrování nežádoucích vlnových délek. Stejně jako u termovizních kamer i zde je možné kamery kombinovat s elektronickým zpracováním obrazu spojeným s laserovým svařovacím systémem pro řízení svařování plastů, kdy kameru i proces svařování můžeme ve stejný čas zapínat/vypínat pro každý vzorek a dosáhnout tak dostatečné kvality každého svaru při sériové výrobě.

Další technikou sledování kvality svařování je měření optického odrazu na rozhraní svařovaných částí během probíhajícího procesu. Svařované rozhraní je osvětlováno přídatným světelným zdrojem a zpětně rozptýlené odražené záření je měřeno fotometrickým detektorem. Jako alternativu lze sledovat zpětně odražené laserové záření. Při běžném laserovém svařování máme pouze jedno rozhraní mezi součástí propouštějící a pohlcující laserové záření, které je schopno odrážet určitou část dopadajícího laserového záření. Pokud se ale mezi součástmi vytvoří mezera ve svaru, vzniknou dvě rozhraní, které jsou schopné odrazit záření, což vede ke zvýšení měřené intenzity detekované fotometrem. Také nečistoty a příměsi v materiálu mění odražené záření. Stejně jako u pyrometrů i zde je možné fotometrický detektor zabudovat do zaostřovací hlavy. Alternativou k výše uvedenému postupu je diagnostika odrazu před a po procesu svařování, kdy je vzorek ozařován laserem s nízkým výkonem. Porovnání měření pak umožňuje posoudit kvalitu svaru. Diagnostika

pomocí odrazu se hodí pro konturové svařování. Překážkami pro její použití jsou například vysoká krystalinita či vysoký obsah aditiv v horní součásti.

Kvazi-simultánní a simultánní svařování umožňuje sledovat posuv dílů během svařovacího procesu. Jako kritérium kvality svaru můžeme uvažovat průběh posuvu dílů během zpracovávání vzorku. Ten můžeme zjistit měřením přítlaku pomocí piezoelektrických snímačů nebo měřením aktuálního posuvu dílů pomocí mechanických snímačů pohybu. Průběh posuvu dílů můžeme rozdělit do čtyř fází – začátek laserového záření a ohřívání plastů bez plastifikace, zvýšení teploty a začátek plastifikace s nelineárním posuvem dílů, zvýšení teploty s lineárním posuvem dílů, ukončení laserového záření a ochlazení plastů. Při vyhodnocování vhodných procesních parametrů před zahájením sériové výroby je posuv dílů, který odpovídá kvalitně vytvořenému svaru, uložen a v průběhu svařování jednotlivých vzorků je jejich posuv porovnáván s těmito hodnotami. Změny v naměřeném průběhu poté značí nedostatečnou kvalitu svaru [4].

### **2.3. Modelování laserového svařování plastů**

Při modelování laserového svařování plastů musíme uvažovat různé technické parametry, mezi které patří například vlastnosti použitého laseru, tepelné a radiační vlastnosti použitých materiálů, šíření tepla, termodynamiku a další. Již více prací se zabývalo modelováním fyzikálních procesů, mezi které patří například vedení tepla, tání či resolidifikace, při laserovém svařování plastů. Většina studií se zabývá předpovídáním rozložení teploty a tepelného toku. Při takovém modelování se obvykle musí používat zjednodušené předpoklady, jež ale snižují přesnost předpovědi. Příkladem zjednodušení je uvažování pohlcení laserového paprsku pouze na rozhraní svařovaných částí, zanedbání šíření tepla prouděním a radiací na hranicích, zanedbání závislosti materiálových vlastností na teplotě či konstantní profil laserového svazku a zanedbání rozptylu záření. Dalším zjednodušením jsou 1D a 2D modely, které nám uspoří čas, ale problémy jsou ve skutečnosti 3D.

Cílem modelování je tyto zjednodušující předpoklady co nejvíce eliminovat a přiblížit se skutečnosti. Modely můžeme rozdělit na analytické, které poskytují přesné řešení, odvozené na základě mnoha zjednodušujících předpokladů, a na numerické modely, které poskytují přibližné řešení, ale je mnohem méně zatížené zjednodušujícími předpoklady. Numerické modely se hodí k řešení komplikovanějších problémů ve složitějších podmínkách a dále budou rozděleny na 1D, 2D a 3D [7].

#### **2.3.1. Analytické modely**

Analytické modely umožňují rychlé modelování svařovacího procesu na úkor přesnosti. Nekladou tak vysoké nároky na výpočetní techniku jako numerické modely. První řešení analytického tepelného modelu bylo provedeno D. Rosenthalem v roce 1941 [8]. V této práci je uveden model s pohybujeícím se tepelným zdrojem použitým na vysoce vodivou polonekonečnou desku, který neuvažuje závislost tepelných vlastností na teplotě. Model

vedení tepla vyvinuli také Kennish a kol. [9], se kterým zkoumali vliv procesních parametrů na vlastnosti svaru. Používali polonekonečnou desku z amorfního materiálu (PETG) s konstantními tepelně-fyzikálními vlastnostmi, která byla ozařována symetrickým laserovým paprskem. Dospěli k závěru, že kvalitní svar vznikne pouze v případě, když je teplota svařované oblasti větší než teplota tavení.

Fáze ohřevu při transmisním laserovém svařování materiálu PA6 byly zkoumány v roce 1999 H. Potentem a kol. [10]. Předpokládali, že koeficient absorpce absorbující části je tak vysoký, že veškeré teplo je generováno na rozhraní materiálů a je rozváděno rovnoměrně do obou částí, což vede k symetrickému tepelnému rozložení. V práci bylo uvažováno, že materiálové vlastnosti nezávisí na teplotě a byly zanedbány účinky přenosu tepla prouděním během procesu. Analytický tepelný model s těmito předpoklady použili při jednostranném impulzním svařování. Cílem práce bylo definování korekčního faktoru pro absorbující materiál s nízkou pohltivostí. Výsledky byly porovnány s naměřenou tloušťkou taveniny.

V [11] Asséko a kol. představují kromě mikroskopického numerického modelu i model makroskopický analytický. Tyto modely jsou použity na termoplastické kompozity složené z polymerů a jednosměrných vláken (UD). Nejprve použili analytický model k popisu rozptylu energie v součástech, aby zjistili poměr rozptylu světla, standardní odchylku rozptylu a energii na rozhraní svařovaných částí. Výsledky z analytického modelu byly použity k popisu rozložení tepla následnými FEM výpočty. Účelem práce bylo optimalizovat energii laseru tak, aby došlo k vytvoření kvalitního svaru.

Devrient a kol. ve [12] popisují experimentální metodu pro zjištění rozptylového chování v polykrystalických termoplastech s krátkými skleněnými vlákny (např. PP GF 30 nebo PA 6 GF 30) v závislosti na materiálu vzorku, tloušťce a dalších vlastnostech. Výsledky z experimentů jsou použity ve FEM modelu, který je schopen uvažovat zjištěné rozptylové efekty. Z dat zjištěných pomocí FEM modelu je sestaven analytický model pro popis procesu transmisního laserového svařování s uvažováním rozptylu. Cílem práce bylo prozkoumat rozptylové účinky v několika termoplastech a vypočítat teplotní pole a geometrii svaru v závislosti na několika parametrech procesu.

### **2.3.2. Jednorozměrné modely (1D)**

Na rozdíl od analytických modelů jsou numerické modely schopny brát v potaz vlivy pohybujícího se tepelného zdroje a tepelně-fyzikální vlastnosti závislé na teplotě. Tyto vlivy způsobují nelinearity, které není možné analytickými modely zkoumat. Jednorozměrné numerické modely jsou nejjednodušším využitím numerického přístupu při modelování fyzikálních jevů. Mají nízké výpočetní nároky a výsledky počítají rychle [7].

Jednorozměrný tepelný model k popisu transmisního laserového svařování plastů použili Grewell a kol. [13]. Model využili na PC, ABS, PS a akrylové vzorky a zjistili, že svar vytvořený transmisním laserovým svařováním má velmi malá zbytková napětí a bylo dosaženo jednotného ohřívání. V rámci této práce autoři navrhli požadavky na minimální výkon

po určitou dobu svařování, pracovní vzdálenost a typ diodového laseru. Dále navrhli optimální tloušťku propustné části pro svařování PC jako funkci energie laserového paprsku a svařovacího času.

Modifikovaný T-spoj vytvořený z PA6 pomocí paprsku z diodového laseru zkoumali Probhakaran a kol. [14]. K předpovězení rozložení teploty vytvořili 1D model konečných diferencí. Numerický 1D model použili také Kurosaki a kol. [15] k modelování svařování s přepřátováním termoplastů pomocí CO<sub>2</sub> laseru. Modelem předpověděli hloubku tavení pro různé procesní podmínky amorfních materiálů (PC, PPMA a PS) a zjistili, že tepelná difuze a absorpční vlastnosti plastových částí mají velký vliv na jejich hloubku tavení.

### 2.3.3. Dvourozměrné modely (2D)

Pomocí 2D modelů můžeme studovat transmisní laserové svařování v rovině rovnoběžné nebo kolmé na pohyb paprsku laseru. V [16] Shaban a kol. představují termomechanické simulace TTLW ve vzorku ve směru rovnoběžném s laserovým paprskem. K simulaci používají program ABAQUS, založený na metodě konečných prvků (FEM). Paprsek z diodového laseru ozařuje vzorek z polykarbonátu (PC). Byl předpokládán Gaussovský profil pro laserový svazek. Autoři došli k závěru, že se fyzikální vlastnosti amorfních polymerů mění s teplotou a deformační rychlostí a tato změna je velmi výrazná při teplotě skelného přechodu ( $T_g$ ). Dále bylo zjištěno, že maximální teplota je dosažena v části pohlcující záření v hloubce 0,15 mm od rozhraní obou částí. Dalším bodem této práce bylo zkoumání napětí ve vzorku. Autoři dospěli k několika závěrům, například že napětí na středové čáře roste s časem až do okamžiku, kdy byla dosažena teplota  $T_g$ , a potom klesá prudce k nule.

Ilie a kol. [17] představují 2D model TTLW procesu amorfního materiálu. Cílem práce bylo posoudit svařitelnost termoplastů tím způsobem, že bylo určeno tepelné pole uvnitř svařovaných částí a chování struktury po ozáření laserem. Autoři použili termovizní kameru k odhadnutí absorpčního koeficientu části pohlcující světlo. Poté nafitovali 2D model využívající FEM na experimentální data získaná z termovize a předpokládali, že jediný neznámý parametr je absorpční koeficient absorbující části. Vypočítali, že absorpční koeficient slitiny PC a ABS je 19,5 mm<sup>-1</sup>.

Sooriyapiragasam a kol. vytvořili tepelný simulační model za účelem zrychlení a lepšího nastavení parametrů pro kvalitní laserové transmisní svařování v [18]. Pro tyto účely použili FEM simulační program Abaqus. Je možno zvolit mezi 2D a 3D sítí pro FEM výpočty. 2D simulace se používají kvůli zkrácení času výpočtu. Tvůrci v modelu uvažovali vlivy optických a tepelných vlastností materiálu na svařovací proces. Poté do modelu implementovali interakci mezi laserovým svazkem a materiálem. Vyvinutý výpočetní model umožňuje spolehlivé určení velikosti oblasti ovlivněné dodaným teplem a prostorové rozložení teploty. Kromě zhodnocení vlivů na kvalitu svařování, může model vypočítat i zbytková napětí, která jsou v materiálu v důsledku lokálního tepelného smršťování. Zejména tahové napětí je nežádoucím efektem při svařování, protože může mít nepříznivý dopad na mechanické vlastnosti svařovaných součástí.

Hopmann a kol. v [19] vycházejí z práce [18]. Autoři vytvořili tepelný simulační model za účelem porozumění procesu, usnadnění a zkrácení instalace procesu a zlepšení návrhu geometrie komponentů. Vytvořením modelu můžeme určit velikost oblasti ve svařovaných součástech, která je ovlivněná teplem (HAZ). K simulaci stejně jako v [18] použili FEM simulační program Abaqus a využili 2D model, který zkrátí výpočetní čas, ale zachová relevantní informace o rozměru HAZ. Hlavním cílem simulace bylo určení rozložení intenzity laserového svazku po průchodu propustným polykrystalickým termoplastem. Vypočtená velikost HAZ se dobře shoduje s velikostí HAZ určenou termovizní kamerou.

Rozložení teploty ve svařovaných součástech v závislosti na propustnosti a pohltivosti zabarvených plastů zkoumal Sato a kol. v [20]. V práci předpokládali pohybující se polonekonečný vzorek a stacionární laserový paprsek. Dalšími předpoklady bylo, že paprsek z diodového laseru má kruhový průřez a tepelně-fyzikální vlastnosti jsou konstantní. Metodou konečných diferencí (FDM) modelovali dvojici propustné a pohltivé PS desky v přeplátovaném spoji, mezi kterými je propustná vrstva PMMA.

### **2.3.4. Trojrozměrné modely (3D)**

Trojrozměrné modely omezují ze všech uvedených variant modelování fyzikálních jevů nejméně. Tím se ale zvýší požadavky na výpočetní prostředky, které naštěstí s velkým rozvojem v oblasti výpočetní techniky postupně odpadají, a je možné modelovat složitější numerické problémy. Nejprve byly takové modely použity na laserové svařování kovů, které se ale výrazně liší od svařování plastů a zdálo se, že tyto modely nebude možné aplikovat na plasty. Některé vlastnosti mají přece jenom stejné, například Lambertův-Beerův zákon lze použít u obou typů materiálů. V současnosti už vědci používají analýzu metodou konečných prvků a simulaci svařovacích procesů všech materiálů [7].

3D modelování tepelných procesů při TTLW termoplastů poprvé představili Mayboudi a kol. [7, 21, 22]. Ve [21] je popsán 3D tepelný model bodového transmisního laserového svařování řešený metodou konečných prvků. Program ANSYS 10 byl použit pro vyvinutí modelu přeplátovaného spoje pro nevyztužený nylon 6. Výsledky byly prezentovány pro případ rovnoměrného obdélníkového rozložení energie laseru. Modelem získané rozložení teploty ve svařovaných částech bylo porovnáno s naměřenými výsledky a bylo zjištěno, že si sobě dobře odpovídají. V [22] použili Mayboudi a kol. stejný 3D tepelný model jako v [21], ale tentokrát za účelem předpovězení rozsahu roztavené zóny v prostoru a v čase a také kvůli zjištění rozložení teploty podél svaru. Předpokládané rozměry svaru získané z numerického tepelného modelu byly porovnány s experimentálními daty po normalizaci obou rozměrů a byla nalezena přiměřená shoda. Možný problém autoři viděli v tom, že se předpokládá konstantní tvar laserového paprsku.

Mayboudi a kol. v [23] prezentují použití termovizní kamery ke sledování interakce mezi stacionárním laserovým paprskem a plastem v přeplátovaném spoji. Kamerou bylo zkoumáno několik povlaků na povrchu plastu a bylo získáno rozložení teploty na povrchu vzorku kolmo ke svaru. Bylo zjištěno, že sazemi potažený povrch se ohřívá v důsledku rozptýleného

laserového světla, což poskytuje prostředky pro odhad intenzity rozptýleného světla. Poté autoři modelovali TTLW proces 3D modelem pomocí komerčního softwaru ANSYS 10 využívající FEM. Tento model dobře popisuje zahřívání a ochlazování materiálu při laserovém procesu svařování, včetně účinků laserového paprsku a jeho rozptylu v polykrystalickém materiálu. Výsledky z termokamery a modelu byly porovnány a dobře se shodovaly pro absorbující součást. Pro propustnou součást si údaje dostatečně neodpovídaly, protože velký podíl laserového záření nebyl dopraven na rozhraní součástí, nýbrž byl rozptýlen do stran nebo odražen a tím pádem nebylo všechno záření absorbováno na rozhraní, jak se předpokládalo v modelu.

Ve [24] Speka a kol. využívají infračervenou termografii pro měření povrchové teploty a porovnáním s hodnotami rozložení teploty uvnitř komponentů získanými numerickou simulací, vyhodnocují optimální parametry procesu. Experimentální výzkum autoři provádějí na amorfních polymerech (konkrétně PMMA a slitina ABS/PC) v přeplátovaném spoji. Pro řešení nelineární tepelné rovnice použili software COMSOL. Byla nalezena dobrá shoda mezi experimentálními a vypočtenými daty, takže je možné infračervenou termografii jako nedestruktivní metodou použít pro sledování svařovacího procesu v reálném čase.

Porovnání výsledků FEM simulace s výsledky z termovizní kamery využívá také Flock a kol. ve [25]. Numerický model vytvořený opět v softwaru COMSOL využívají pro předpověď rozložení teploty a zóny ovlivněné teplem (HAZ) při transmisním laserovém svařování dvou polykarbonátů. Vypočtené výsledky HAZ a tepelných gradientů jsou v dobré shodě s naměřenými hodnotami, ale omezení měřící metody se ukazuje v zanedbání malých rozdílů v teplotě. Trojrozměrný model umožňuje předpovídat maximální teploty a poskytuje informaci o velikosti svaru.

Svařování dvou polykarbonátů je také simulováno trojrozměrným modelem přenosu tepla s pohyblivým laserovým svazkem ve [26] D. Misrou a kol. Pro modelování se používá software ANSYS, kterým jsou fáze ohřevu a chlazení při svařování úspěšně modelovány. Při vývoji modelu brali autoři v úvahu všechny hlavní fyzikální jevy spojené s transmisním laserovým svařováním, jako je přenos tepla zářením, vedením a prouděním. V úvahu jsou brány fyzikální vlastnosti materiálů závislé na teplotě a objemový Gaussovský zdroj tepla. Cílem práce bylo předpovědět rozložení teploty a profil svaru během procesu. Model byl ověřen experimentálními výsledky.

V [27] Acherjee a kol. zkoumají laserové transmisní konturové svařování pomocí analýzy konečných prvků (FEA) a techniky plánovaných experimentů (DoE). Stejně, jako v [26] autoři používají software ANSYS a modelují svařování s pohyblivým laserovým svazkem. DoE spolu s regresní analýzou jsou následně použity k plánování experimentů a k rozvoji matematických modelů založených na výsledcích ze simulací. Klíčové parametry, jako jsou výkon, rychlost svařování, průměr paprsku a podíl pohlcujících součástí v absorpční součásti jsou brány jako nezávislé proměnné, zatímco maximální teplota na rozhraní, šířka svaru a hloubka svaru

v obou částech jsou uvažovány jako závislé proměnné. Analýza citlivosti se provádí za účelem zjištění ovlivnění závislých proměnných nezávislými proměnnými.

FEM výpočty pro určení optimálních podmínek laserového svařování dvou různých materiálů (zde titanové fólie a polyimidu) prováděli Mahmood a kol. v [28] pomocí softwaru ABAQUS. Přesnost numerického modelu byla porovnána s experimentálními daty a byla nalezena dobrá shoda, takže je možné model použít i pro další kombinace materiálů. Bylo objeveno, že pro běžné hodnoty výkonu laseru je kvalitní svar mezi materiály funkcí laserové rychlosti skenování. Příliš vysoká rychlost skenování nevytvoří dostatečné zvýšení teploty rozhraní, aby se dosáhlo dobré chemické vazby. Na druhou stranu, příliš malá rychlost způsobí nadměrný růst teploty, který vede k hoření polyimidu. Pro rozsahy parametrů zkoumaných v této práci, bylo zjištěno, že pro výkon laseru o velikosti 4 W, se vytvoří kvalitní svar mezi materiály pro laserovou skenovací rychlost mezi 600 a 2000 mm/min.

V [29] navazuje Hohmann a kol. na poznatky Devrient a kol. ve [12]. Opět se zabývají transmisním laserovým svařováním polykrystalických termoplastů s krátkými skleněnými vlákny. Skleněná vlákna způsobují větší absorpci a rozptyl laserového záření uvnitř horního plastu, což má negativní vliv na svařovací proces. V této práci autoři použili Monte Carlo simulaci (MCS) s proměnným krokem na vzorek bez vnitřního rozptylu a využili ray tracing model, který je schopný rozlišovat každé vlákno zvlášť, takže můžeme uvažovat prostorově nerovnoměrné rozložení vláken. Model je schopen detailně vypočítat rozložení intenzity laseru po průchodu laseru skrz horní svařovanou část. Výsledky obou metod jsou porovnávány a oba přístupy jsou kombinovány.

### **2.3.5. Shrnutí současného stavu modelování laserového svařování plastů**

Cílem této práce je vytvořit numerický model kvazisisimultánního transmisního laserového svařování, pomocí kterého bude možné zhodnotit vliv parametrů procesu na teplotní pole v materiálu. Cílem je získat takový model, který umožní výpočet teploty v T spoji z materiálu POM. Dalším úkolem je z těchto teplot simulovat infračervené vyzařování z rozhraní a povrchu vzorků při svařování. Tyto výsledky budou porovnány s měřením IR kamerou na vlnových délkách od 1 do 1,7  $\mu\text{m}$  (NIR a SWIR).

Velmi podobnou úlohu zkoumali Flock a kol. v [25]. Transmisním laserovým svařováním byly svařeny díly v T spoji z polykarbonátu. Výsledky ze simulace pomocí softwaru COMSOL jsou porovnány s teplotami naměřenými IR kamerou (LWIR), která snímá vzorek ze strany. Výsledky se dobře shodovaly pro nízké hustoty energie, ale pro vysoké hodnoty a okrajové části vzorků je ještě prostor pro zlepšení. Simulaci kvazisisimultánního svařování T spoje vzorků z polyethylenu provádějí Schmailzl a kol. v [30]. Rozložení teploty ze simulace porovnávají s výsledky z 3D-scanneru s vestavěným pyrometrem (NIR). Konturové laserové transmisní svařování T spoje simulují Mayboudi a kol. v [22]. Používají zde vzorky z PA6 a výsledkem je rozložení teploty ve vzorcích. Rozměry svaru získané z numerického modelu jsou porovnány s experimentálními daty po normalizaci do 2D. Tepelný model je ověřen pomocí dřívějších experimentálních studií. Porovnání teplot ze simulace a měření IR kamerou (LWIR) je popsáno

Mayboudi a kol. v [23]. Zde používají vzorek PA6, jde o konfiguraci přeplátovaného spoje a simuluje se pouze stacionární laserový svazek.

Ve většině prací se nezabývají geometrií T spoje, která nás zajímá, ale vzorky s přeplátovanými spoji [17, 18, 20, 21]. Materiál POM, jež využíváme v této práci, se v žádné studii nevyskytuje. Ve většině prací se modeluje rozložení teploty ve vzorcích, které se porovnává s měřením z IR kamery [19, 17, 20, 23, 25], využívá se také pyrometr [30] nebo integrační sféra pro měření propustnosti materiálu [18]. Častěji než kvazisisimultánním svařováním, se práce zabývají svařováním konturovým [22, 26, 27]. Zkoumání vyzařování z rozhraní a povrchu při kvazisisimultánním svařování a porovnávání výsledků z IR kamery (NIR a SWIR) a simulací je dosud neprozkoumaná oblast této problematiky.



### **3. Cíle diplomové práce**

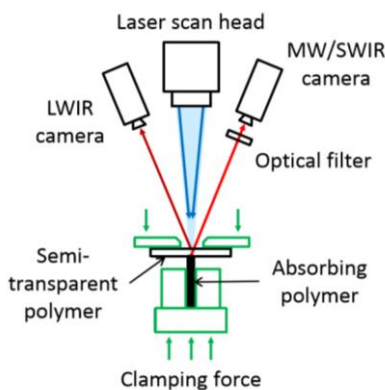
1. Rešerše problematiky modelování a měření tepelných procesů při laserovém svařování plastů.
2. Sestavení a odladění numerického modelu pro transmisní laserové svařování.
3. Zhodnocení vlivu parametrů procesu (např. rychlosti pohybu svazku, výkonu laseru a velikosti laserového spotu) na teplotní pole v materiálu.
4. Porovnání s experimentem s měřením teplot pomocí termovizní kamery při svařování.

## 4. Metody zpracování

### 4.1. Experimenty

V této kapitole bude popsán průběh experimentu laserového svařování plastů, který byl monitorován infračervenými kamerami. Výsledky z kamer budou porovnány s výsledky simulací, jež jsou cílem této práce.

Experimentální systém, který je znázorněn na Obr 4.1, se skládá z 300W vláknového laseru (IPG YLR-300/3000-QCW-MM-AC, vlnová délka 1070 nm) se skenovací hlavou (Scanlab intelliSCAN 20, objektiv EFL=500 mm) a pneumatickým upínacím systémem s měřením vzdálenosti a síly. Kvazisimultánní transmisní laserové svařování probíhalo laserovým paprskem, který měl rychlost  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , průměr laserové stopy 1 mm a výkon 36 W (pro 1 mm tlustý vzorek) nebo 63 W (pro 2 mm tlustý vzorek). Upínací síla byla 87 N a doba svařování byla 5,3 s. Vzorky se skládaly z polopropustného a pohlcujícího polymeru, jejichž uspořádání bylo do T-spoje. Polopropustný polymer byla 1 nebo 2 mm tlustá destička o velikosti 25 x 50 mm složená z materiálu POM (polyoxymetylén, POM-C nature). Absorbující polymer byla 2 mm tlustá destička o velikosti 25 x 40 mm složená rovněž z materiálu POM, ale s příměsí sazí (POM-C black). Laserový paprsek skenoval povrch ve 2 rovnoběžných čarách vzdálených od sebe 1 mm tak, že vyplnil oblast o šířce 2 mm, jež odpovídá tloušťce absorbujícího polymeru. Kombinace parametrů svařování (síla, čas, výkon laseru) vedla k vertikálnímu pohybu vzorku během tání o více než  $300 \mu\text{m}$ .

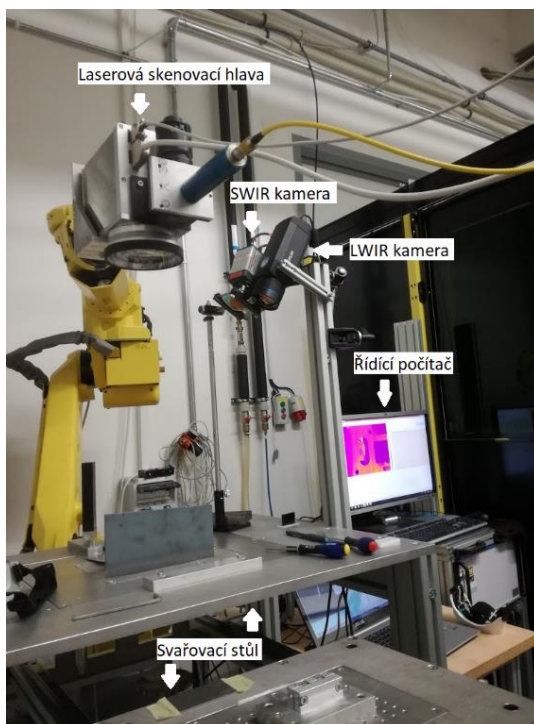


Obr. 4.1: Schéma uspořádání experimentu při laserovém svařování plastů. Převzato z [31].

Proces svařování byl sledován dvěma infračervenými kamerami (LWIR a MW/SWIR). Před MW/SWIR kamerou byl umístěn optický filtr. LWIR kamera (FLIR A615), která má citlivost v rozsahu vlnových délek  $7,5 - 14 \mu\text{m}$ , byla použita na měření teploty povrchu polopropustného polymeru. V těchto vlnových délkách je polymer POM nepropustný. Hemisférická propustnost byla pro 1 mm tlustý vzorek kolem 0,1 % a pro 2 mm tlustý vzorek méně než 0,05 %. MW/SWIR kamera (FLIR SC7650) s citlivostí v rozsahu vlnových délek  $1,1 - 6 \mu\text{m}$  byla použita ke sledování infračerveného vyzařování z ohřátého a roztaveného rozhraní mezi polymery při laserovém svařování. Tato kamera je chlazená Stirlingovým

motorem na velmi nízké teploty, díky čemuž má vysokou citlivost a může měřit ve vysokých frekvencích. Většina měření byla provedena při snímkovací frekvenci 870 Hz a integrační době 1,2 ms. Kamera byla kalibrována pomocí černého tělesa ke zkoumání závislosti signálu na nastavení integrační doby. Byla nalezena lineární závislost, takže pro ostatní použité integrační doby (0,2 a 0,6 ms) byl signál násoben (šesti a dvěma), aby se získal signál při integrační době 1,2 ms.

Pro omezení spektrální citlivosti MW/SWIR kamery na rozsah SWIR byly použity tři optické filtry. Toto omezení bylo provedeno kvůli tomu, aby bylo možné měřit infračervené vyzařování z roztaveného rozhraní mezi dvěma polymery a snížilo se záření z povrchu. Na rozhraní jsou vyšší teploty než na povrchu, takže vyzařování z rozhraní je posunuté do kratších vlnových délek. Filtry SP-2600 a SP-3100 (Spectrogon) mají průměr 25,4 mm a tloušťku 0,5 mm. Jejich spektrální propustnost závisí na optických povlácích. Filtr SP-2600 má výraznou propustnost pro vlnové délky kolem 4,5  $\mu\text{m}$ , což nebylo původně známo, ale pro signál z kamery je to důležité. Třetím filtrem byl typ WG12012-C (Thorlabs), což je N-BK7 skleněné optické okno s průměrem 50,8 mm a tloušťkou 12 mm s antireflexním povlakem pro vlnové délky 1050 – 1700 nm. Jeho spektrální propustnost závisí hlavně na použitém sklu a jeho tloušťce [31].



Obr. 4.2: Fotografie rozložení experimentu při měření s kamerou Hamamatsu C14041-10U.

V podobné konfiguraci, jako je znázorněno na Obr. 4.1, probíhalo ještě měření s kamerou InGaAs (Hamamatsu C14041-10U) s citlivostí v rozsahu 0,95 – 1,7  $\mu\text{m}$ . Při většině měření byla snímkovací frekvence kamery 27,1 Hz a integrační doba 33,3 ms. Tato kamera byla umístěna vedle LWIR kamery, viz Obr. 4.2. Kamera Hamamatsu C14041-10U slouží stejně jako MW/SWIR kamera k měření infračerveného vyzařování z rozhraní mezi polymery při

laserovém svařování. Tato kamera pracuje v kratších vlnových délkách, proto je pro měření vyzařování z rozhraní vhodnější. Před kameru Hamamatsu C14041-10U byl vložen filtr blokuující záření na kratších vlnových délkách než 1250 nm, aby se zabránilo ovlivnění signálu intenzivním laserovým světlem používaným pro svařování (na vlnové délce 1070 nm).

## **4.2. Modelování v programu COSMOSM**

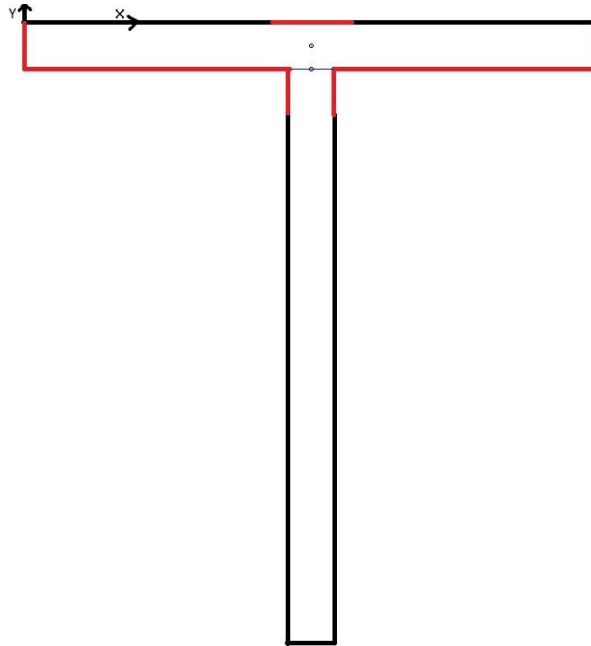
### **4.2.1. Software COSMOSM**

COSMOSM je úplný, modulární, samostatný systém konečných prvků vyvinutý společností Structural Research and Analysis Corporation (SRAC, dnes Solidworks) pro osobní počítače a pracovní stanice. Program obsahuje moduly pro řešení lineárních i nelineárních, statických i dynamických strukturálních problémů, mezi které patří úlohy přenosu tepla, mechanika tekutin, elektromagnetické problémy a optimalizace. COSMOSM se skládá z pre- a postprocesoru, různých modulů analýzy, rozhraní, překladače a nástrojů. Program je modulární, což umožňuje získávat a načítat pouze moduly, které jsou potřeba.

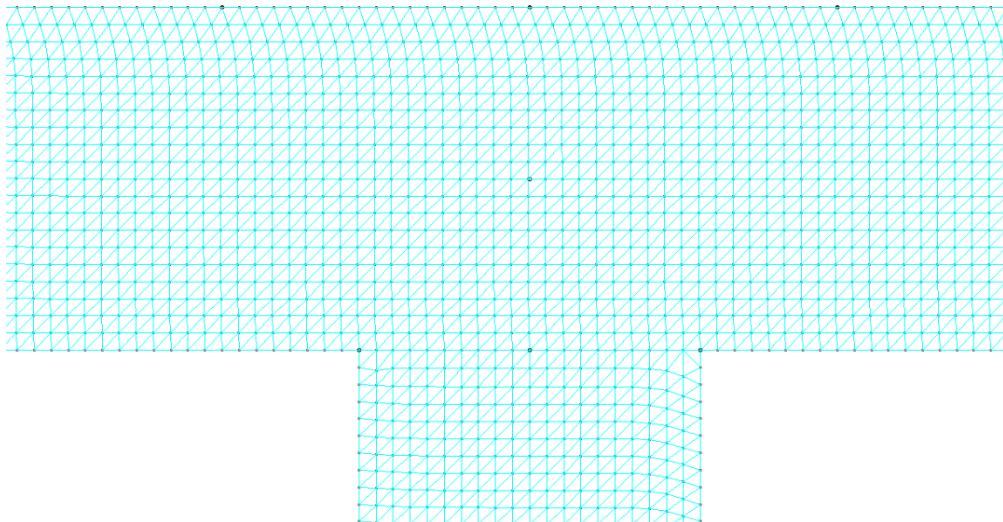
GEOSTAR je základní pre- a postprocesor systému konečných prvků COSMOSM. Jde o interaktivní 3D grafický geometrický modelář podobný CAD aplikacím, síťový generátor a FEA (analýza konečných prvků) pre- a postprocesor. Pomocí programu GEOSTAR je možné vytvořit geometrický model, vytvořit síť konečných prvků, zadat všechny informace související s analýzou, provést požadovaný typ analýzy, vykreslit a vypsát výsledky bez nutnosti opouštět obrazovku GEOSTARu. Moduly COSMOSFFE jsou vyvinuty pro řešení rozsáhlých problémů, kde se využívají řídké matice a systémy řízení báze dat ke snížení času výpočtu, místa na disku a požadavků na paměť. Geometrické možnosti GEOSTARu jsou založeny na smíšené okrajové reprezentaci (B-rep) a parametrických kubických rovnicích. GEOSTAR je kompatibilní s mnoha CAD a Solid Modeling systémy, například SolidWorks, AutoCAD, IDEAS nebo Eureka, takže modely vytvořené v těchto programech lze importovat do GEOSTARu a opačně. Pomocí překladače lze importovat i data z/do programů ABAQUS, ANSYS, NASTRAN a podobných [32].

### **4.2.2. Tvorba modelu a volba parametrů**

Řešení úlohy ve výpočetním systému COSMOSM se provádí v několika krocích, které zahrnují tvorbu simulačního modelu, vlastní numerický výpočet a vyhodnocení výsledků. Prvním krokem při tvorbě simulačního modelu je vytvoření geometrie pomocí bodů, křivek a ploch. Geometrie modelu přesně odpovídá reálnému uspořádání při experimentu, ale řeší se zde pouze 2D úloha, tj. svislý řez experimentálním uspořádáním. Uspořádání dvou plastových destiček je do T-spoje, kde v místě spoje destiček vzniká svar. Geometrie je znázorněna na Obr. 4.3. Spodní plast má rozměry 25 x 2 mm. Horní plast se používal ve dvou variantách, které se lišily tloušťkou, tj. rozměry byly 25 x 2 mm nebo 25 x 1 mm.



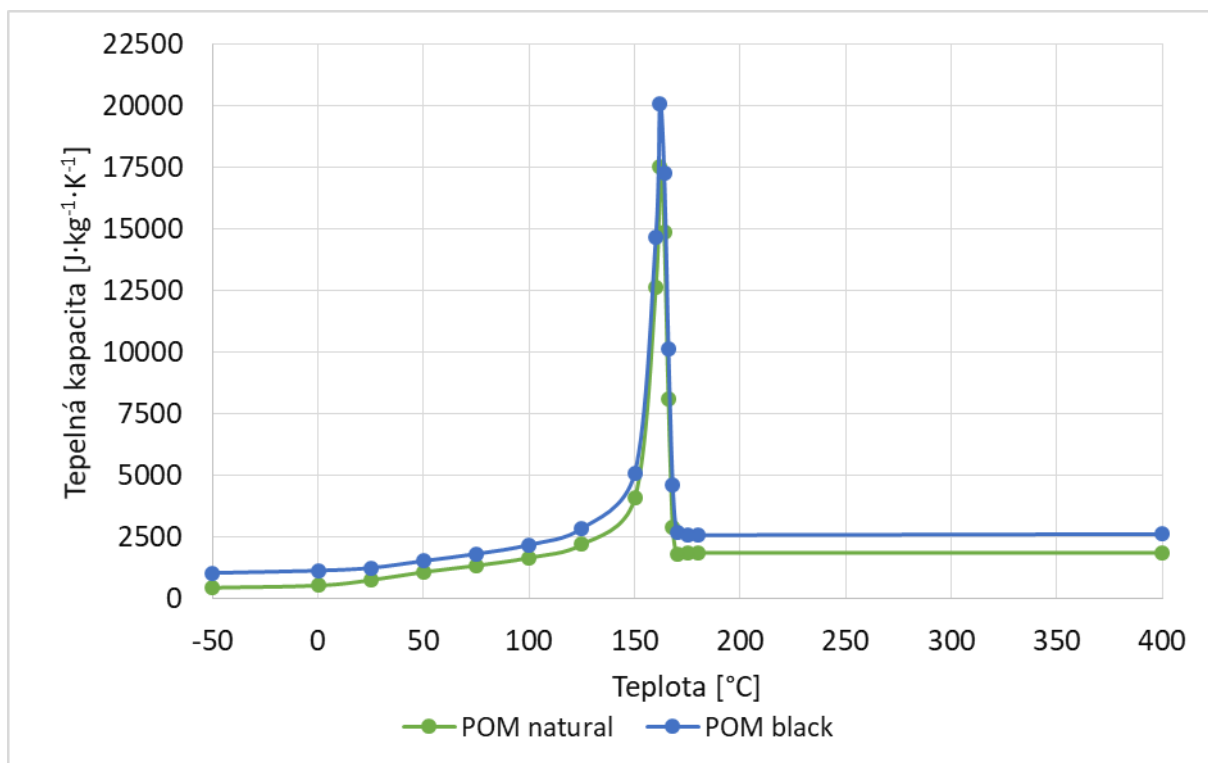
*Obr. 4.3: Znáznění geometrie svařovaných plastů a zvýraznění podmínek přestupu tepla. Černě je znázorněn přestup tepla do kovu a červeně přestup tepla do vzduchu. Zde je znázorněna geometrie pro horní plast o tloušťce 2 mm.*



*Obr. 4.4: Znáznění sítě konečných prvků. Přiblížení na zkoumanou oblast svaru.*

Druhým krokem při vytváření modelu je tvorba výpočetní sítě. Výhodou programu COSMOSM je možnost automatické tvorby sítě, která byla zvolena i v tomto případě. Byly zvoleny 2D elementy ve tvaru trojúhelníků. Na 1 mm modelu bylo použito 10 elementů, tj. velikost odvěsen trojúhelníku je 0,1 mm. Výpočetní síť přiblížená na stěžejní oblast svaru je znázorněna na Obr. 4.4. K jednotlivým elementům jsou připojeny i materiálové vlastnosti. V našem případě se zadávala hustota materiálu, tepelná vodivost a tepelná kapacita. Ve všech simulacích byl použit materiál POM (polyoxymetylén). Na horní plast byla použita propustná verze materiálu POM a na spodní plast absorbující verze materiálu POM, která obsahuje saze. Při volbě materiálových vlastností se ale nerozlišovalo mezi těmito variantami, protože

nevíme, jaký vliv mají saze na dané vlastnosti. Hustota materiálu byla zvolena  $1\,410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , tepelná vodivost  $0,25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a měrná tepelná kapacita byla zadána křivkou v závislosti na teplotě, jež je znázorněna na Obr. 4.5. Na tomto obrázku je rovněž vidět zahrnutí latentního tepla fázové přeměny, které se projevuje velkým zvýšením hodnot měrné tepelné kapacity kolem teploty tavení. Volba materiálových vlastností bude více diskutována v kapitole 5.1.



Obr. 4.5: Závislost tepelné kapacity na teplotě pro materiál POM natural a POM black.

Dalším krokem při vytváření modelu je zadání podmínek jednoznačnosti, tj. počáteční a okrajové podmínky. Na křivky po obvodu modelu je zadávána podmínka konvektivního přestupu tepla, jejíž hodnoty se liší v závislosti na tom, jestli vzorek obklopuje vzduch, či kov zařízení, jež uchycuje vzorek do požadované polohy. Kde je zadávána jaká podmínka, je barevně znázorněno na Obr. 4.3. Koeficient přestupu tepla do vzduchu byl pro výchozí model zvolen  $10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a koeficient přestupu tepla do kovu pro výchozí model má hodnotu  $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Počáteční teplota všech částí objektu je  $25\text{ °C}$ , protože experiment probíhal v laboratoři při pokojové teplotě. Diskuze volby podmínek jednoznačnosti proběhne v kapitole 5.1.

Před spuštěním výpočtu je nutné definovat podmínky výpočtu a numerické parametry řešení. Stěžejní je zadání vnitřního zdroje tepla. V našem případě je zadáván na uzly sítě na rozhraní dvou plastů, protože z experimentu víme, že tavení materiálu probíhá na rozhraní, tj. do těchto míst je dodáván výkon z laseru. Z celkového výkonu dodávaného do 3D vzorku při experimentu se musí určit, kolik z něho projde na rozhraní v našem 2D řezu. Dále se výkon musí snížit o propustnost horního plastu a výsledná hodnota se rozpočte na počet uzlů na rozhraní (v našem případě 21 uzlů). Uvedeme příklad pro celkový výkon  $63\text{ W}$  a propustnost

horního plastu 18 %. Na rozhraní tedy projde jen 18 % z 63 W, tj. 11,34 W. Dostali jsme výkon na celou plochu vzorku, který je dlouhý 40 mm. Po vydělení délkou vzorku dostaneme výkon dodaný do délky vzorku 1 mm, tj. 0,2835 W. Tuto hodnotu musíme ještě rozpočítat mezi 21 uzlů výpočetní sítě, které pokrývají celou šířku rozhraní, tj. 2 mm. Dostaneme výsledný výkon 0,0135 W/uzel. Jedná se o nestacionární tepelnou úlohu. Celkový čas výpočtu je 10 s, časový krok 0,1 s. Tepelný výkon je zadáván v prvních pěti sekundách výpočtu, pak vzorek volně chladne. Pro analýzu přenosu tepla byl zvolen FFE rychlý řešič implementovaný v HSTAR tepelném modulu.

Následuje samotné spuštění výpočtu, tj. proběhne numerické řešení matematického modelu úlohy a poté se mohou zpracovávat samotné výsledky. Výsledky je možné v Geostaru zobrazit v grafickém tvaru jako pole kontur, grafy průběhů veličin v závislosti na čase nebo grafy průběhů veličin po přímce, tzv. profily. Numerické hodnoty výsledků je možné exportovat v grafické i číselné podobě. Pro potřeby diplomové práce bylo využíváno grafického zobrazení rozložení teploty v modelu, exportování číselných hodnot časových průběhů teplot na povrchu a rozhraní vzorku a teplotní profily po úsečkách svisle středem vzorku a na povrchu a rozhraní. Časové průběhy teploty na povrchu byly brány v uzlu uprostřed vzorku, stejně tak časové průběhy na rozhraní byly počítány v uzlu uprostřed vzorku. Příklad skriptového souboru pro výchozí model je uveden v příloze A a shrnutí parametrů výchozího modelu je v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Parametry výchozího modelu

Parametr	Hodnota
Rozměry spodního plastu	25 x 2 mm
Rozměry horního plastu	25 x 2 mm nebo 25 x 1 mm
Hustota výpočetní sítě	10 elementů na 1 mm
Použitý materiál	polyoxymetylén (POM)
Hustota materiálu	1 410 kg·m <sup>-3</sup>
Tepelná vodivost	0,25 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Tepelná kapacita	křivka v závislosti na teplotě (viz Obr. 4.5)
Koeficient přestupu tepla do vzduchu	10 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
Koeficient přestupu tepla do kovu	100 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
Počáteční teplota objektu	25 °C
Celkový výkon	63 W (horní plast 2 mm) a 36 W (horní plast 1 mm)
Propustnost horního plastu	18 % (horní plast 2 mm) a 31 % (horní plast 1 mm)
Čas výpočtu	10 s (z toho prvních 5 s pálí laser)

### 4.3. Výpočty v programu MATLAB

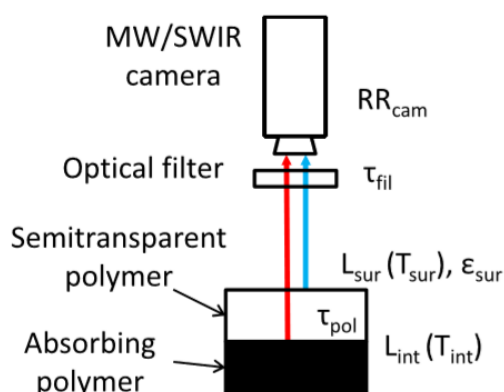
#### 4.3.1. Software MATLAB

MATLAB (z anglického matrix laboratory) je programovací platforma určená především pro inženýry a vědce vyvíjená společností MathWorks. MATLAB vyvinul v 70. letech 20. století

Cleve Moler pro zjednodušení programování ve Fortranu. Základem MATLABU je jazyk MATLAB, což je programovací jazyk založený na maticích, který umožňuje vyjádření výpočetní matematiky. Veškeré objekty v MATLABU jsou považovány za prvky pole, tj. matice. Pomocí MATLABU můžeme počítat s maticemi, vykreslovat 2D a 3D grafy, vytvářet algoritmy, provádět simulaci, analýzu a vyhodnocení dat i vytvářet aplikace včetně uživatelského rozhraní. Výkonnost MATLABU je zvyšována díky přídatnému softwaru, tzv. „toolboxům“ (knihovnam), které jsou zaměřeny na určitý obor (např. numerickou matematiku, statistiku) nebo uživatelem vytvořené programy. Mezi knihovny patří například Simulink k simulaci dynamických systémů nebo Guide k tvorbě aplikací s grafickým rozhraním. Široké využití nachází MATLAB především v aplikované matematice [33].

#### 4.3.2. Tvorba výpočtů a volba parametrů

Cílem programování v Matlabu bylo ze získaných časových průběhů teploty pomocí programu COSMOSM určit časovou závislost intenzity vyzařování z rozhraní a povrchu vzorku. Základ programu byl již vytvořen a použit v [31], ale pro potřeby této diplomové práce se musel upravit. Program původně počítal jen jednu hodnotu signálu pro jednu hodnotu teploty. Bylo nutné jej předělat pro časový průběh teploty získaný z programu COSMOSM. Dále byl vytvořen další skriptový soubor pro porovnání intenzity vyzařování s měřením pomocí kamery Hamamatsu C14041-10U.



Obr. 4.6: Schematické znázornění měřícího systému při měření MW/SWIR kamerou. Převzato z [31].

Na Obr. 4.6. je schematicky znázorněn měřící systém pomocí kamery MW/SWIR pro účely výpočtu. Vyzařování při procesu laserového svařování je zjednodušeno na vyzařování ze dvou zdrojů se dvěma teplotami, z povrchu horního polopropustného polymeru a z taveného rozhraní, což je horní povrch absorbujícího polymeru. Vyzařování z těchto povrchů putuje do MW/SWIR kamery a vytváří jeden měřený signál. Rozhraní mezi polymery je taveno během procesu svařování. Teplota tavení materiálu POM je 165 °C v [31]. Tato hodnota byla zjištěna z měření tepelného toku. V diplomové práci bude používána hodnota 162 °C, která byla zjištěna při měření závislosti tepelné kapacity na teplotě, jež je také použita v této práci (viz Obr. 4.5). Obě měření proběhly diferenciální skenovací kalorimetrií (DSC). Degradace materiálu nastává při teplotách kolem 230 °C [4]. Teplota na rozhraní v daném čase  $T_{int}$  je dána



výsledkem ze simulace v programu COSMOSM. Tepelné záření vyzařované z rozhraní je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem jako spektrální intenzita vyzařování  $L_{int}(T_{int}, \lambda)$  při absolutní teplotě rozhraní  $T_{int}$  a dané vlnové délce  $\lambda$ :

$$L_{int} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T_{int}}} - 1)}, \quad (4.1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla a  $k$  Boltzmannova konstanta. Signál měřený MW/SWIR kamerou z taveného rozhraní  $S_{int}$  je ve výpočtu dán vztahem:

$$S_{int} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{int}(T_{int}, \lambda) \cdot \varepsilon_{int} \cdot \tau_{pol}(\lambda) \cdot \tau_{fil}(\lambda) \cdot RR_{cam}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.2)$$

kde  $\varepsilon_{int}$  je spektrální emisivita absorbujícího polymeru,  $\tau_{pol}$  je spektrální propustnost polopropustného horního polymeru,  $\tau_{fil}$  je spektrální propustnost optického filtru a  $RR_{cam}$  je relativní spektrální citlivost MW/SWIR kamery. Spektrální propustnosti optických filtrů se používají pouze v případě kamery FLIR SC7650. Při měření s kamerou Hamamatsu C14041-10U se filtry nepoužívaly, takže ani do výpočtu se nezahrnují. Potřebujeme tedy znát výše zmíněné hodnoty, abychom je mohli dosadit do vzorce (4.2).

Spektrální emisivita i propustnosti byly měřeny pro výpočty v článku [31]. Spektrální propustnost horního polymeru se používala dvojího typu, přímá a difuzní. Ve výpočtu v této diplomové práci se používají obě možnosti a diskutují se jejich výhody a nevýhody, viz kapitola 5.2. Přímá spektrální propustnost horního polymeru a spektrální propustnost optických filtrů byla měřena na FTIR spektrometru. Difuzní spektrální propustnost a odrazivost horního polymeru byla měřena pomocí FTIR spektrometru a UV-VIS-NIR disperzivního spektrometru. Difuzní propustnost a odrazivost byly z naměřených dat interpolovány v oblasti vlnových délek 1,1 – 1,5  $\mu\text{m}$ . Pro emisivitu rozhraní  $\varepsilon_{int}$  předpokládáme, že se rovná 1, protože v absorbujícím polymeru jsou příměsi uhlíku, takže má velmi vysokou emisivitu. Spektrální emisivita na povrchu  $\varepsilon_{sur}$  byla vypočtena z difuzní propustnosti  $\tau_H$  a difuzní odrazivosti  $\rho_H$  Kirchhoffovým zákonem:

$$\varepsilon_{sur} = 1 - \tau_H - \rho_H. \quad (4.3)$$

Relativní spektrální citlivost  $RR_{cam}$  MW/SWIR kamery (FLIR SC7650 nebo Hamamatsu C14041-10U) byla získána z dat od dodavatele kamery. Grafy všech výše zmíněných veličin potřebných ve (4.2) a dále ve (4.4) jsou uvedeny v příloze B. Integrace je v Matlabu provedena numericky s krokem 10 nm a krajní hodnoty integrace jsou dány spektrální citlivostí kamery a Planckovým zákonem: pro kameru FLIR SC7650 je  $\lambda_1 = 1,35 \mu\text{m}$  a  $\lambda_2 = 6 \mu\text{m}$  a pro kameru Hamamatsu C14041-10U je  $\lambda_1 = 1,2 \mu\text{m}$  a  $\lambda_2 = 6 \mu\text{m}$ .

Velmi podobně jako při výpočtu z rozhraní se postupuje i při výpočtu tepelného záření vyzařovaného z povrchu. Spektrální intenzita vyzařování  $L_{sur}(T_{sur}, \lambda)$  je dána Planckovým vyzařovacím zákonem (4.1) pro absolutní teplotu povrchu  $T_{sur}$  získanou ze simulace v programu COSMOSM a danou vlnovou délkou  $\lambda$ . Signál měřený MW/SWIR kamerou z povrchu  $S_{sur}$  je ve výpočtu dán vztahem:

$$S_{sur} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{sur}(T_{sur}, \lambda) \cdot \varepsilon_{sur} \cdot \tau_{fil}(\lambda) \cdot RR_{cam}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (4.4)$$

Vztah (4.4) je téměř totožný se vztahem (4.3), jen není třeba započítávat spektrální propustnost horního polymeru. Celkový signál měřený MW/SWIR kamerou při svařovacím procesu  $S_{IR}$  je ve výpočtu dán vztahem:

$$S_{IR} = S_{int} + S_{sur} \quad (4.5)$$

[31].

## 5. Výsledky a diskuze

### 5.1. Časové a prostorové průběhy teploty

#### 5.1.1. Výchozí model

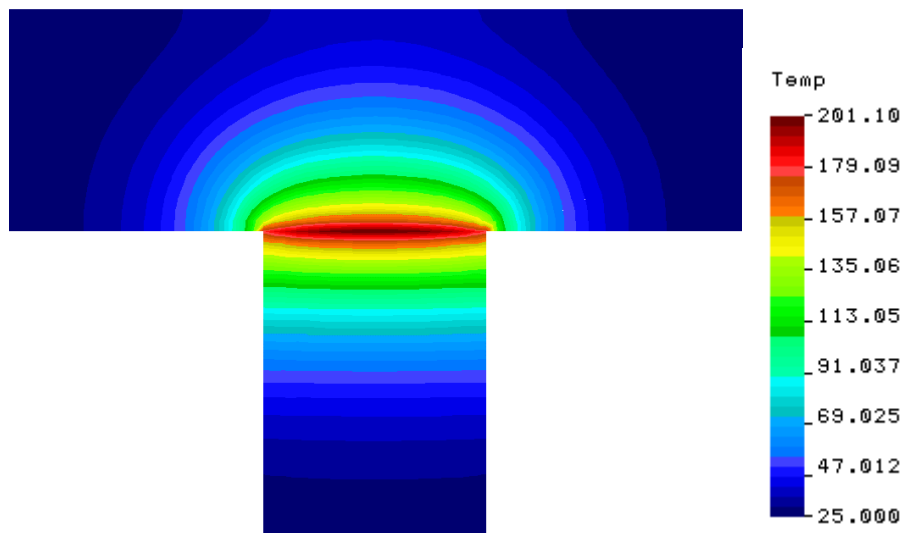
Prvním cílem modelování v programu COSMOSM bylo nalezení vhodného výchozího modelu, který by měl co nejrealističtější vstupní parametry, a výsledky se blížily hodnotám naměřených při experimentech. Geometrie modelu byla jasně stanovena geometrií vzorků používaných při experimentech. Spodní plast měl ve všech případech rozměry 25 x 2 mm, horní plast měl rozměry 25 x 2 mm nebo 25 x 1 mm. Výchozí model byl tedy vytvořen pro dvě možnosti geometrie v závislosti na tloušťce horního plastu.

Materiál plastů byl POM (polyoxymetylén), jehož hustota  $1\,410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  byla převzata z katalogového listu výrobce (PolyPLASTY, s. r. o.) [34]. Další materiálovou vlastností je tepelná vodivost, jejíž velikost byla zvolena  $0,25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což je nižší hodnota, než je uvedena v katalogovém listě výrobce ( $0,31\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Z databáze materiálových vlastností závislých na teplotě MBDB [35] víme, že tepelná vodivost s teplotou klesá přibližně o 10 % na rozsahu teplot 100 °C. Počáteční teplota v modelech je 25 °C a maximální teploty se pohybují mírně nad 200 °C, takže je možné uvažovat nižší tepelnou vodivost, než je uvedena v katalogovém listu. Vliv tepelné vodivosti na časový průběh teploty bude blíže rozebrán v kapitole 5.1.3. Poslední zadávanou materiálovou vlastností je tepelná kapacita, o které víme, že výrazně závisí na teplotě (roste o 50-80% na 100°C) [35]. Zároveň se v ní výrazně projevuje fázová přeměna materiálu, při které se tepelná kapacita několikanásobně zvýší. Diferenciální skenovací kalorimetrií byla změřena závislost tepelné kapacity na teplotě. Znázorněna je na Obr. 4.5 a tato křivka je použita ve výchozím modelu.

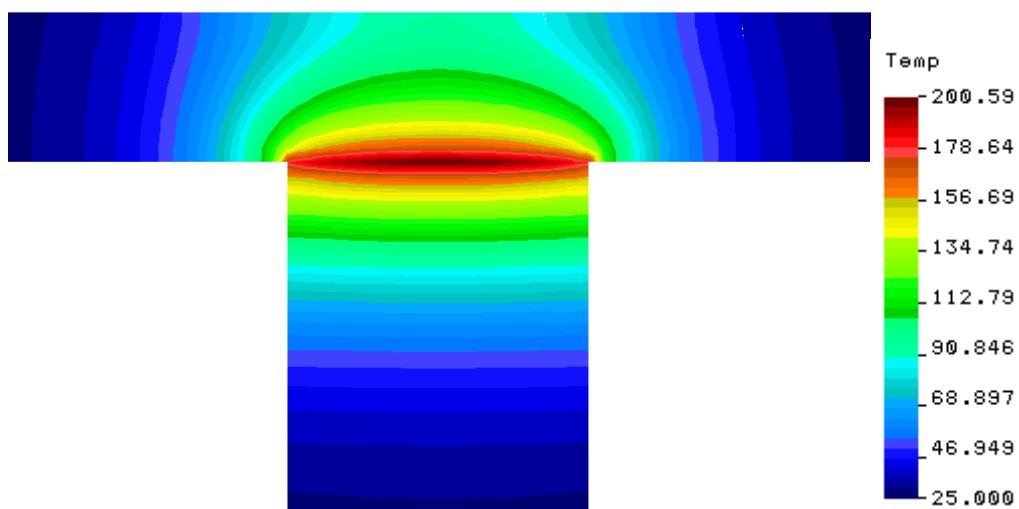
Dalším vstupním parametrem je koeficient přestupu tepla mezi materiálem vzorku a vzduchem a mezi materiálem vzorku a kovem svařovacího stolku, ve kterém je vzorek uchycen. V Obr. 4.3 je znázorněno, kam se zadává koeficient přestupu tepla do vzduchu a kam koeficient přestupu tepla do kovu, tj. v jakých částech je vzorek obklopen vzduchem a kde kovem. Hodnoty přestupu tepla přesně nevíme, musely se tedy odhadnout. Koeficient přestupu tepla do vzduchu byl zvolen  $10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a do kovu  $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Potom se výsledky simulace nejvíce blížily experimentu. Diskuze vlivu koeficientu přestupu tepla na časové průběhy teplot bude provedena v kapitole 5.1.5. Experimenty probíhaly za pokojové teploty, takže počáteční teplota vzorku byla zvolena 25 °C.

Nakonec bylo nutné zadat hodnoty výkonu do jednotlivých bodů sítě modelu. Celkový výkon na celou plochu vzorku byl dán nastaveným výkonem laseru při experimentech. Výkon pro materiál o tloušťce 1 mm byl 36 W a pro materiál o tloušťce 2 mm 63 W. Předpokládáme, že výkon z laseru je dodáván na rozhraní, protože paprsek laseru projde horním propustným plastem a na rozhraní ohřívá a taví spodní absorbující plast. Ve výchozím modelu je uvažován kontinuální, časově a prostorově konstantní ohřev na rozhraní. Stěžejní při volbě tepelného

výkonu na rozhraní je propustnost horního plastu pro dané nastavení laseru, protože ta zmenšuje výkon prošlý na rozhraní materiálů. Existují dvě varianty propustnosti, difuzní do všech směrů polokoule a přímá ve směru dopadajícího záření. Tyto propustnosti byly pro materiál POM měřeny laserem a měřákem výkonu. Pro POM o tloušťce 1 mm je přímá propustnost 7,9 % a difuzní 50,7 %. Pro POM o tloušťce 2 mm je přímá propustnost 3,8 % a difuzní 42 %. Není známo, jaká propustnost je pro tento případ experimentu a simulace správná. Pravděpodobně to bude kombinace obou druhů propustností. Pro výchozí model byla pro materiál o tloušťce 1 mm zvolena propustnost 31 % a pro materiál o tloušťce 2 mm propustnost 18 %. Pak simulace nejvíce odpovídala výsledkům z experimentů. Vliv propustnosti na časový průběh teploty je diskutován v kapitole 5.1.2. Výsledný výkon dodávaný do jednoho uzlu sítě byl pro 1 mm tlustý materiál 0,01329 W a pro 2 mm tlustý materiál 0,0135 W. Podrobný popis, jak vypočítat hodnotu výkonu v uzlu sítě, je popsán v kapitole 4.2.2. Shrnutí parametrů výchozího modelu zadávaných do softwaru COSMOSM je v Tab. 4.1.

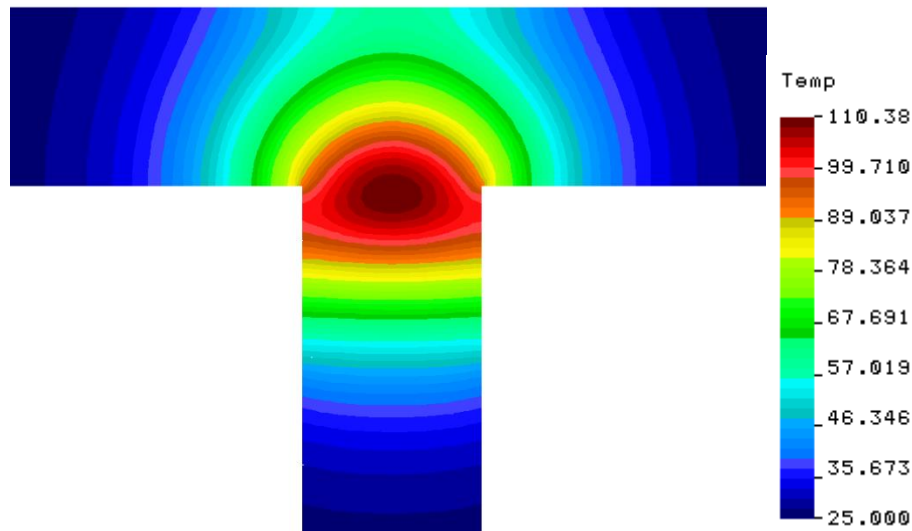


Obr. 5.1: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 2 mm v čase 5 s pro výchozí model.

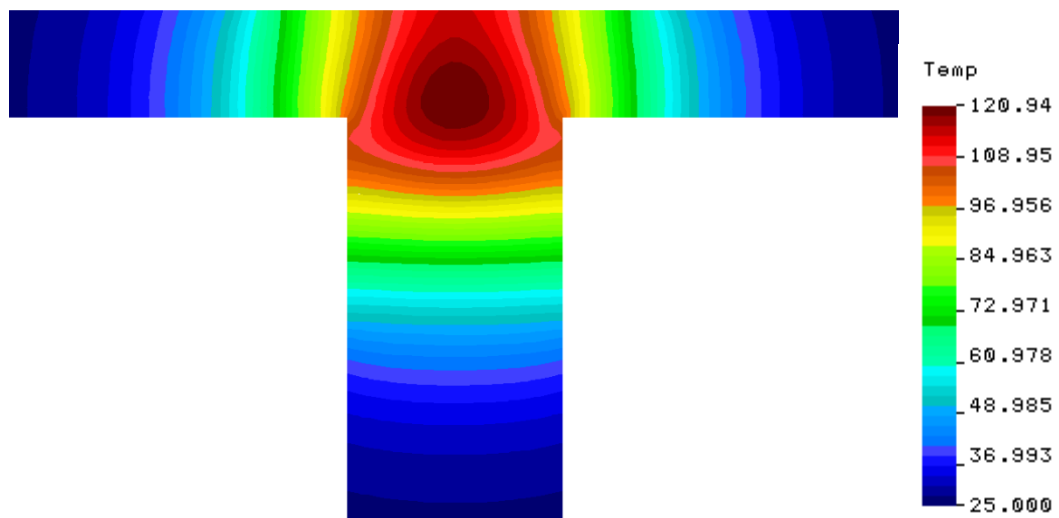


Obr. 5.2: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 1 mm v čase 5 s pro výchozí model.

Celková délka simulace je 10 s, z toho prvních 5 s je dodáván tepelný výkon na rozhraní a po zbylý čas se sleduje vývoj teploty. Na Obr. 5.1 a Obr. 5.2 je znázorněno rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 2 mm a 1 mm v čase 5 s, tj. na konci pálení laseru. Obrázky jsou přiblížené na oblast tavení, kde je gradient teploty největší. Mimo vyříznutou oblast zůstala počáteční teplota 25 °C po celou dobu simulace. Nejvyšší teplota je přirozeně na rozhraní, kde dosahuje pro obě tloušťky přibližně 200 °C. Pro tenčí materiál dosahuje teplota na povrchu v čase 5 s hodnoty 91 °C a pro tlustější materiál 37 °C. Zejména pro 1 mm tlustý materiál je dobře viditelný malý odvod tepla do okolního vzduchu.



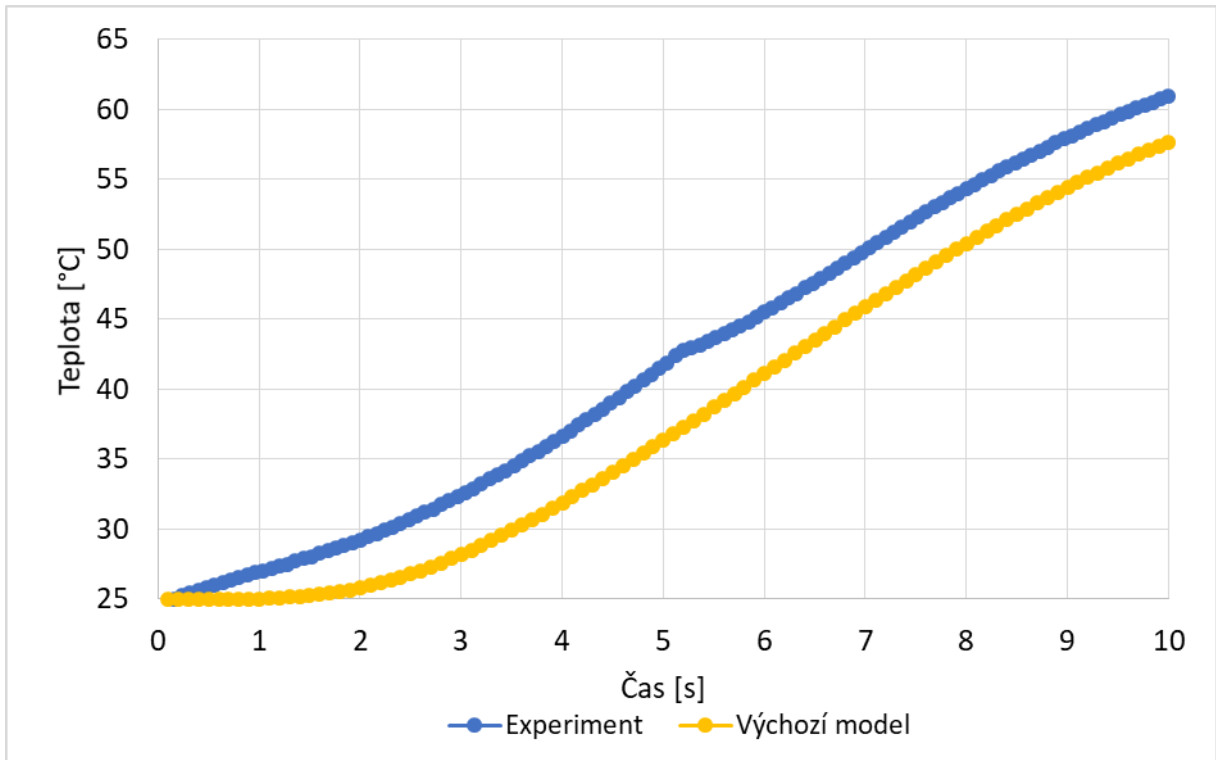
Obr. 5.3: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 2 mm v čase 10 s pro výchozí model.



Obr. 5.4: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 1 mm v čase 10 s pro výchozí model.

Na Obr. 5.3 a Obr. 5.4 je zobrazeno rozložení teploty v čase 10 s pro tloušťku horního plastu 2 mm a 1 mm. Na rozhraní už není po dobu 5 s dodáván výkon, takže se zde teplota snížila. Pro materiál o tloušťce 2 mm je maximální teplota 110 °C v oblasti rozhraní uprostřed vzorku. Směrem ke krajům vzorku se teplota snižuje z důvodu přestupu tepla do okolního materiálu a vzduchu. Pro tloušťku 1 mm je maximální teplota 120 °C v oblasti mírně

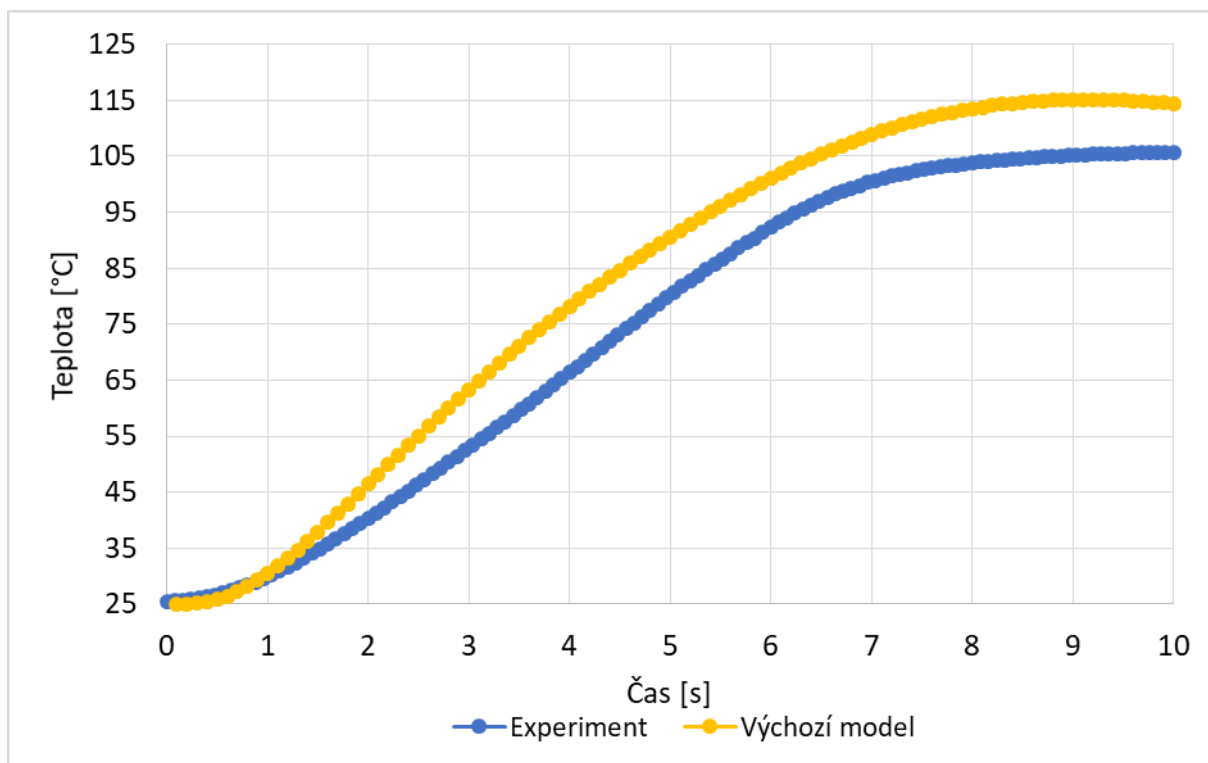
nad rozhraním, tj. maximum teploty se posouvá směrem k povrchu. Pro horní plast o tloušťce 2 mm je maximální teplota na povrchu v čase 10 s rovna 58 °C, pro horní plast o tloušťce 1 mm je 114 °C. V porovnání s hodnotami teploty v čase 5 s vidíme, že teplota na povrchu v čase 10 s stále roste i přesto, že už nedochází k ohřevu na rozhraní. To je dáno tepelnou vodivostí v materiálu, která distribuuje teplo uvnitř vzorku a část tepla je potom odváděna do okolí vzorku.



Obr. 5.5: Časový průběh teploty na povrchu vzorku pro horní plast o tloušťce 2 mm pro výchozí model a experiment.

Časové průběhy teploty na povrchu vzorku pro obě tloušťky materiálu jsou znázorněny na Obr. 5.5 a Obr. 5.6. V obou grafech je znázorněn průběh teploty získaný z experimentu a ze simulace. Pro horní plast o tloušťce 2 mm (Obr. 5.5) je průběh teploty ze simulace po celou dobu výpočtu nižší než průběh teploty získaný z experimentu. Experiment i simulace mají v čase 0 s na povrchu teplotu 25 °C, která se po celou měřenou dobu zvyšuje až na 61 °C pro experiment a 58 °C pro simulaci v čase 10 s. Rozdíl teplot mezi experimentem a simulací je v různých časech maximálně 5 °C. Tento rozdíl může být dán tím, že při zpracovávání výsledků z experimentu se uvažovala emisivita plastu 1, což by znamenalo, že plast pohlcuje veškeré záření. Ve skutečnosti je emisivita materiálu POM o něco nižší (asi 0,93), takže materiál nepohltil tolik záření, a tím pádem se ani tolik neohřál. Rovněž tepelná vodivost, kterou zde uvažujeme konstantní i přesto, že závisí na teplotě, má vliv na hodnoty teploty (viz kapitola 5.1.3). V prvních dvou sekundách teplota experimentu roste na rozdíl od simulace, kde zůstává téměř konstantní. To může být dáno tím, že termovizní kamera nezachytává signál jen z povrchu, ale i zevnitř vzorku, proto již v počátku pálání detekuje na povrchu zvyšující se teplotu. V simulaci se zdroj tepla nastavuje na rozhraní plastů, ale horní plast ve skutečnosti

absorbuje část dodávaného výkonu, a proto se zahřívá i od laserového paprsku, což v simulaci není zahrnuto. V čase 5,3 s je v experimentu viditelné mírné zpomalení růstu teploty v čase, kdy přestal pálit laser. Toto zpomalení není v simulaci vidět, což může být opět dáno tím, že kamera zaznamenává i nějaký signál zevnitř vzorku a ne jen z povrchu, na rozdíl od simulace, kde jsou teploty vypočteny přesně na povrchu. Nebo to může být způsobeno částečným ohřevem propustného plastu či nečistot na povrchu přímo laserem.

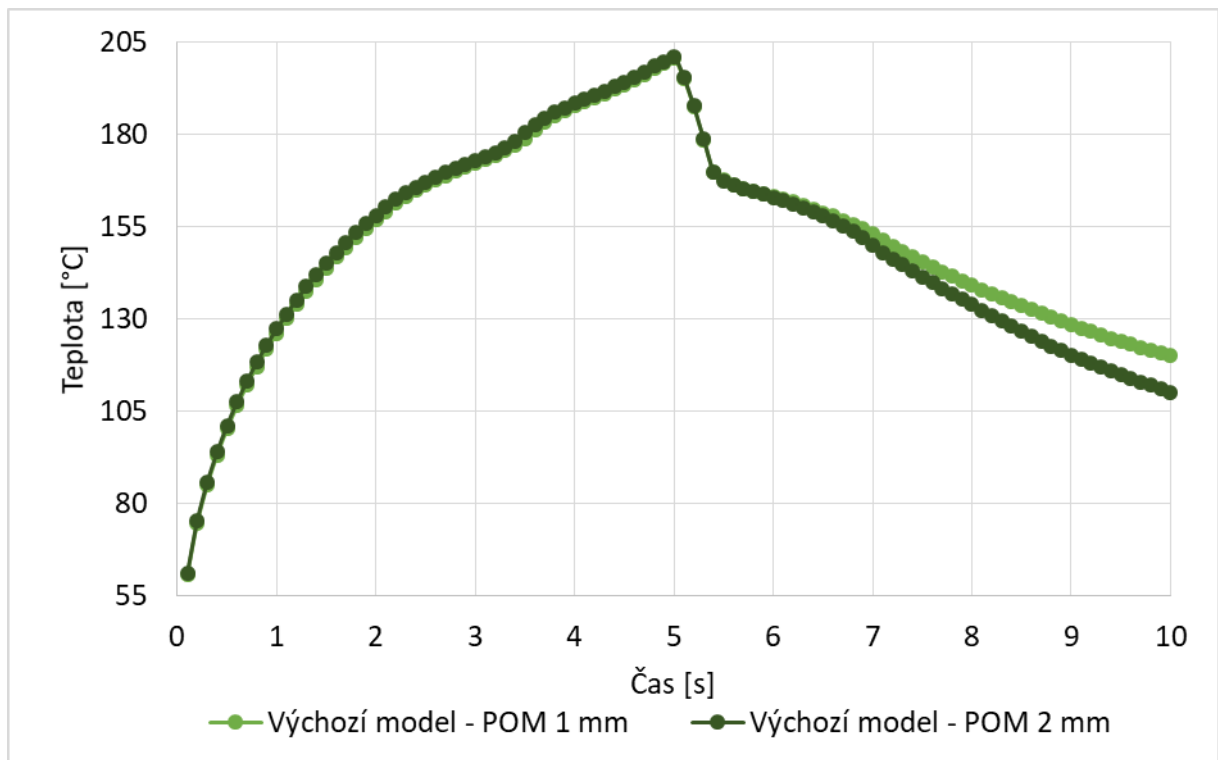


Obr. 5.6: Časový průběh teploty na povrchu vzorku pro horní plast o tloušťce 1 mm pro výchozí model a experiment.

Na Obr. 5.6 je znázorněn časový průběh teploty na povrchu vzorku pro horní plast o tloušťce 1 mm. V tomto případě je teplota simulace po celou dobu výpočtu vyšší než hodnoty z experimentu kromě první sekundy pálení laseru, kdy stejně jako u horního plastu o tloušťce 2 mm termovize detekuje kromě signálu z povrchu i nějaký signál zevnitř plastu (či ohřev horního plastu laserem), ale simulace počítá jen teploty přímo na povrchu. Simulace i experiment mají v čase 0 s na povrchu vzorku teplotu 25 °C. V čase 5 s dosahuje povrchová teplota ze simulace hodnoty 91 °C a teplota z experimentu 80 °C. Na konci sledování vývoje teploty, tj. v čase 10 s, je teplota na povrchu 114 °C pro simulaci a 106 °C pro experiment. Teploty na povrchu jsou pro plast o tloušťce 1 mm vyšší než pro plast o tloušťce 2 mm, protože teplo se ve slabším vzorku šíří rychleji než v tlustějším, takže se rychleji ohřeje povrch, kde teplotu zjišťujeme.

Rozdíl teplot na povrchu mezi experimentem a výchozím modelem pro plast o tloušťce 1 mm dosahuje v různých časech maximálně 10 °C. To může být dáno tím, že uvažujeme konstantní tepelnou vodivost i přesto, že závisí na teplotě. Spíše než stejné hodnoty teplot

na povrchu pro simulaci a experiment, nás zajímal tvar křivek v průběhu celých 10 s. To, že křivky mají podobný tvar s experimentem v případě 1 mm i 2 mm bylo bráno za důležitější, než že se hodnoty teploty přesně neshodují. Dále byl důležitý průběh teploty na rozhraní, který bude diskutován v dalším odstavci a který pro tyto vstupní parametry dává smysluplné hodnoty. Najít takovou konfiguraci vstupních parametrů (např. tepelná vodivost, výkon, propustnost materiálu), aby se hodnoty teploty rovnaly a křivka měla stejný tvar, se nepovedlo, protože jde pouze o simulaci reálného průběhu experimentu, takže nezahrnuje všechny aspekty, které ovlivňují výsledky měření při experimentu. Například model nezahrnuje pohyb materiálu po roztavení (vytlačování taveniny do stran), rozptyl laseru v horním plastu a pohlcení laserového záření ve spodním plastu po určité hloubce.



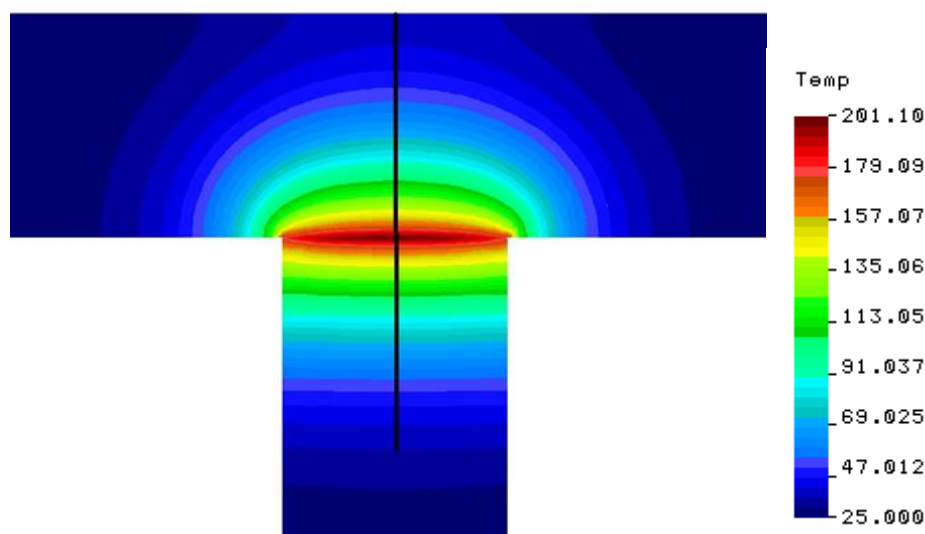
Obr. 5.7: Časový průběh teploty na rozhraní pro výchozí model a horní plast o tloušťce 1 mm i 2 mm.

Časový průběh teploty na rozhraní je pro obě tloušťky horního plastu znázorněn na Obr. 5.7. Tyto průběhy nás zajímají více než na povrchu, protože termovizní kamera měří teplotu jen povrchu plastu, takže zde nemáme experimentální data. Vidíme, že průběh teploty je pro oba plasty skoro stejný. Je to dáno tím, že část výkonu z laseru, která doputuje na rozhraní, je pro oba plasty téměř shodná. Simulační křivky na povrchu vzorku totiž nejlépe odpovídaly experimentu pro stejný tepelný výkon na rozhraní. Hodnoty dodávaného výkonu byly dané dle experimentu (pro tlustější vzorek 63 W a pro tenčí 36 W). Poté jsem se snažila najít takovou propustnost plastu, aby křivky na povrchu svým tvarem a hodnotami odpovídaly experimentu. Pro tlustější vzorek byla jako ideální propustnost zvolena hodnota 18 % a pro tenčí hodnota 31 %. Shodou okolností pro tyto hodnoty výkonů a propustností vychází stejný tepelný výkon na rozhraní pro obě tloušťky, což se jeví jako logický závěr volby těchto



parametrů, protože není důvod volit různé hodnoty tepelných výkonů na rozhraní pro různě tlustý horní plast.

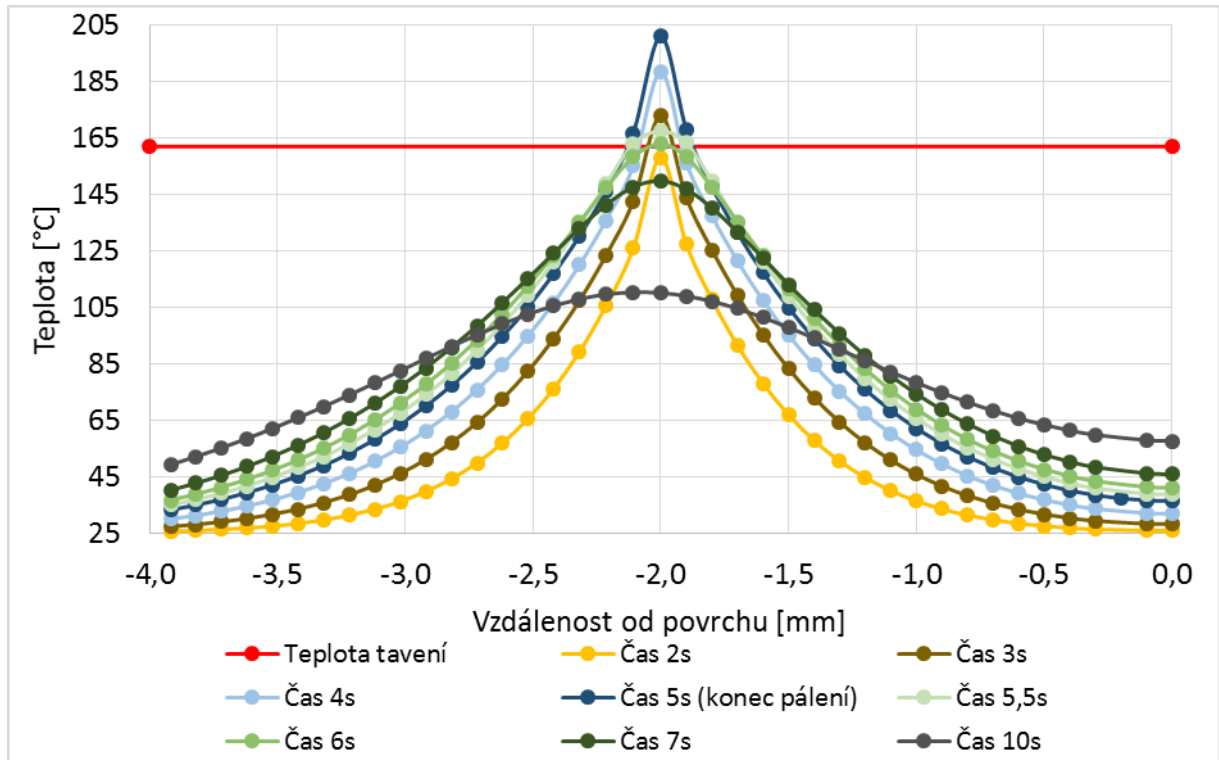
V čase 0,1 s je teplota na rozhraní 60 °C. Teplota tavení 162 °C je na rozhraní dosažena v čase 2,2 s. Čas tavení bylo možné porovnat s experimentem, protože máme k dispozici časový průběh posuvu spodního svařovacího stolku pro několik měření, ze kterého lze odečíst čas tavení (stolek se výrazně posunul nahoru). Pro horní plast o tloušťce 2 mm nastane posuv stolu (tj. tavení spodního plastu) pro výkon 72 W v čase 1,9 s, pro výkon 54 W v čase 3,25 s a pro výkon 90 W v čase 1,2 s. Hodnoty posuvu v experimentu se pro dané výkony shodují s hodnotami času tavení v simulaci. V čase přibližně 3,5 s je viditelné zpomalení a pak zrychlení růstu teploty. To je dáno fázovou přeměnou, která nastává při teplotě tavení. Fázová přeměna zpomaluje růst teploty (čas 2 – 3,5 s), protože je při ní spotřebováváno velké množství tepla. Po dokončení fázové přeměny začne teplota opět růst strměji. Nejvyšší teplota 201 °C je na rozhraní na konci pálení laseru a pak již teplota klesá. V čase 5,5 – 7 s je ochlazování zpomalené fázovou přeměnou, tentokrát z taveniny na pevnou látku a poté je chlazení opět rychlejší. V posledních 3,5 s simulace jsou teploty pro horní plast o tloušťce 1 mm mírně vyšší než pro 2 mm tlustý plast. To je dáno tím, že odvod tepla do materiálu v tlustějším plastu má větší vliv na odvod tepla z rozhraní než přestup tepla do okolí v tenčím plastu. V 10 s simulace je teplota na rozhraní pro vzorek o tloušťce 1 mm rovna 120 °C a pro tloušťku 2 mm vychází 110 °C.



Obr. 5.8: Zobrazení úsečky, po které se sleduje průběh teploty. Zde vykreslení rozložení teploty v 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm.

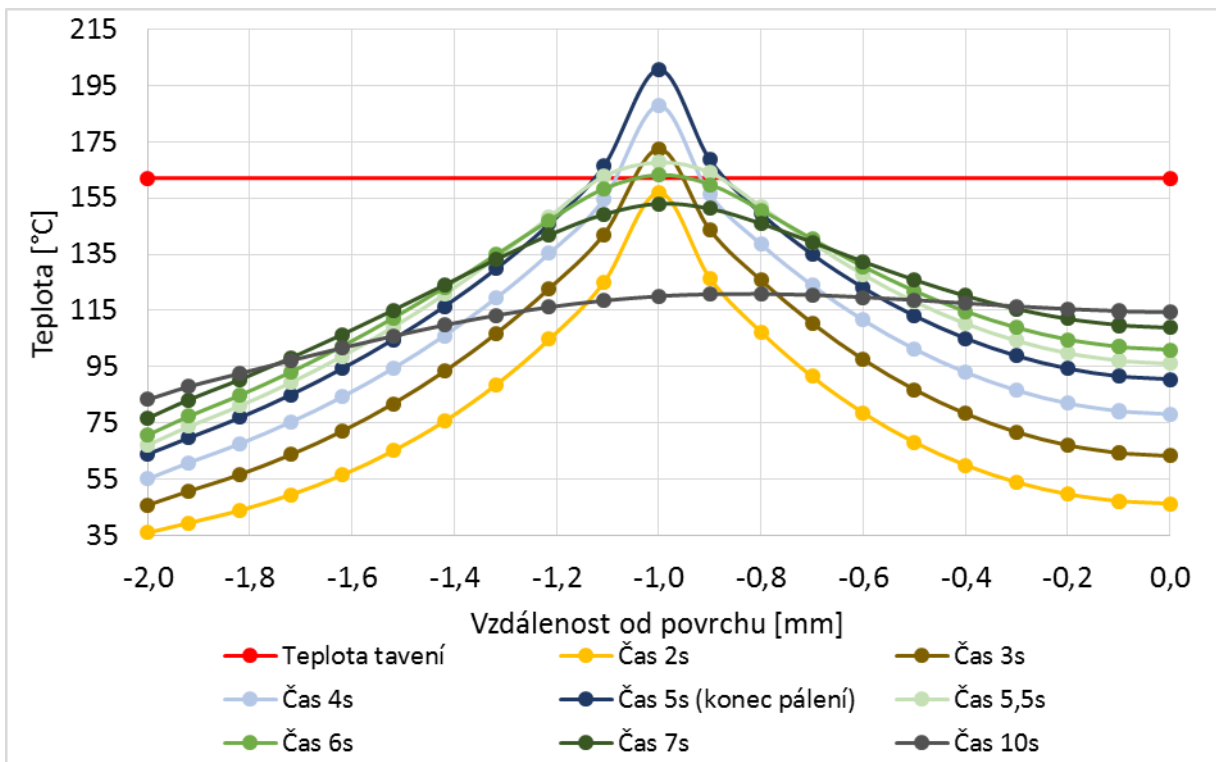
Na Obr. 5.8 je znázorněna úsečka, po které byl sledován průběh teploty v různých časech. Tyto průběhy jsou znázorněny na Obr. 5.9 pro tloušťku horního plastu 2 mm a na Obr. 5.10 pro tloušťku 1 mm. V grafech jsou vyneseny závislosti teploty na pozici ve vzorku pro různé časy a červeně je zvýrazněna teplota tavení 162 °C. Na ose x je vynesena vzdálenost od povrchu, tj. 0 mm značí povrch a pozice - 2 mm představuje rozhraní v případě tloušťky horního plastu 2 mm, resp. pozice - 1 mm představuje rozhraní v případě tloušťky horního

plastu 1 mm. Po celou dobu simulace je nejvyšší teplota na rozhraní. Na rozhraní a v jeho okolí vzniká tavenina (část křivek nad červenou úsečkou) v čase cca 2,2 s, která se v čase 6 s opět mění na pevnou fázi. Z grafu lze vyčíst, že tavenina dosahuje přibližně 0,1 mm pod a nad rozhraní pro obě tloušťky plastů.



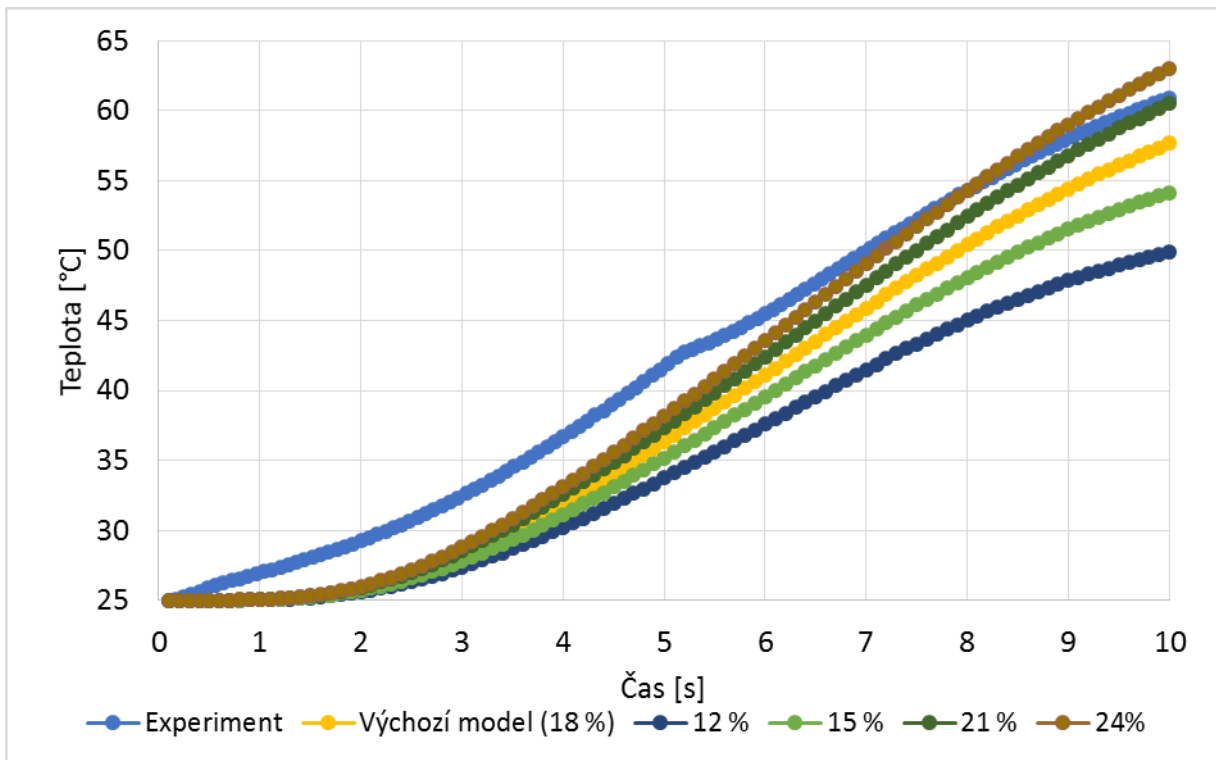
Obr. 5.9: Průběh teploty po úsečce svisle středem vzorku (viz Obr. 5.8) v různých časech pro horní plast o tloušťce 2 mm. Červeně je znázorněna teplota tavení (162°C).

Po vypnutí pálení laseru se rozdíl teploty mezi rozhraním a okolím postupně zmenšuje vlivem tepelné vodivosti materiálu. Pro plast o tloušťce 1 mm je v čase 10 s teplota od povrchu k rozhraní téměř konstantní a směrem do spodního plastu mírně klesá. Z grafů je také vidět, že teploty směrem od rozhraní k povrchu jsou o něco vyšší, než teploty směrem od rozhraní do spodního plastu. Zdá se tedy, že odvod tepla z horního plastu probíhá pomaleji než ve spodním plastu, což je pravděpodobně dáno geometrií svařovaných částí a pozicí svaru.



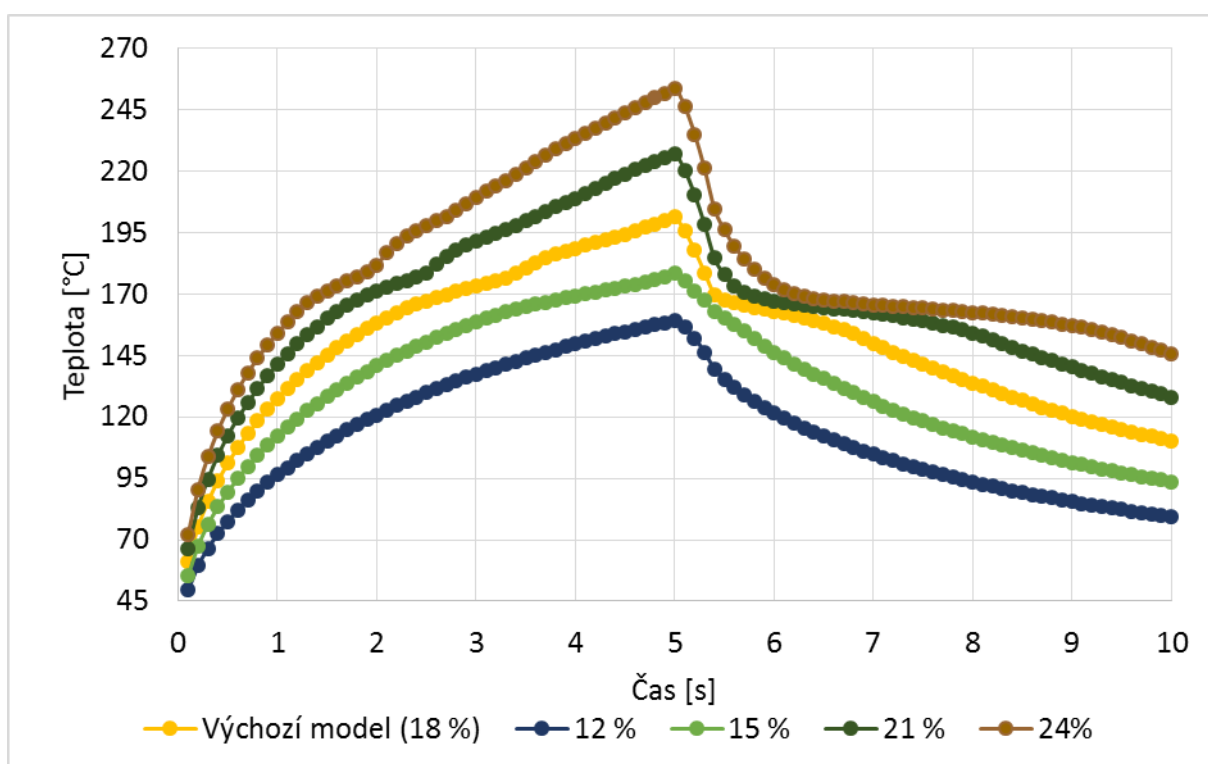
Obr. 5.10: Průběh teploty po úsečce svisle středem vzorku (viz Obr. 5.8) v různých časech pro horní plast o tloušťce 1 mm. Červeně je znázorněna teplota tavení (162°C).

### 5.1.2. Vliv propustnosti horního plastu na časový průběh teploty



Obr. 5.11: Časový průběh teploty na povrchu pro různá procenta propustnosti horního plastu a jeho tloušťku 2 mm. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.

Difuzní a přímá propustnost byly pro obě tloušťky materiálu POM měřeny laserem a měřákem výkonu. Jaký typ propustnosti se má používat pro laserový svazek při svařování plastů, není zřejmé. Jedním z cílů této práce bylo najít takovou hodnotu propustnosti, aby se výsledky simulace co nejvíce podobaly výsledkům z experimentů. Proto bylo nutné prozkoumat vliv propustnosti horního plastu na časový průběh teploty na povrchu i rozhraní. Dále budou popsány jen výsledky pro horní plast o tloušťce 2 mm, protože trendy v propustnosti se pro obě tloušťky horního plastu shodují. Samotné hodnoty propustnosti jsou ale pro různé tloušťky různé, protože se zvětšující se tloušťkou horního plastu se snižuje jeho propustnost. Grafy sledující vliv propustnosti pro 1 mm tlustý horní plast jsou uvedeny v příloze C (Obr. C.1 a Obr. C.2). Všechny ostatní vstupní parametry (např. tepelná vodivost, přestup tepla, tepelná kapacita) jsou v této kapitole stejné jako ve výchozím modelu.



Obr. 5.12: Časový průběh teploty na rozhraní pro různá procenta propustnosti horního plastu a jeho tloušťku 2 mm.

Časový průběh teploty na povrchu pro různá procenta propustnosti horního polymeru jsou pro tloušťku 2 mm znázorněny na Obr. 5.11. Pro porovnání jsou zde uvedeny i křivky z experimentu a výchozího modelu. Hodnoty propustnosti jsou voleny od 12 % do 24 %, tj. v rozmezí, kde je možné porovnávat teploty na povrchu s experimentem. Pro menší/větší hodnoty propustnosti se teploty už výrazně lišily od experimentu. Vidíme, že na počátku simulace (v prvních dvou sekundách) nemá propustnost téměř vliv na teplotu na povrchu, protože teplo z rozhraní zatím nedošlo na povrch vzorku. Poté už se rozdíly začínají objevovat a postupně se zvětšují. S volbou větší hodnoty propustnosti se teploty v čase zvyšují, protože

větší propustnost způsobuje větší hodnotu výkonu na rozhraní, takže se vzorek ohřívá více. Největší rozdíly v teplotě pro různé propustnosti jsou na konci sledování procesu v čase 10 s. Pro volbu propustnosti menší než zvolených 18 % se hodnoty teplot oddalovaly od experimentu. Pro vyšší propustnost se hodnoty teplot v čase od 3 s přibližovaly experimentu, ale tvar křivek se více lišil, což nebylo žádoucí.

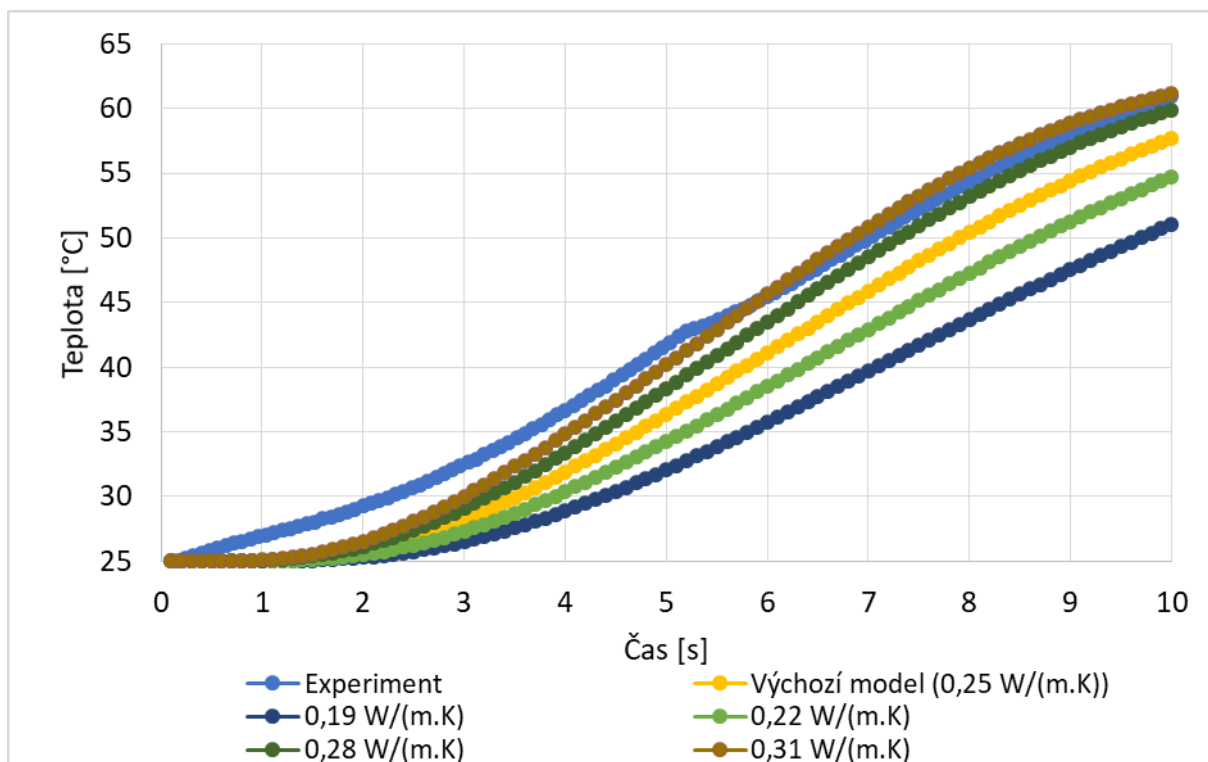
Časový průběh teploty na rozhraní pro horní polymer o tloušťce 2 mm pro různé hodnoty propustnosti je znázorněn na Obr. 5.12. V grafu je pro porovnání znázorněn časový průběh teploty pro výchozí model. Pokud zvyšujeme procento propustnosti, pak je teplota na rozhraní po celou dobu simulace vyšší než pro nižší procenta propustnosti, protože na rozhraní dodáváme větší výkon. Pokud zvolíme příliš malou propustnost, teplota na rozhraní nedosáhne teploty tavení, takže by vůbec nedošlo k vytvoření svaru, což nesouhlasí s experimentem. Například pro propustnost 12 % je teplota na rozhraní v čase 5 s 159 °C, takže k tavení materiálu a tvorbě svaru vůbec nedojde. Pokud naopak zvolíme příliš vysokou propustnost, pak i teploty na rozhraní budou dosahovat vysokých hodnot a k tavení dojde příliš brzo. Například pro propustnost 24 % je teplota tavení 162 °C dosažena již v čase 1,2 s. Z měření posuvu svařovacího stolku víme, že teplota tavení by pro dané parametry měla být dosažena až o cca 1 s později v čase 2,2 s.

### 5.1.3. Vliv tepelné vodivosti na časový průběh teploty

Další materiálovou vlastností, kterou je třeba prodiskutovat z hlediska časových průběhů teploty, je tepelná vodivost materiálu POM. V katalogovém listu výrobce materiálu POM (PolyPLASTY, s. r. o.) [34] je uvedena hodnota tepelné vodivosti  $0,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . V katalogovém listu není uvedeno, pro jakou teplotu je tato hodnota měřena, ale pravděpodobně při teplotě blízké pokojové teplotě. Z databáze MBDB [35] víme, že tepelná vodivost při zvýšení teploty materiálu o 100 °C klesne přibližně o 10 %. V této práci používáme pouze konstantní hodnotu, protože šlo o první simulace tohoto problému a závislost na teplotě není tak markantní, jako například u měrné tepelné kapacity. Na konci této kapitoly je krátký odstavec o závislosti tepelné vodivosti na teplotě. Dále budou diskutovány časové průběhy teploty pro různé tepelné vodivosti pouze pro horní plast o tloušťce 2 mm, protože trendy jsou velmi podobné s trendy pro horní plast o tloušťce 1 mm. Tyto grafy jsou opět uvedeny v příloze C (Obr. C.3 a Obr. C.4).

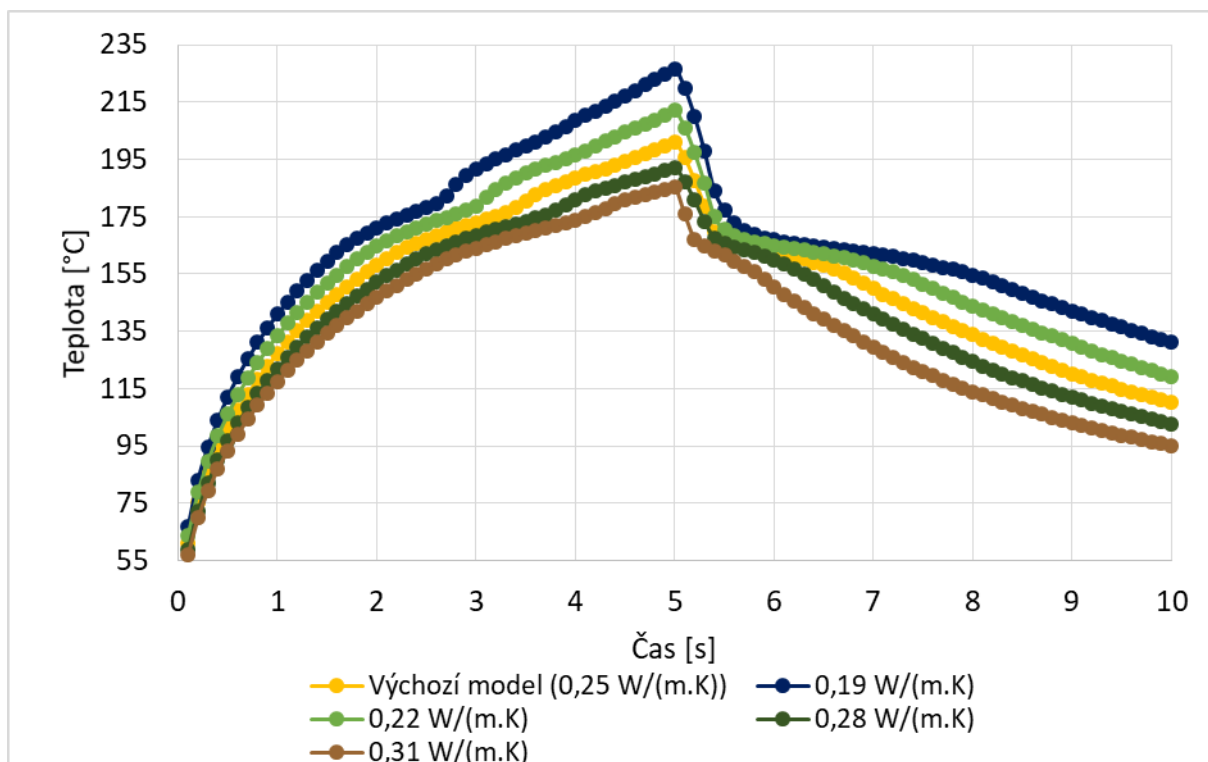
Na Obr. 5.13 je znázorněn časový průběh teploty na povrchu pro různé hodnoty tepelné vodivosti a horní polymer o tloušťce 2 mm. V grafu je pro porovnání znázorněna závislost získaná z experimentu a závislost pro výchozí model. Tepelná vodivost stejně jako propustnost horního plastu nemá v počátku simulace vliv, protože teplo z rozhraní ještě nedoputovalo na povrch, takže je tam počáteční teplota. Se zvyšující se tepelnou vodivostí ale teplota na povrchu začne stoupat dříve, protože šíření tepla probíhá v materiálu rychleji. Potom i teplota na povrchu bude rychleji růst a dosáhne po celou dobu simulace vyšších hodnot než pro menší hodnotu tepelné vodivosti. Naopak pro menší tepelnou vodivost roste teplota na povrchu pomaleji a hodnoty teploty jsou nižší. Například v čase 10 s je pro tepelnou

vodivost  $0,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  teplota na povrchu  $61 \text{ }^\circ\text{C}$  a pro tepelnou vodivost  $0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  je  $51 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vyšší hodnoty tepelné vodivosti než  $0,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  nejsou zahrnuty do diskuze, protože víme, že se zvyšující se teplotou by měla tepelná vodivost klesat.



Obr. 5.13: Časový průběh teploty na povrchu pro tloušťku horního plastu 2 mm a různé hodnoty tepelné vodivosti. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.

Na Obr. 5.14 je vykreslen časový průběh teploty na rozhraní pro různé hodnoty tepelné vodivosti a tloušťku horního polymeru 2 mm. Čím menší hodnotu tepelné vodivosti zvolíme, tím jsou na rozhraní vyšší teploty, protože se teplo šíří materiálem pomaleji a déle setrvává v místě ohřevu. Se zvyšující se hodnotou tepelné vodivosti se teplo šíří vzorkem rychleji, takže na rozhraní jsou nižší teploty, ale na povrchu naopak vyšší. S tím souvisí potřeba dosažení teploty tavení na rozhraní v čas získaný z experimentu. Pro tepelnou vodivost  $0,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  nastává tavení v čase 2,9 s a na konci pálení je na rozhraní teplota  $186 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kdybychom tepelnou vodivost zvyšovali, pak dojdeme k hodnotě, kdy už k tavení na rozhraní nedojde, a plasty by se k sobě nesvařily. Pokud zvolíme tepelnou vodivost  $0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , tavení materiálu nastane v čase 1,6 s a teplota na rozhraní v 5 s je  $227 \text{ }^\circ\text{C}$ . V grafu je dobře viditelný časový posuv fázové přeměny se změnou tepelné vodivosti, který se projevuje „vlnkou“ v časech 2,5 – 4,5 s při tavení materiálu a v časech 5,5 – 7,5 s při návratu do pevného stavu. Tepelná vodivost  $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  byla zvolena proto, že tvar křivky teploty na povrchu kopíruje tvar křivky z experimentu a teplota tavení nastává v čase, který odpovídá posuvu svařovacího stolku v experimentu.



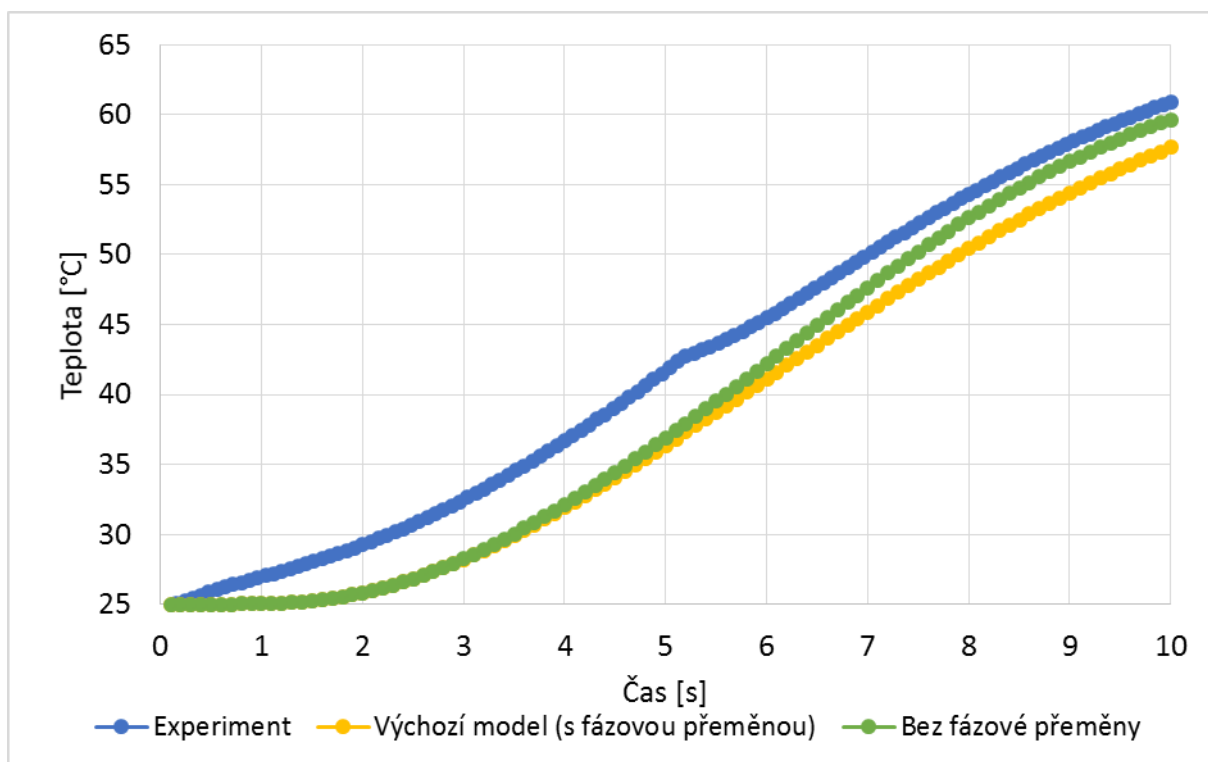
Obr. 5.14: Časový průběh teploty na rozhraní pro tloušťku horního plastu 2 mm a různé hodnoty tepelné vodivosti.

Nakonec byla provedena simulace, kde při 25 °C byla zadána tepelná vodivost  $0,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a pro teplotu 210 °C tepelná vodivost  $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Mezi těmito hodnotami byla tepelná vodivost určena lineární interpolací. Jelikož máme tepelně závislou úlohu, je vhodné v simulaci uvažovat teplotně proměnnou tepelnou vodivost. Pro horní plast o tloušťce 2 mm se během pálení laseru hodnoty více přiblížily experimentu v porovnání s výchozím modelem a po vypnutí laseru křivky experimentu a modelu s tepelnou vodivostí závislou na teplotě téměř splývají. Pro horní plast o tloušťce 1 mm nejsou výsledky tak jednoznačné. Během pálení laseru má křivka pro tepelnou vodivost závislou na teplotě ještě o něco větší teploty než výchozí model a v druhé části simulace již klesá teplota, což u experimentu nenastává. Zde se tedy jeví vhodnější použít tepelnou vodivost nezávislou na teplotě nebo zvolit jinou kombinaci parametrů. V dalších pracích by tedy bylo vhodné použít tepelnou vodivost závislou na teplotě pro horní plast o tloušťce 2 mm, pro 1 mm tlustý horní polymer nejsou výsledky jednoznačné.

#### 5.1.4. Vliv fázové přeměny a tepelné kapacity na časový průběh teploty

Další materiálovou vlastností, jejíž vliv na modelování svařování bylo třeba zjistit, je tepelná kapacita a s ní spojená fázová přeměna. Tato materiálová vlastnost je velmi závislá na teplotě, a proto byla závislost tepelné kapacity na teplotě pro materiál POM změřena diferenciální skenovací kalorimetrií a je znázorněna na Obr. 4.5. V grafu tepelné kapacity je dobře viditelná fázová přeměna. Při teplotách kolem teploty tavení je v grafu výrazný nárůst

a následný pokles tepelné kapacity. Na fázovou přeměnu je nutno dodat velké množství energie, které se projeví právě výrazným zvýšením tepelné kapacity.

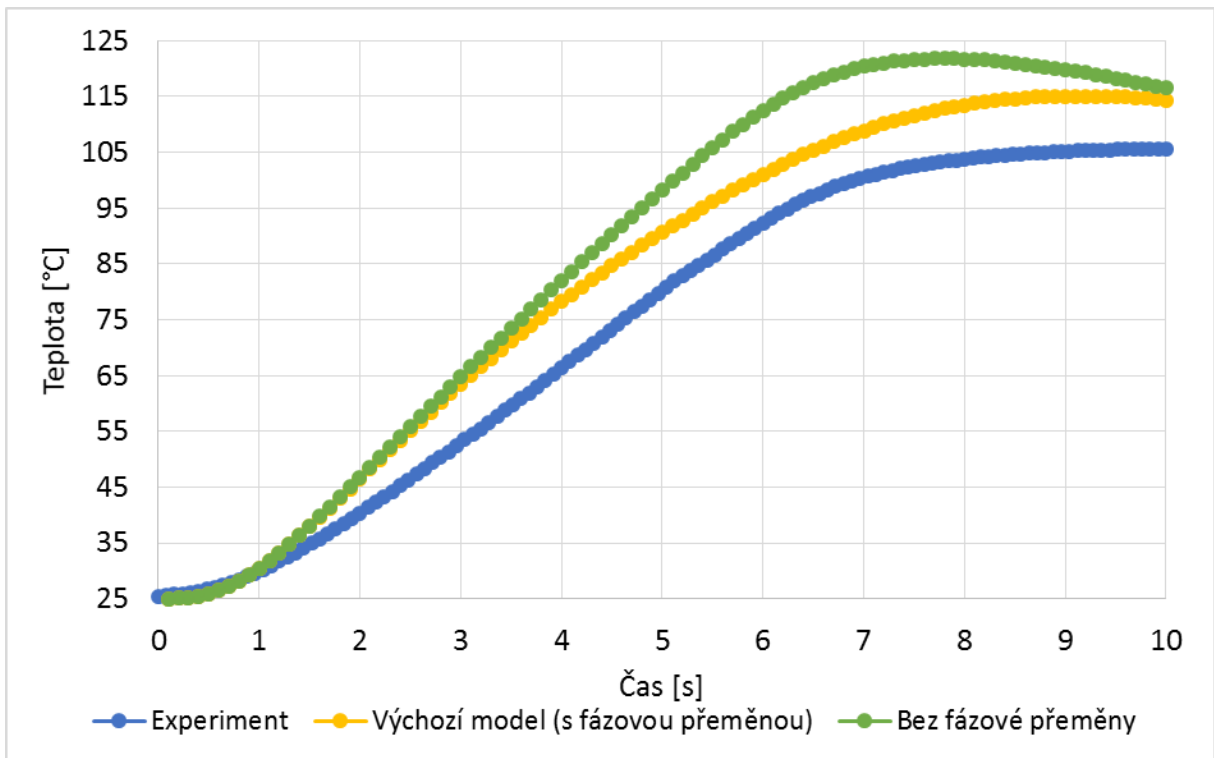


Obr. 5.15: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 2 mm s uvažováním fázové přeměny a bez uvažování fázové přeměny. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.

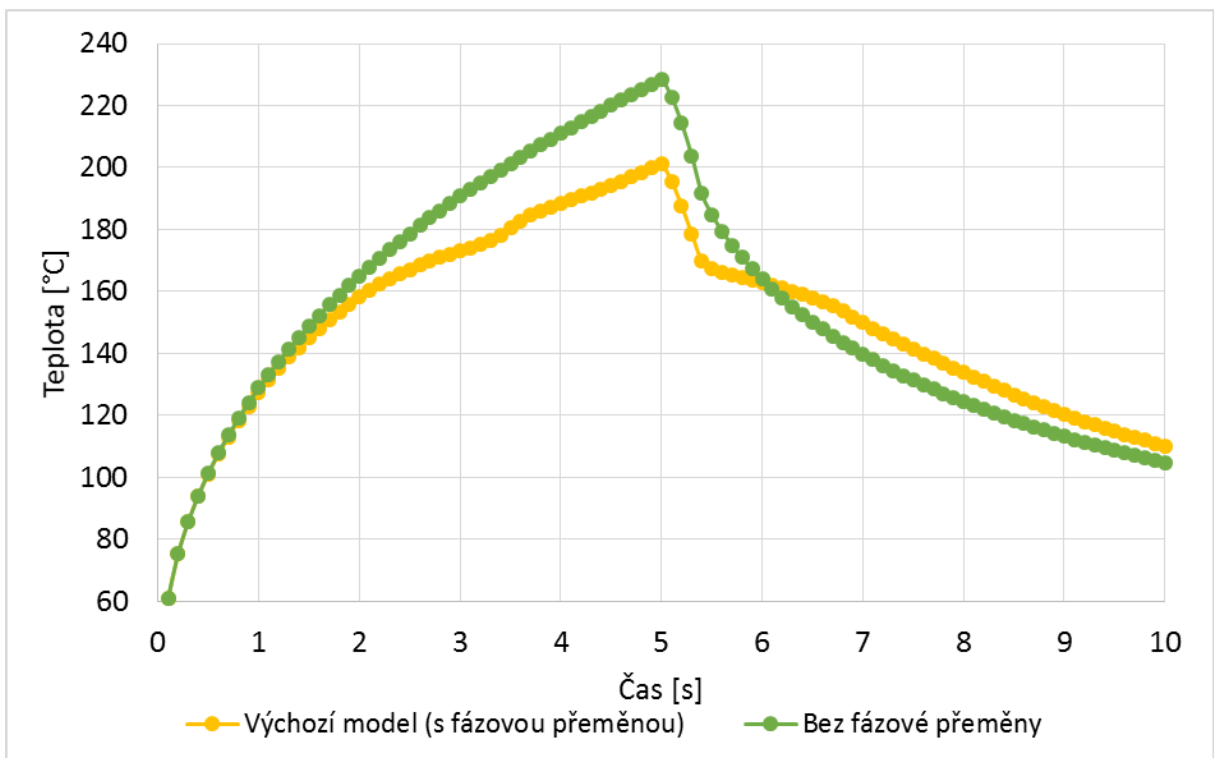
Pokud bychom chtěli model zjednodušit, například bychom neměli k dispozici závislost tepelné kapacity na teplotě, pak lze neuvažovat fázovou přeměnu. Jaký by to mělo vliv na teploty na povrchu vzorku, je znázorněno pro 2 mm tlustý horní plast na Obr. 5.15 a pro horní plast o tloušťce 1 mm na Obr. 5.16. Na obrázcích jsou vyneseny časové průběhy teploty na povrchu pro experiment, výchozí model a případ bez fázové přeměny. V prvních několika sekundách se křivky výchozího modelu a modelu bez fázové přeměny neliší ani pro jednu tloušťku plastu, protože fázová přeměna ještě nenastala a neprojevila se na povrchu. Pro tloušťku horního materiálu 2 mm jsou křivky shodné po delší dobu, protože se povrch ohřívá pomaleji než pro tenčí vzorek. V čase cca 2,5 s pro tloušťku 1 mm a 4 s pro tloušťku 2 mm se teplota modelu bez fázové přeměny v obou případech zvyšuje rychleji než s fázovou přeměnou, protože teplo není spotřebováváno na fázovou přeměnu, teplota na rozhraní se výrazně zvýší a teplo je více rozváděno po materiálu, což se projeví vyšší teplotou na povrchu. Rozdíl teplot se více projevuje u horního plastu o tloušťce 1 mm zejména v časech 6 – 8 s, kdy je rozdíl v povrchové teplotě mezi modelem s fázovou přeměnou a bez fázové přeměny až 11 °C. Na Obr. 5.16 také vidíme, že pro případ bez fázové přeměny dosáhne teplota na povrchu svého maxima a na konci simulace již pro daný výkon klesá, což u případu s fázovou přeměnou do 10 s simulace nenastalo. To může být dáno tím, že chladnutí modelu



s fázovou přeměnou je pomalejší, protože je zpomaleno fázovou přeměnou zpět na pevnou látku.

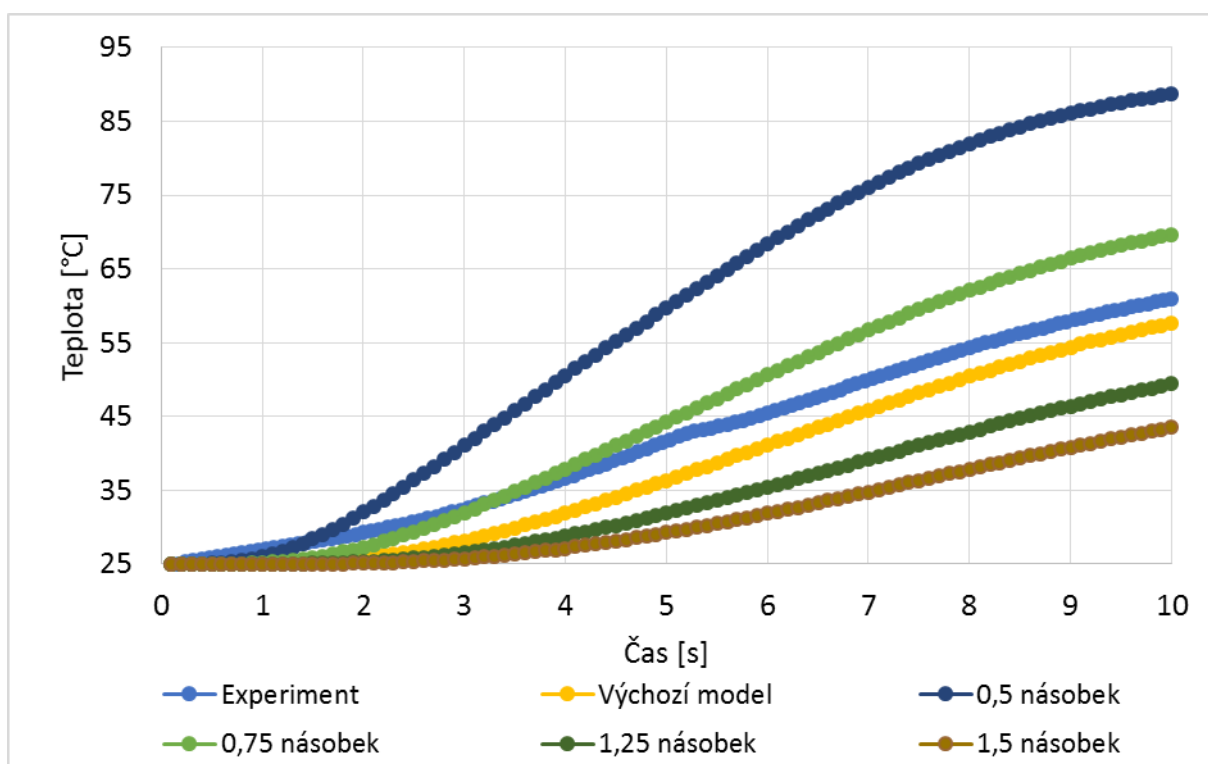


Obr. 5.16: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 1 mm s uvažováním fázové přeměny a bez uvažování fázové přeměny. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.



Obr. 5.17: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm s uvažováním fázové přeměny a bez uvažování fázové přeměny.

Časový průběh teploty na rozhraní pro verzi s i bez fázové přeměny a pro horní materiál o tloušťce 2 mm je znázorněn na Obr. 5.17. Časový průběh pro horní materiál o tloušťce 1 mm je uveden v příloze C (Obr. C.5), protože se grafy pro obě tloušťky víceméně shodují a diskuze je pro ně stejná. Vidíme, že i na rozhraní se v prvních sekundách výpočtu teploty neliší, protože ještě nebylo dosaženo teploty fázové přeměny. Po dosažení této teploty již případ bez fázové přeměny dosahuje vyšších teplot stejně jako u časového průběhu na povrchu. Také se zde neprojevuje zpomalení a pak zrychlení růstu teploty při fázové přeměně, které je pro případ s fázovou přeměnou vidět v čase 2,5 – 3,5 s. Po ukončení pálení laseru začne v obou případech teplota klesat. V modelu bez fázové přeměny klesá teplota rychleji, protože ochlazování není zpomalené fázovou přeměnou. Zpomalení je v modelu s fázovou přeměnou viditelné v časech 5,5 – 6,5 s. Pokud bychom tedy zvolili model bez fázové přeměny, dostali bychom křivky s vyššími teplotami, než jsou ve skutečnosti při experimentu.

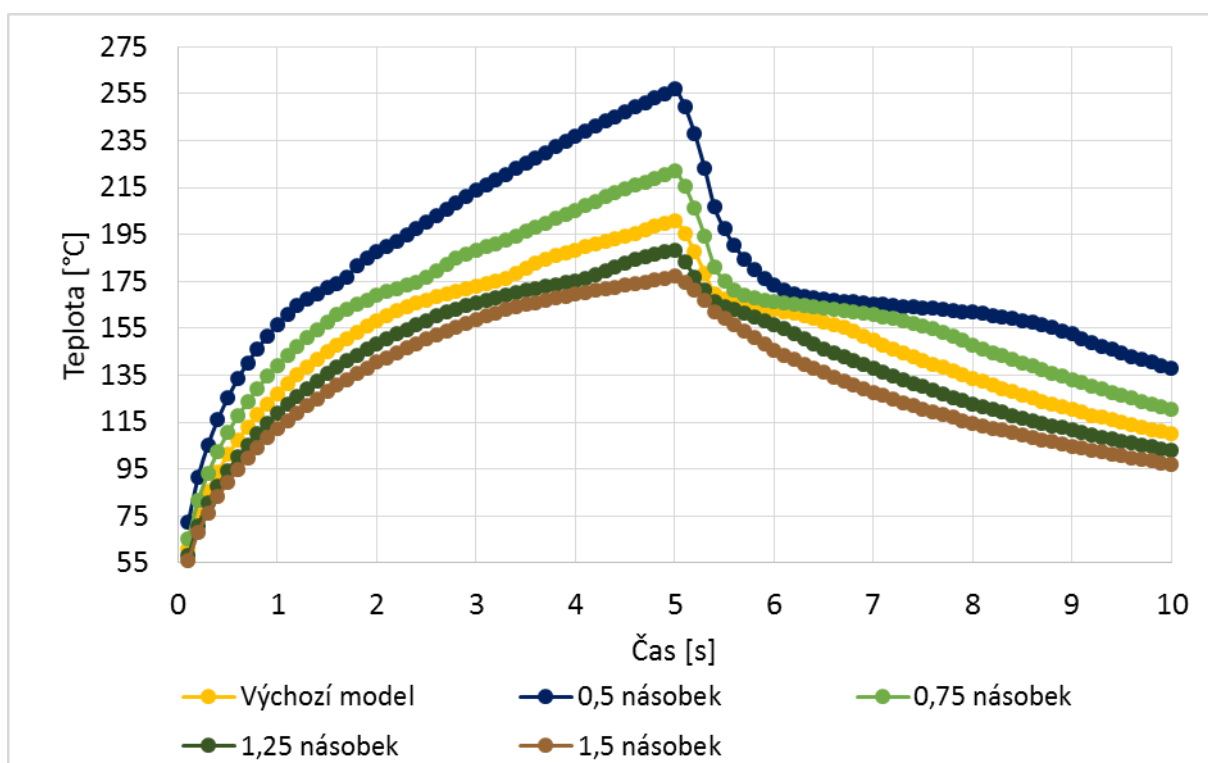


Obr. 5.18: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé násobky naměřené měrné tepelné kapacity, jež je použita ve výchozím modelu. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.

Dále bude diskutován vliv velikosti tepelné kapacity na časový průběh teploty na povrchu a na rozhraní. Trendy jsou opět pro obě tloušťky horního plastu stejné, takže grafy pro tenčí plast jsou uvedeny v příloze C (Obr. C.6 a Obr. C.7). Násobky tepelné kapacity jsou získány tak, že celá naměřená křivka tepelné kapacity (Obr. 4.5) je vynásobena určitým koeficientem. Na Obr. 5.18 vidíme vliv násobků tepelné kapacity na časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 2 mm. Pokud tepelnou kapacitu zvyšujeme, teploty na povrchu jsou nižší, protože materiál má větší schopnost „držet“ teplo. Naopak pro menší tepelnou kapacitu jsou teploty na povrchu vyšší. Pokud vytvoříme 1,5 násobek výchozí tepelné kapacity, teplota

na povrchu dosáhne v čase 10 s 44 °C. Pro polovinu původní kapacity má povrch v čase 10 s teplotu 89 °C. Ve výchozím modelu je v čase 10 s teplota na povrchu 58 °C. Rozdíly mezi teplotami jsou tedy při snižování tepelné kapacity výraznější než při zvyšování tepelné kapacity.

Na Obr. 5.19 je znázorněn časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm a různé násobky tepelné kapacity. Je zde viditelný stejný trend jako na povrchu, tj. se zvyšující se tepelnou kapacitou se snižuje teplota na rozhraní a opačně. Pověšimně si, že pro tepelnou vodivost to bylo opačně. Pro vyšší tepelnou vodivost teplota na rozhraní klesala a teplota na povrchu rostla. Pokud bychom tepelnou kapacitu zvolili příliš velkou, nedošlo by k tavení materiálu. Pro 1,5 násobek naměřené kapacity je v čase 5 s teplota na rozhraní 177 °C, takže k tavení spodního plastu došlo příliš pozdě. Naopak pro příliš malou tepelnou kapacitu by na rozhraní byly moc vysoké teploty a k tavení by došlo dříve, než je dáno z experimentu. Pro poloviční násobek tepelné kapacity dojde k tavení v čase 1,1 s.

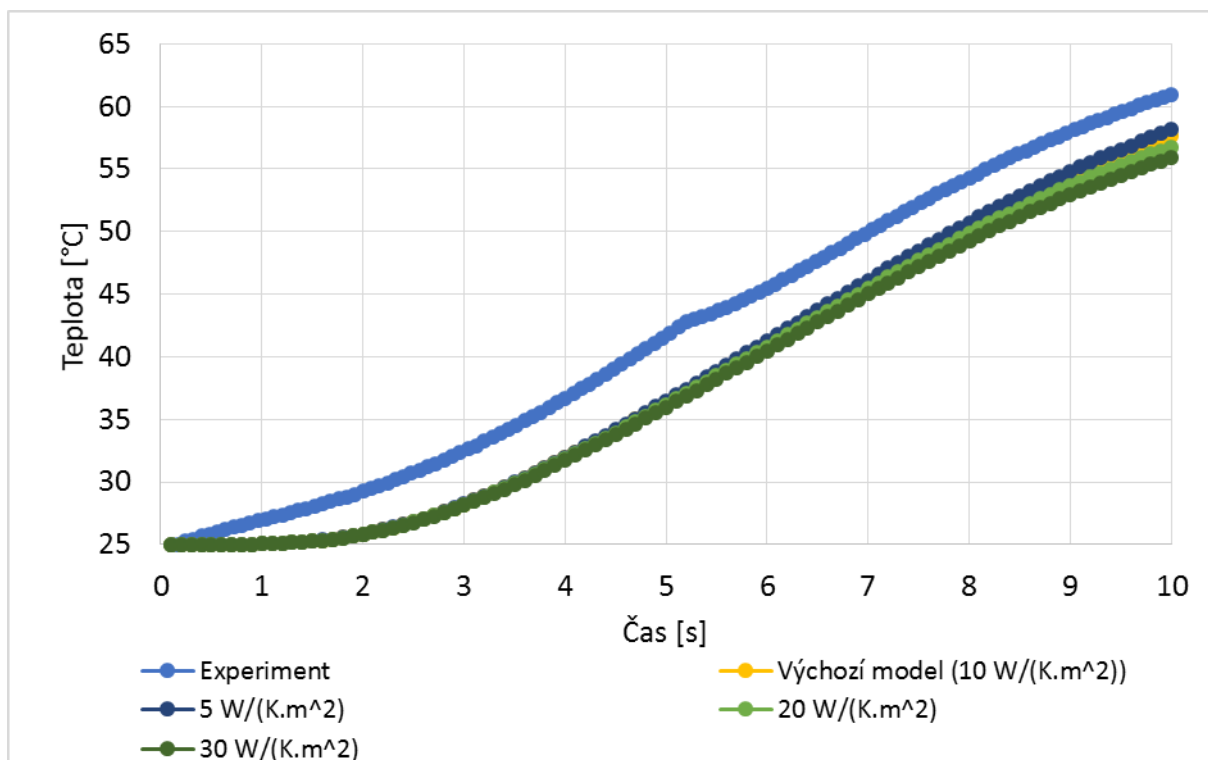


Obr. 5.19: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé násobky naměřené měrné tepelné kapacity, jež je použita ve výchozím modelu.

### 5.1.5. Vliv přestupu tepla na časový průběh teploty

Další vlastností, která se zadávala do výpočtu rozložení teploty ve vzorku, je koeficient přestupu tepla mezi vzorkem a okolním prostředím. Tento koeficient závisí na mnoha parametrech (např. na tvaru vzorku, drsnosti povrchu, okolním proudění vzduchu) a bývá obvykle určován experimentálně. V této práci byly zadávány dva koeficienty přestupu tepla. Jeden koeficient přestupu tepla byl mezi plastem a kovem, ve kterém je vzorek uchycen. Druhý koeficient přestupu tepla je mezi plastem a okolním vzduchem. Kde je zadána, která

podmínka, je vyobrazeno na Obr. 4.3. Přesné hodnoty těchto koeficientů pro dané materiály nemáme, a proto bylo třeba je odhadnout tak, aby se výpočty co nejvíce blížily výsledkům z experimentů. Z několika výpočtů bylo zjištěno, že velikost koeficientu přestupu tepla do kovu nemá na teplotu ve vzorku vliv, protože kov obklopuje vzorek v místech, kde po dobu simulace nedojde ke změně teploty. V těchto místech je tedy po celou dobu výpočtu počáteční teplota 25 °C. Víme, že koeficient přestupu tepla do kovu musí být vyšší než do vzduchu. Výsledný koeficient přestupu tepla do kovu byl zvolen  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pokud bychom zvolili koeficient přestupu tepla do kovu  $1\,000 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , rozložení teploty a časové průběhy teploty se na povrchu ani na rozhraní nezmění.

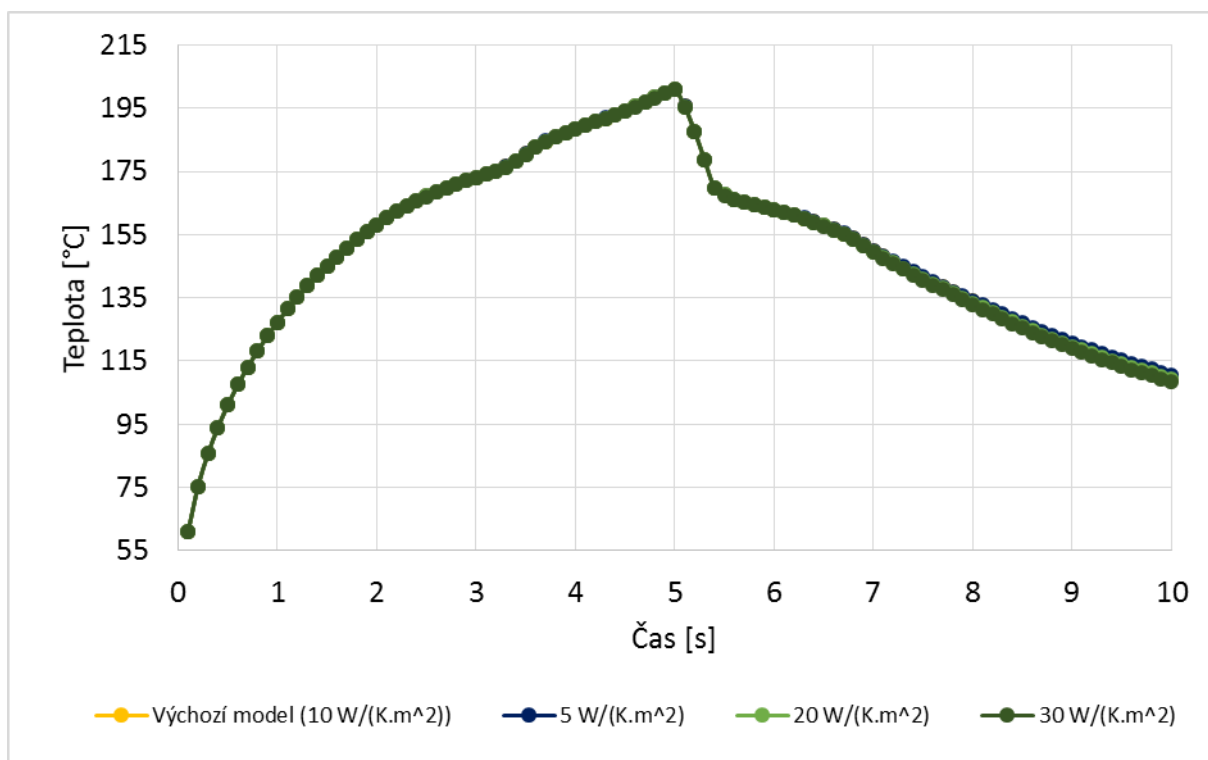


Obr. 5.20: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé hodnoty přestupu tepla z plastu do vzduchu a pro přestup tepla  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  z plastu do kovu. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.

Na Obr. 5.20 je vykreslen časový průběh teploty na povrchu pro různé hodnoty koeficientu přestupu tepla mezi plastem a vzduchem pro horní polymer o tloušťce 2 mm. Dále jsou zde vyneseny křivky pro experiment a pro výchozí model, kde byl koeficient přestupu tepla do vzduchu vybrán  $10 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ . Koeficient přestupu tepla do kovu je pro všechny případy v grafech na Obr. 5.20 a Obr. 5.21 zvolen  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ . Chování časových průběhů v závislosti na velikosti koeficientu přestupu tepla se pro různé tloušťky horního plastu neliší, takže grafy časových průběhů na povrchu a rozhraní pro různé hodnoty přestupu tepla pro horní polymer o tloušťce 1 mm jsou uvedeny v příloze C (Obr. C.8 a Obr. C.9). Z Obr. 5.20 vidíme, že koeficient přestupu tepla do vzduchu nemá velký vliv na časový průběh teploty na povrchu. Pouze v druhé polovině výpočtu jsou vidět mírné rozdíly. Pokud snížíme koeficient přestupu tepla do vzduchu, teplota na povrchu bude mírně vyšší a naopak. Teplota na povrchu

bude pro vyšší koeficienty přestupu tepla nižší, protože odvod tepla do okolí je vyšší. Větší rozdíly v teplotách by nastaly, pokud bychom zvolili koeficient přestupu tepla výrazně vyšší nebo nižší, potom by ale tato hodnota již neodpovídala reálnému koeficientu přestupu tepla z plastu do vzduchu.

Časový průběh teploty na rozhraní pro 2 mm tlustý horní plast a různé hodnoty přestupu tepla z plastu do vzduchu je vykreslen na Obr. 5.21. Pro 1 mm tlustý horní plast je graf víceméně stejný (viz Obr. C.9). Na rozhraní se koeficient přestupu tepla do okolí projevuje ještě méně než na povrchu, protože rozhraní přímo nesousedí s okolním vzduchem, jako je tomu u povrchu vzorku. Mírné rozdíly jsou vidět až v posledních sekundách simulace, kdy už není dodáván zdroj tepla a více se projevuje rozvod tepla v materiálu a odvod tepla pryč ze vzorku. Pro menší hodnoty koeficientu přestupu tepla do vzduchu je teplota na rozhraní vyšší a pro vyšší hodnoty je teplota na rozhraní nižší. Rozdíl v teplotě v čase 10 s je 2,16 °C pro koeficient přestupu tepla do vzduchu  $5 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $30 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , takže je téměř zanedbatelný. Koeficient přestupu tepla do vzduchu  $10 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  byl zvolen proto, že na povrchu nejlépe kopíroval experimentální křivku.

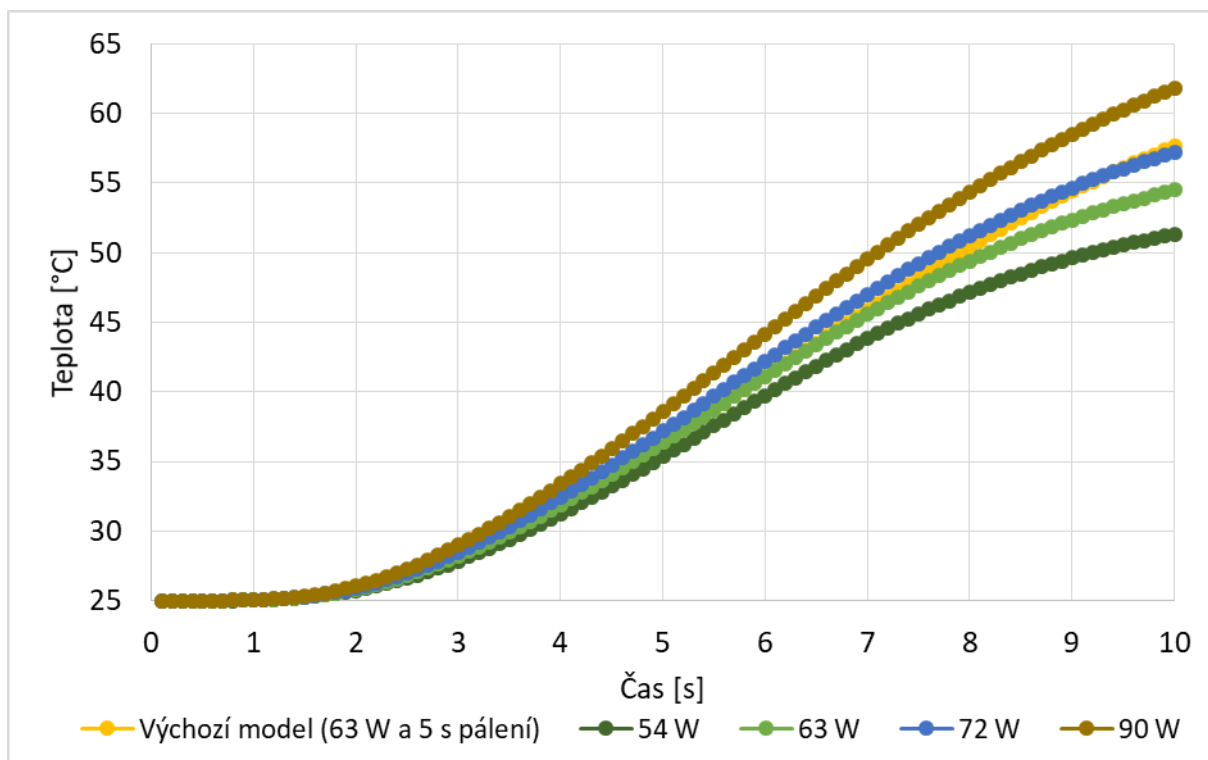


Obr. 5.21: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé hodnoty přestupu tepla z plastu do vzduchu a pro přestup tepla  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  z plastu do kovu.

### 5.1.6. Vliv parametrů procesu laserového svařování

V této kapitole bude diskutován vliv parametrů procesu na rozložení teploty ve vzorku, na časový průběh teploty na povrchu a rozhraní a na průběh teploty po určitých úsečkách. Mezi parametry procesu patří například délka pálení laseru, výkon laseru nebo tvar laserového spotu. Nejprve se zaměříme na vliv délky pálení laseru a velikosti výkonu na časový průběh

teploty na povrchu a na rozhraní. Na Obr. 5.22 a Obr. 5.23 je znázorněn časový průběh teploty na povrchu a na rozhraní pro různé hodnoty výkonu a délku pálení laseru 4 s pro horní plast o tloušťce 2 mm. Hodnoty výkonu a délka pálení jsou zvoleny takto, protože pro tyto hodnoty jsme měli závislosti posuvu svařovacího stolku na čase, ze kterých jsme získali čas tavení materiálu pro dané parametry. V grafu je pro srovnání znázorněn výchozí model, který se od ostatních křivek v grafech liší výkonem (63 W) a délkou pálení laseru (5 s). Grafy pro horní plast o tloušťce 1 mm vykazují stejné trendy, takže jsou uvedeny v příloze C (Obr. C.10 a Obr. C.11).



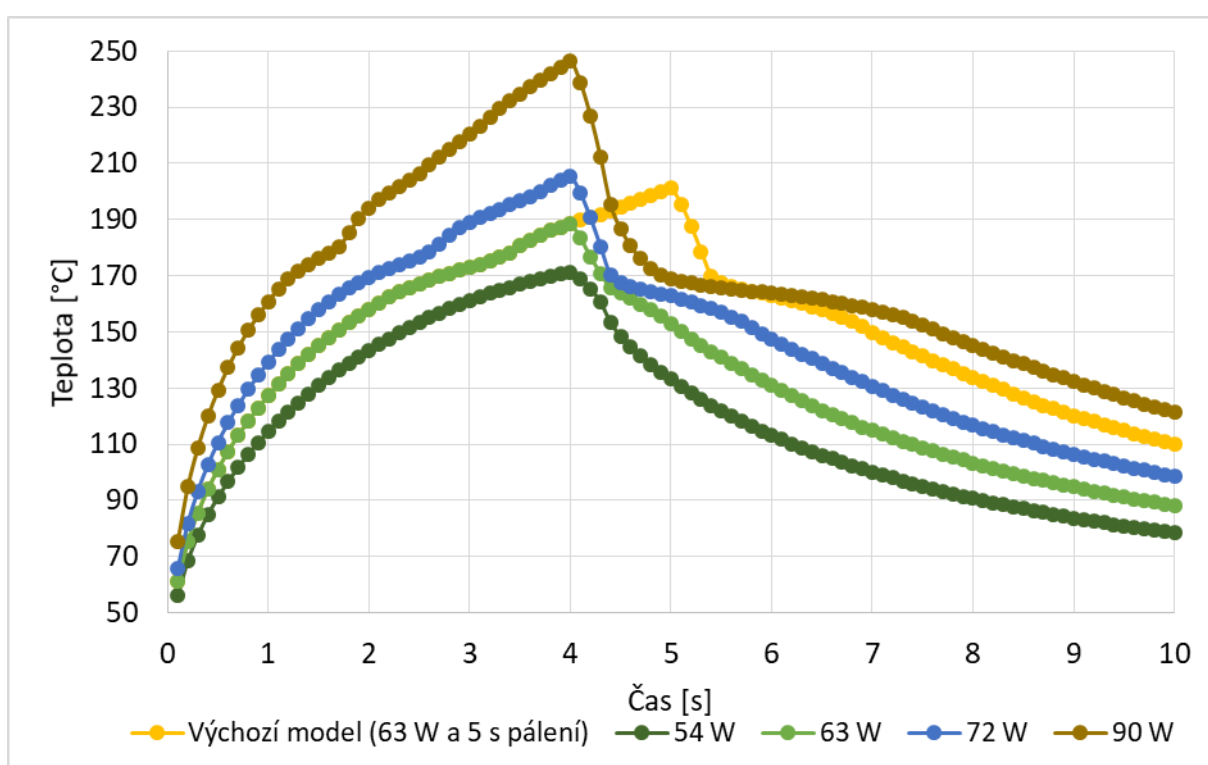
Obr. 5.22: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé výkony. Délka pálení laseru je 4 s. V grafu je pro srovnání znázorněn i výchozí model.

Na Obr. 5.22 jsou znázorněny dvě křivky pro stejný výkon (63 W), ale různý čas pálení laseru (4 s a 5 s). Můžeme tedy zjistit, jaký vliv má délka pálení laseru na teplotu na povrchu vzorku. Z grafu vidíme, že křivky se v první půlce simulace příliš neliší. Rozdíl se začne projevovat až v druhé půlce simulace, protože chvíli trvá, než se rozdíl doby, po kterou je dodáván výkon na rozhraní, projeví na povrchu. Simulace potvrzuje intuici, že čím déle laser pálí, tím vyšší teploty na povrchu budou. Pokud laserem pálíme o 1 s déle (místo 4 s 5 s), pak je teplota v čase 10 s o 3,15 °C vyšší. Tento rozdíl by se zvyšoval s větším rozdílem v době pálení laseru.

Druhý poznatek, který si můžeme odnést z Obr. 5.22, je vliv velikosti výkonu laseru na teplotu na povrchu vzorku. Na počátku simulace nejsou opět znatelné rozdíly, protože výkon je dodáván na rozhraní a povrch se od rozhraní začne zahřívat až po nějaké době. Vidíme, že čím vyšší výkon na rozhraní dodáváme, tím vyšší teploty budou na povrchu. Například pro výkon 54 W teplota na povrchu v čase 10 s dosahuje hodnoty 51 °C a pro výkon

90 W je teplota na povrchu v čase 10 s 62 °C. Při rozdílu výkonu téměř 40 W je tedy na povrchu v čase 10 s teplotní rozdíl 11 °C.

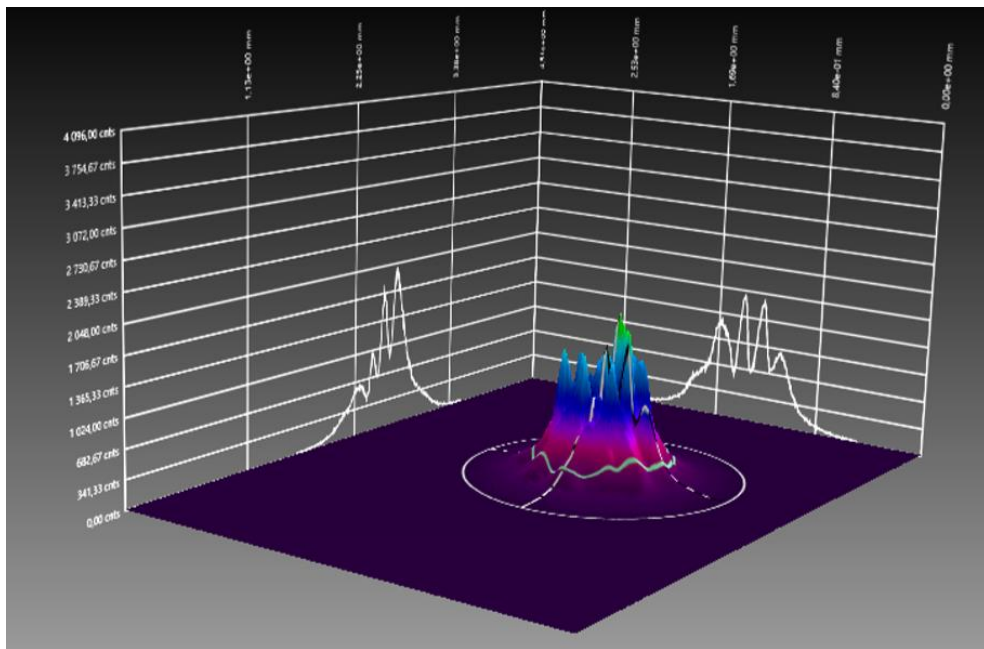
Délka pálení a výkon laseru budou důležitější pro časový průběh teploty na rozhraní, kde tyto parametry ovlivňují vstupní hodnoty. Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm a různé výkony a doby pálení můžeme vidět na Obr. 5.23. V grafu opět máme dvě křivky pro stejný výkon (63 W) a různou dobu pálení (4 s a 5 s). Z maxima teploty na rozhraní vidíme, kdy byl zdroj ohřevu vypnut, protože poté již teplota klesá. Čím déle laser pálí, tím vyšší maximální hodnota je na rozhraní dosažena, a tím pádem i velikost taveniny bude vyšší. V čase 4 s je teplota na rozhraní 189 °C a v čase 5 s je 201 °C. Pro daný výkon se materiál za tuto dobu ohřeje ještě o dalších 12 °C. Teploty po vypnutí laseru jsou pro kratší dobu pálení přirozeně menší.



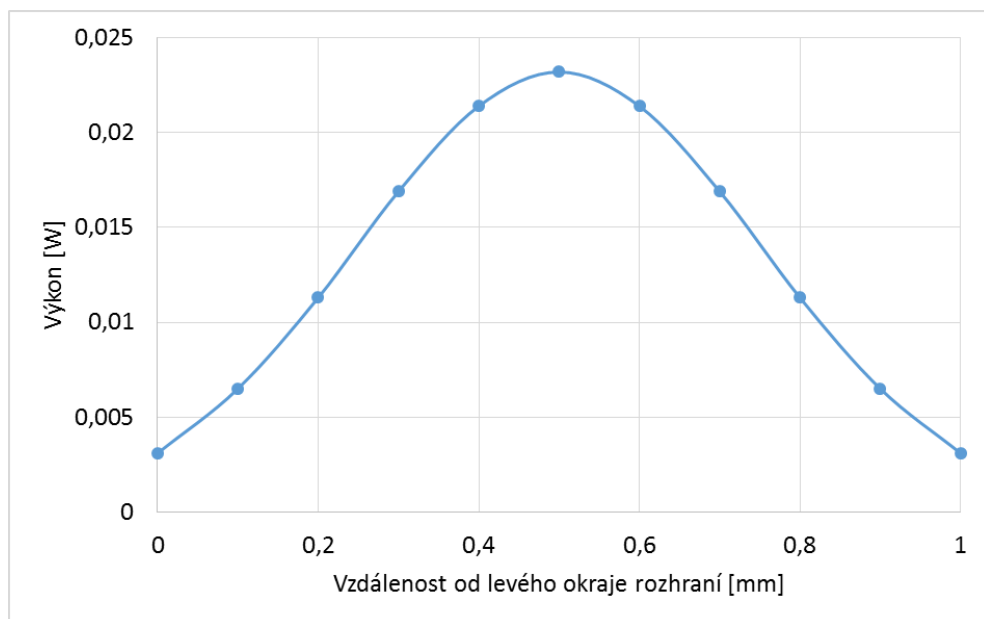
Obr. 5.23: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 2 mm pro různé výkony. Délka pálení laseru je 4 s. V grafu je pro srovnání znázorněn i výchozí model.

Z Obr. 5.23 můžeme také porovnávat vliv výkonu na časový průběh teploty na rozhraní. Máme zde stejnou závislost jako pro časový průběh na povrchu, tj. se zvyšujícím se výkonem laseru se zvyšuje teplota na rozhraní. Teplota na rozhraní ovlivňuje velikost taveniny. Pokud zvolíme příliš vysokou hodnotu výkonu, materiál se začne tavit příliš brzo a taveniny vzniká více. Pokud zvolíme příliš malou hodnotu výkonu, pak k tavení plastu vůbec dojít nemusí. Rozdíly v teplotách jsou zde pro různé výkony výraznější než na povrchu, protože přímo do uzlů na rozhraní je výkon zadáván. Na konci pálení laseru, tj. v čase 4 s, je pro výkon 90 W teplota na rozhraní 247 °C a pro výkon 54 W je 169 °C. Z toho plyne, že pro o 36 W větší výkon je teplota v čase 4 s na rozhraní o 78 °C větší, na povrchu tento rozdíl činí jen 0,93 °C. V čase

10 s je pro výkon 90 W teplota na rozhraní 121 °C a pro výkon 54 W je 78 °C. Rozdíl je tedy 43 °C. Na povrchu byl ve stejný čas a pro stejné výkony rozdíl teploty jen 11 °C.



Obr. 5.24: Reálný tvar laserového spotu

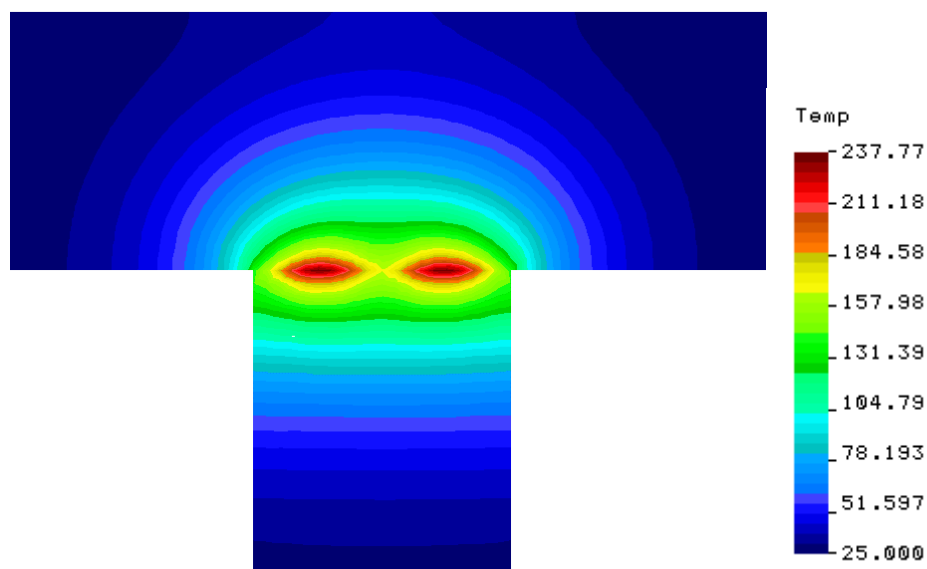


Obr. 5.25: Gaussův profil výkonu pro horní plast o tloušťce 2 mm.

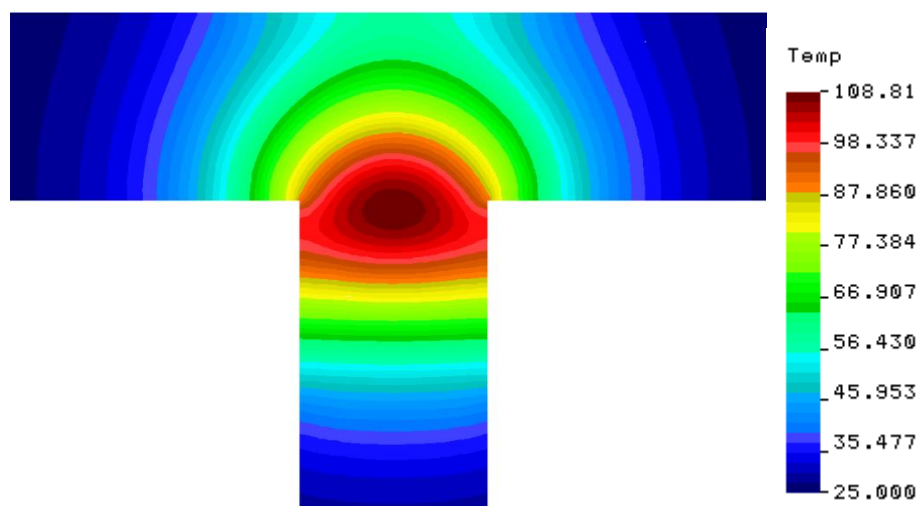
Ve výchozím modelu používáme kontinuální, časově a prostorově konstantní ohřev na rozhraní. Na Obr. 5.24 můžeme vidět reálný tvar laserového spotu. Ten rozhodně není konstantní v prostoru. Abychom se přiblížili skutečnosti, rozhodli jsme se místo zadávání stejné hodnoty výkonu do všech uzlů sítě (jak tomu bylo ve všech případech výše), proložit reálný tvar laserového spotu Gaussovou funkcí, která se tvarem více blíží skutečnosti. Důležité bylo, aby celkový výkon dodaný do materiálu byl pro konstantní i Gaussovu funkci stejný.



Výsledný tvar křivky výkonu a hodnoty výkonu v jednotlivých uzlech jsou znázorněny na Obr. 5.25. Tyto hodnoty se zadávají do bodů na rozhraní dvakrát vedle sebe, protože průměr laserového spotu je 1 mm, ale šířka rozhraní je 2 mm, takže musíme uvažovat dva spoty vedle sebe, tj. dvě Gaussovy funkce vedle sebe. Laserový svazek při svařování skenuje vzorek po dvou čarách vedle sebe. Pro horní plast o tloušťce 1 mm je Gaussův profil výkonu stejný.



Obr. 5.26: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 2 mm v čase 5 s. Verze pro Gaussův profil výkonu.

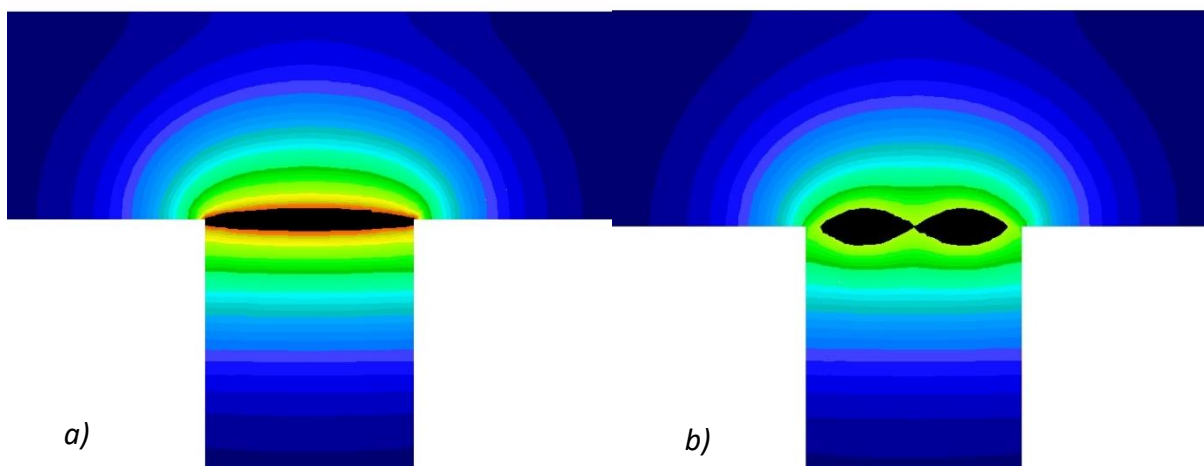


Obr. 5.27: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 2 mm v čase 10 s. Verze pro Gaussův profil výkonu.

Na Obr. 5.26 a Obr. 5.27 již můžeme vidět, jak vypadá rozložení teploty v materiálu, pokud místo konstantního profilu výkonu zvolíme Gaussův profil. Oba obrázky jsou pro horní polymer o tloušťce 2 mm, první v čase 5 s a druhý v čase 10 s. Rozložení teploty pro 1 mm tlustý horní plast je velmi podobné, jen teploty na povrchu jsou vyšší kvůli tenčímu hornímu plastu. Rozložení teploty v čase 5 s a 10 s pro horní plast o tloušťce 1 mm jsou znázorněny v příloze C

(Obr C.12 a Obr C.13). Rozdíl oproti rozložení teploty v čase 5 s pro konstantní profil výkonu (viz. Obr. 5.1) je viditelný na první pohled. Pro konstantní profil byla téměř po celé délce rozhraní stejná teplota. Dobře jsou vidět dva Gaussovy profily vedle sebe s maximy uprostřed laserového spotu, tj. v jedné čtvrtině tloušťky rozhraní. Teplota klesá směrem z maximální teploty uprostřed laserového spotu ke krajům a doprostřed rozhraní. To je dáno nižšími hodnotami výkonu v těchto směrech. Maximální teplota na rozhraní pro konstantní profil je 201 °C, pro Gaussův profil je 238 °C. Se zvětšující se vzdáleností od rozhraní se tvar Gaussova profilu v rozložení teploty „smazává“ a začne se více podobat konstantnímu profilu výkonu.

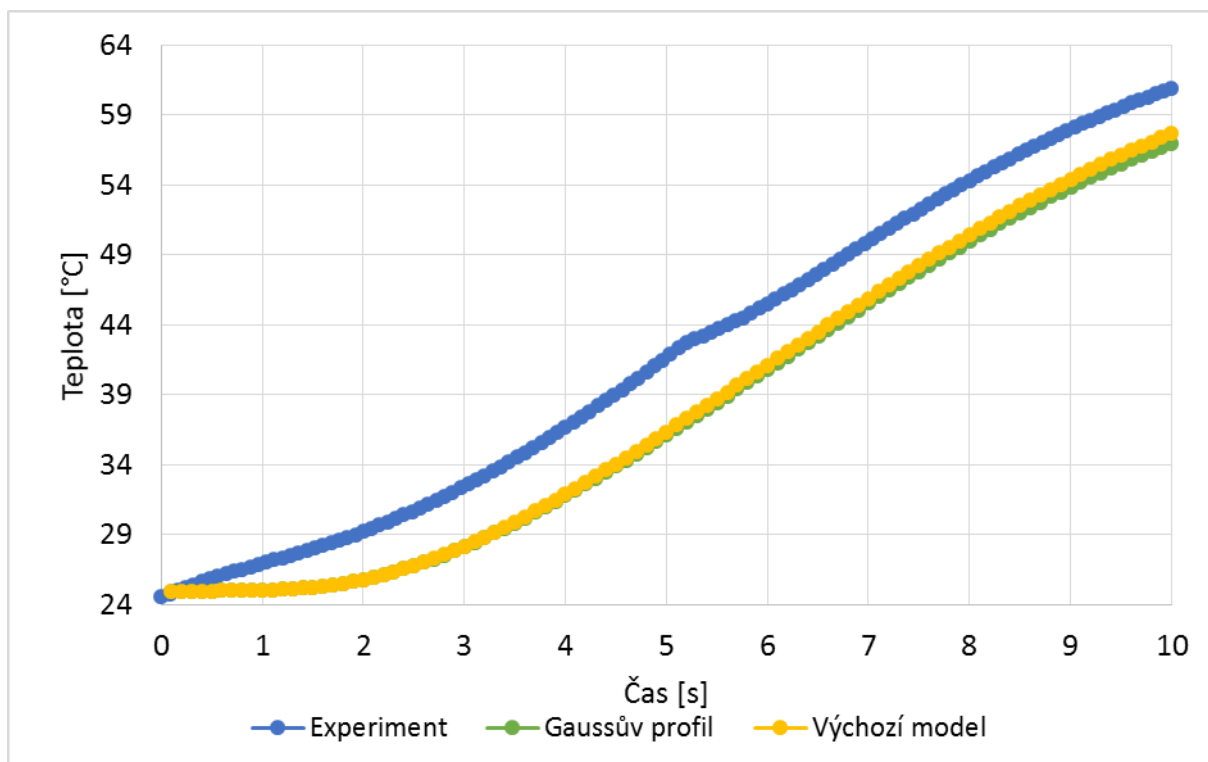
Pro rozložení teploty ve vzorku v čase 10 s už takový rozdíl mezi konstantním profilem výkonu (Obr. 5.3) a Gaussovým profilem výkonu (Obr. 5.27) není, protože laser již 5 s nepálí. Teplo se po tuto dobu rozvádí v materiálu, takže rozdíl ve tvaru a v hodnotách výkonu v jednotlivých uzlech na rozhraní mizí. Teploty jsou v obou rozložení víceméně stejné, pro Gaussův profil výkonu mírně nižší.



Obr. 5.28: Porovnání roztavené části pro horní plast o tloušťce 2 mm v čase 5 s. Vlevo: a) konstantní profil výkonu, tj. výchozí model. Vpravo: b) Gaussův profil výkonu.

Stěžejní při svařování plastů je tvar a velikost taveniny, protože ta rozhoduje o kvalitě vytvořeného svaru. Proto bylo důležité porovnat, jak vypadá tavenina pro konstantní profil výkonu a Gaussův profil výkonu. Opět zde velkou roli nehraje tloušťka horního plastu, takže pro tloušťku 1 mm jsou obrázky znázorněny v příloze C (Obr. C.14) a pro tloušťku 2 mm je porovnání roztavené části znázorněno na Obr. 5.28. Oblast roztavené části polymeru je znázorněna černě. Jsou to ty části vzorku, které dosáhly vyšší teploty, než je teplota tavení (162 °C). Pro konstantní profil výkonu je velikost taveniny podél rozhraní téměř konstantní. Ve středu jí je mírně více než na krajích, protože na krajích je vlivem přestupu tepla do okolí nižší teplota. Pro Gaussův profil výkonu jsou rozdíly ve velikosti taveniny větší v závislosti na poloze. Uprostřed laserového spotu, tj. ve čtvrtině tloušťky rozhraní, je taveniny hodně. Ve středu vzorku je nataveného materiálu velmi málo a na krajích (cca 0,13 mm od každého kraje) není tavenina vůbec. To by znamenalo, že se na kraji nevytvořil svar, což neodpovídá experimentu, kde svar vzniká po celé délce rozhraní. Může to být dáno tím, že horní plast mírně rozptyluje laserový paprsek, takže ve skutečnosti je na kraji vyšší výkon, než je

uvažovaný v simulaci. Potom by i velikost taveniny na krajích rozhraní byla vyšší. Ze simulace vyplývá, že by bylo výhodnější mít konstantní profil výkonu. Pak by velikost taveniny byla po celé délce rozhraní stejná a svar by byl všude stejně pevný. Tomu by se šlo přiblížit tak, že by se vzorek skenoval po více čarách. Vyšší výkon na stranách by bylo možné nastavit tím, že se určí kratší rozestupy skenovacích čar na stranách, aby byl profil teplot opravdu homogenní. Je nutné podotknout, že v experimentu je vliv přítlaku, který vytlačuje taveninu ven (do stran) a v simulaci toto není zahrnuto.

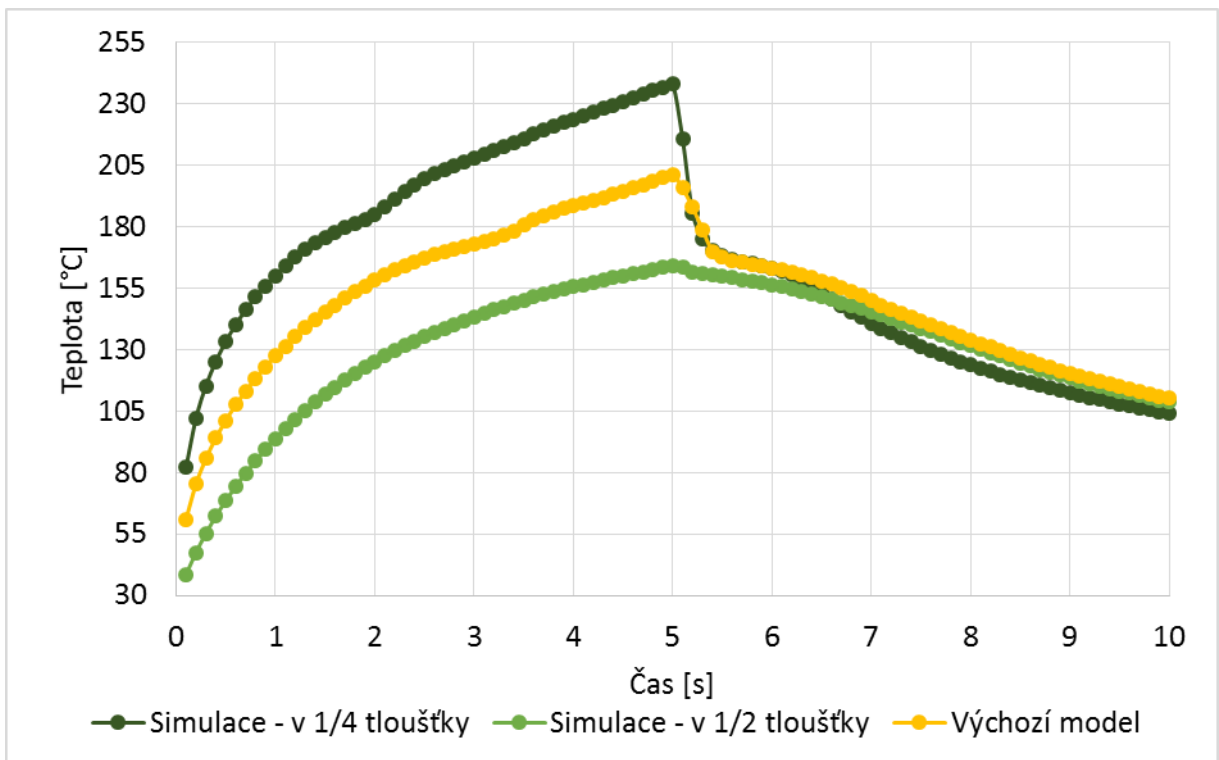


Obr. 5.29: Porovnání časového průběhu teploty na povrchu vzorku pro horní plast o tloušťce 2 mm pro konstantní profil výkonu, tj. výchozí model, Gaussův profil výkonu a experiment.

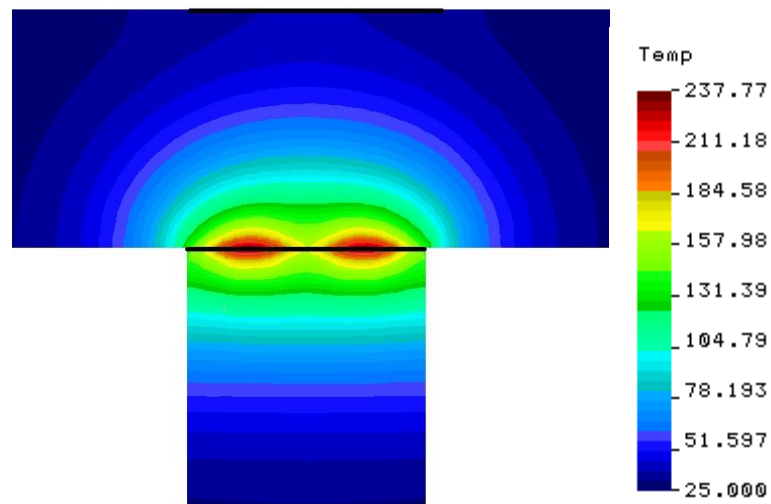
Dále budeme porovnávat časové průběhy teploty na povrchu a rozhraní pro konstantní a Gaussův profil výkonu. Pro tloušťku 2 mm jsou průběhy znázorněny na Obr. 5.29 a Obr. 5.30. Pro tloušťku 1 mm jsou uvedeny v příloze C (Obr. C.15 a Obr. C.16), neboť diskuze je k oběma tloušťkám stejná. Z Obr. 5.29 vidíme, že rozdílný tvar profilu výkonu nemá na teplotu na povrchu téměř žádný vliv. Ve výchozím modelu je teplota na povrchu v čase 10 s 57,65 °C a v modelu s Gaussovým profilem výkonu je teplota na povrchu 56,98 °C. Rozdíl teplot je v čase 10 s pouze 0,67 °C, takže jde o téměř zanedbatelnou hodnotu a rozdíl v teplotách mezi zvolenými profily výkonu není na povrchu znatelný.

Časové průběhy teploty na rozhraní (viz Obr. 5.30) už se výrazně liší, neboť jsou přímo ovlivněné velikostí výkonu zadávanou do jednotlivých bodů. Pro konstantní profil výkonu byl časový průběh na rozhraní počítán v uzlu uprostřed rozhraní. Pokud ale použijeme Gaussův profil výkonu, v každém uzlu je jiná hodnota výkonu, a tím pádem i jiný časový průběh teploty. Do grafu byl zvolen časový průběh v uzlu uprostřed, tj. v ½ tloušťky rozhraní a v místě maxima

Gaussova profilu, tj. v  $\frac{1}{4}$  tloušťky rozhraní. Vidíme, že v maximu Gaussova profilu jsou teploty po celou dobu pálení laseru vyšší než ve výchozím modelu a uprostřed rozhraní jsou nižší, což je dáno velikostí výkonu v daných uzlech. V maximu Gaussova profilu dojde k tavení v čase 1,1 s, takže v těchto místech vznikne více taveniny než ve výchozím modelu. Naopak uprostřed rozhraní k tavení téměř nedojde, v čase 5 s je zde teplota 164 °C. Při chladnutí už jsou teploty na rozhraní pro oba profily podobné a v čase 10 s je rozdíl mezi teplotou výchozího modelu a teplotou v maximu Gaussova profilu 6 °C.

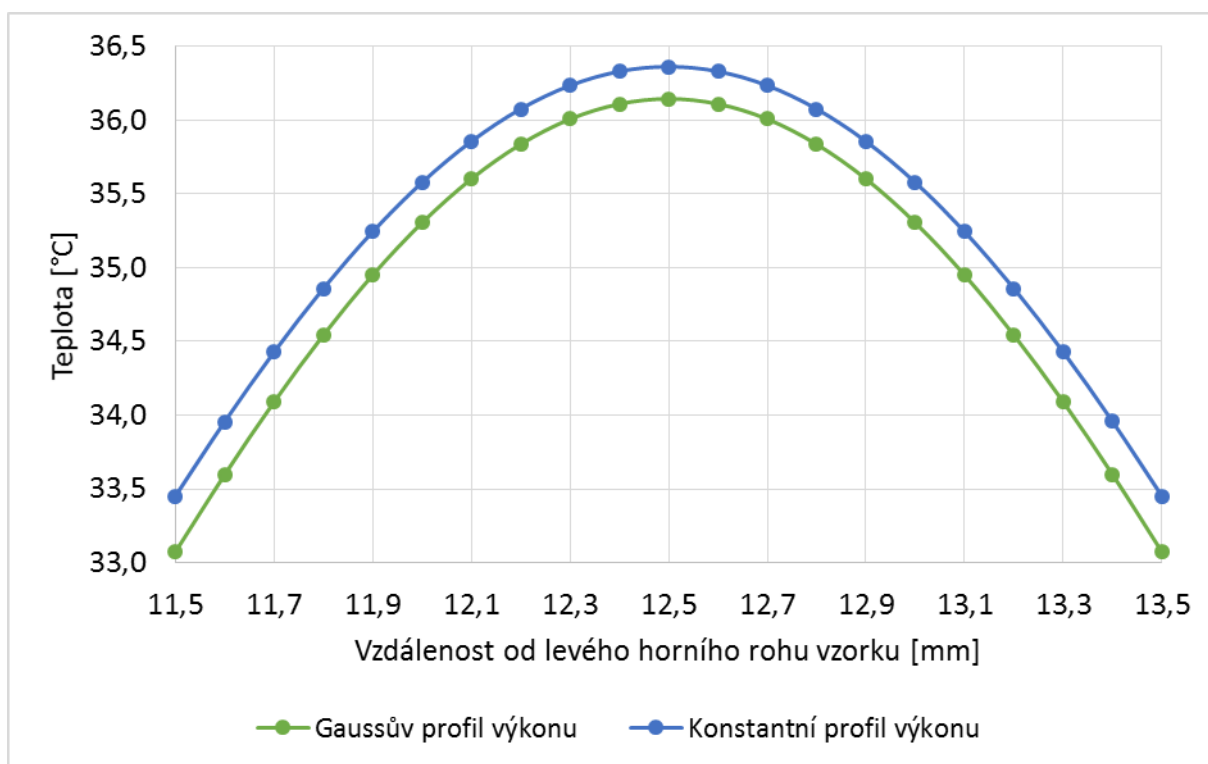


Obr. 5.30: Porovnání časového průběhu teploty na rozhraní vzorku pro horní plast o tloušťce 2 mm pro konstantní profil výkonu, tj. výchozí model, Gaussov profil výkonu v  $\frac{1}{4}$  tloušťky a Gaussov profil výkonu  $\frac{1}{2}$  tloušťky rozhraní.



Obr. 5.31: Zobrazení úseček na rozhraní a povrchu, po kterých se sleduje průběh teploty. Zde vykreslení rozložení teploty v 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm a Gaussov profil výkonu.

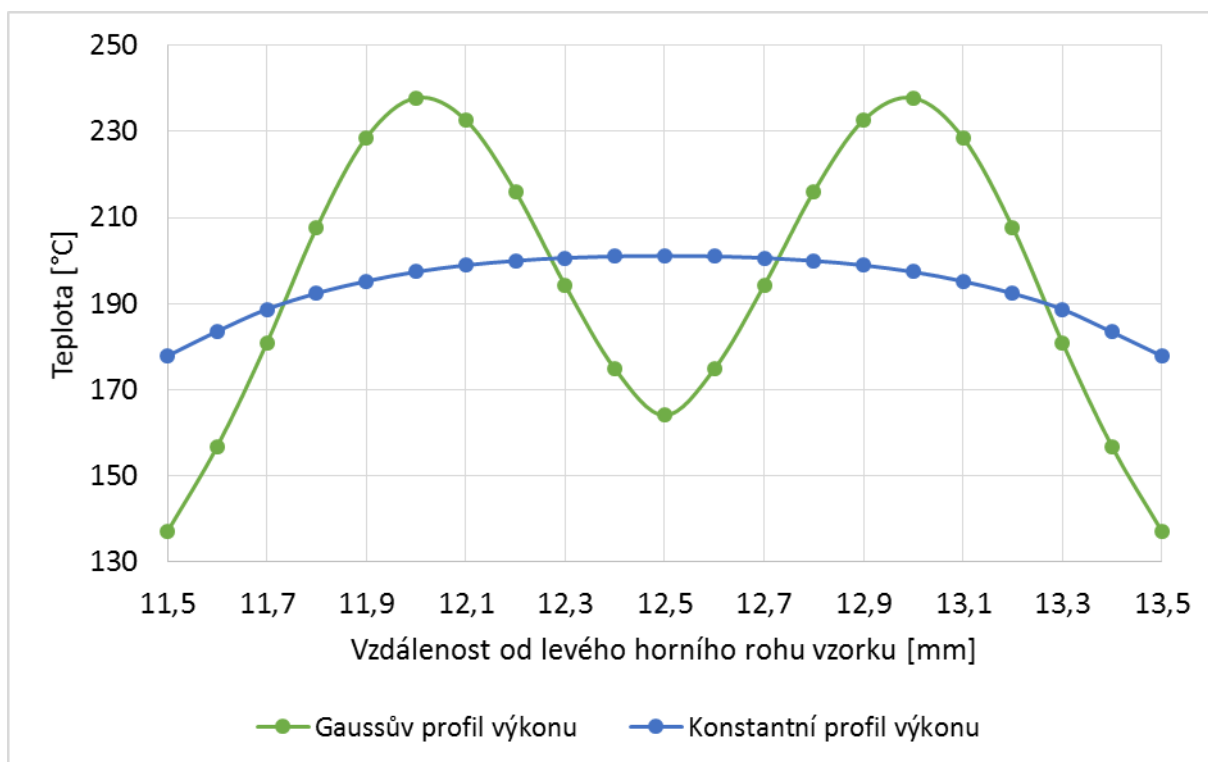
Poslední zkoumanou závislostí pro různé profily výkonu bylo sledování průběhu teploty po úsečkách na rozhraní a na povrchu v čase 5 s. Tyto úsečky jsou znázorněny na Obr. 5.31. Průběhy po úsečkách na rozhraní a povrchu jsou pro 1 mm tlustý horní plast uvedeny v příloze C (Obr. C.17 a Obr. C.18). Průběh teploty po úsečce na povrchu v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm je znázorněn na Obr. 5.32. Na ose x je vynesena vzdálenost od levého horního kraje vzorku, kde je umístěn počátek soustavy souřadné (viz Obr. 4.3). V grafu jsou uvedeny křivky pro konstantní a Gaussův profil výkonu. Obě křivky mají téměř shodný tvar paraboly s minimy na krajích, tj. nad konci rozhraní a maximem uprostřed vzorku. Tento tvar mají teplotní závislosti nejspíše proto, že rozvod tepla směrem nahoru nad rozhraní je rychlejší než rozvod tepla do stran vzorku, což je dáno geometrií úlohy a umístěním zdroje ohřevu. Teploty konstantního profilu výkonu jsou na povrchu podél celé úsečky vyšší než pro Gaussův profil výkonu. Tento rozdíl je ale velmi malý. Na krajích úsečky se teploty liší o 0,38 °C a uprostřed úsečky jen o 0,22 °C.



Obr. 5.32: Průběh teploty po úsečce na povrchu znázorněné na Obr. 5.31 v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm. V grafu jsou znázorněny závislosti pro Gaussův i konstantní profil výkonu.

Průběh teploty po úsečce na rozhraní v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm můžeme vidět na Obr. 5.33. Opět jsou zde tepelné závislosti pro konstantní i Gaussův profil výkonu. Stejně jako v časových průbězích je i v tomto případě rozdíl mezi tvary profilu výkonu výrazný, protože hodnoty výkonu jsou zadávány přímo do těchto bodů. Pro konstantní profil výkonu je průběh teploty po úsečce na rozhraní velmi plochá parabola. Na krajích jsou hodnoty teploty o 23 °C nižší než uprostřed, což je dáno odvodem tepla do okolního plastu. Průběh teploty pro Gaussův profil výkonu kopíruje Gaussovu křivku. Uprostřed rozhraní je teplota 164 °C a na

krajích 137 °C. Teplota uprostřed rozhraní je vyšší než na krajích opět kvůli odvodu tepla do okolí. Maximální teplota je v místech maxima dodaného výkonu, kde dosahuje 238 °C.



Obr. 5.33: Průběh teploty po úsečce na rozhraní znázorněné na Obr. 5.31 v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 2 mm. V grafu jsou znázorněny závislosti pro Gaussův i konstantní profil výkonu.

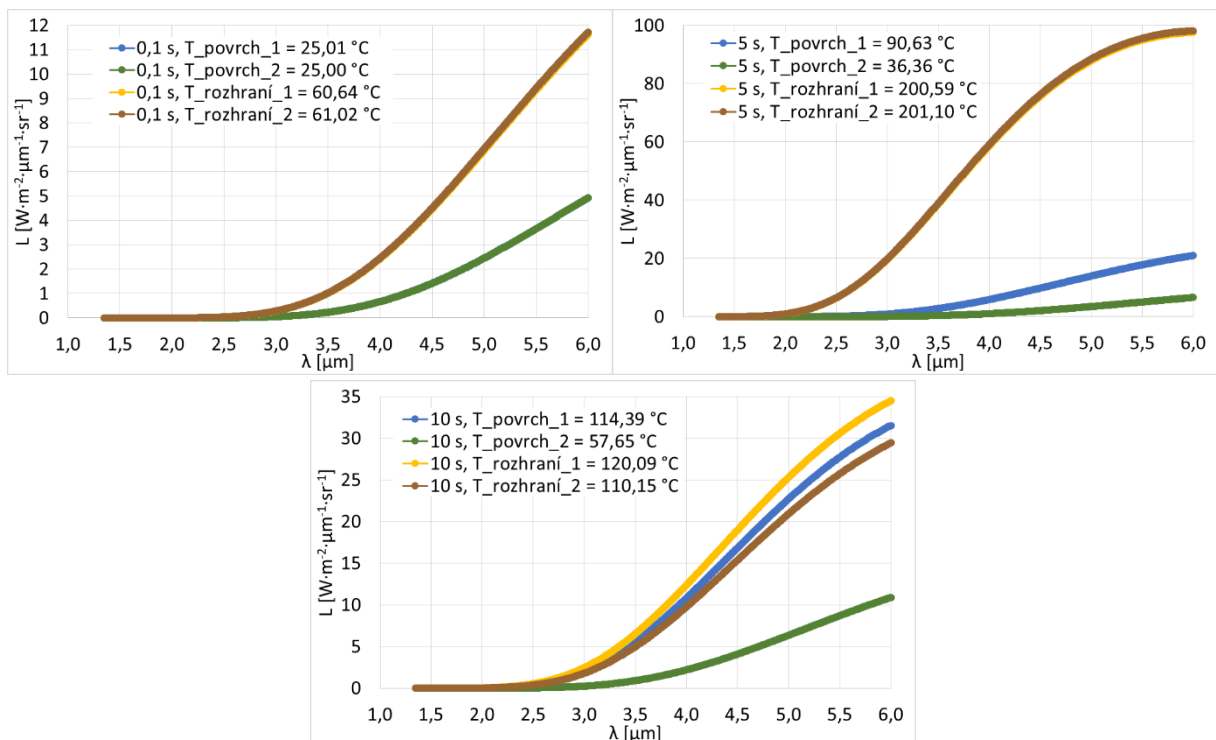
## 5.2. Intenzita vyzařování z povrchu a rozhraní

### 5.2.1. Porovnání výpočtů s výsledky z kamery FLIR SC7650

V druhé části diplomové práce bude ze získaných časových průběhů teploty v první polovině práce určena časová závislost intenzity vyzařování z rozhraní a povrchu vzorku. Tyto závislosti budou porovnány s naměřenými hodnotami během experimentů. Do všech výpočtů v Matlabu byly jako vstupní soubory časových průběhů teploty zadávány křivky pro výchozí model, jež jsou uvedeny v kapitole 5.1.1 (Obr. 5.5 – Obr. 5.7). V této kapitole proběhne porovnání s MW/SWIR kamerou FLIR SC7650, jež má citlivost v rozsahu vlnových délek 1,1 - 6  $\mu\text{m}$ . K omezení spektrální citlivosti kamery na rozsah SWIR, aby bylo detekovatelné vyzařování z rozhraní, kde jsou vyšší teploty a omezeno vyzařování z povrchu s nižšími teplotami, byly použity tři optické filtry. V grafech bude také znázorněno porovnání s experimentem, při kterém se žádný optický filtr nepoužíval.

Na Obr. 5.34 je znázorněna spektrální intenzita vyzařování z povrchu a rozhraní pro obě tloušťky horního plastu v časech 0,1 s, 5 s a 10 s. V legendě jsou uvedeny teploty pro daný čas, povrch nebo rozhraní a tloušťku horního plastu 1 nebo 2 mm. Spektrální intenzita vyzařování se získá dosazením vstupních teplot do Planckova vyzařovacího zákona (4.1). Ze vzorce je zřejmé, že spektrální intenzita vyzařování nezávisí na volbě kamery, ani optických filtrů, takže

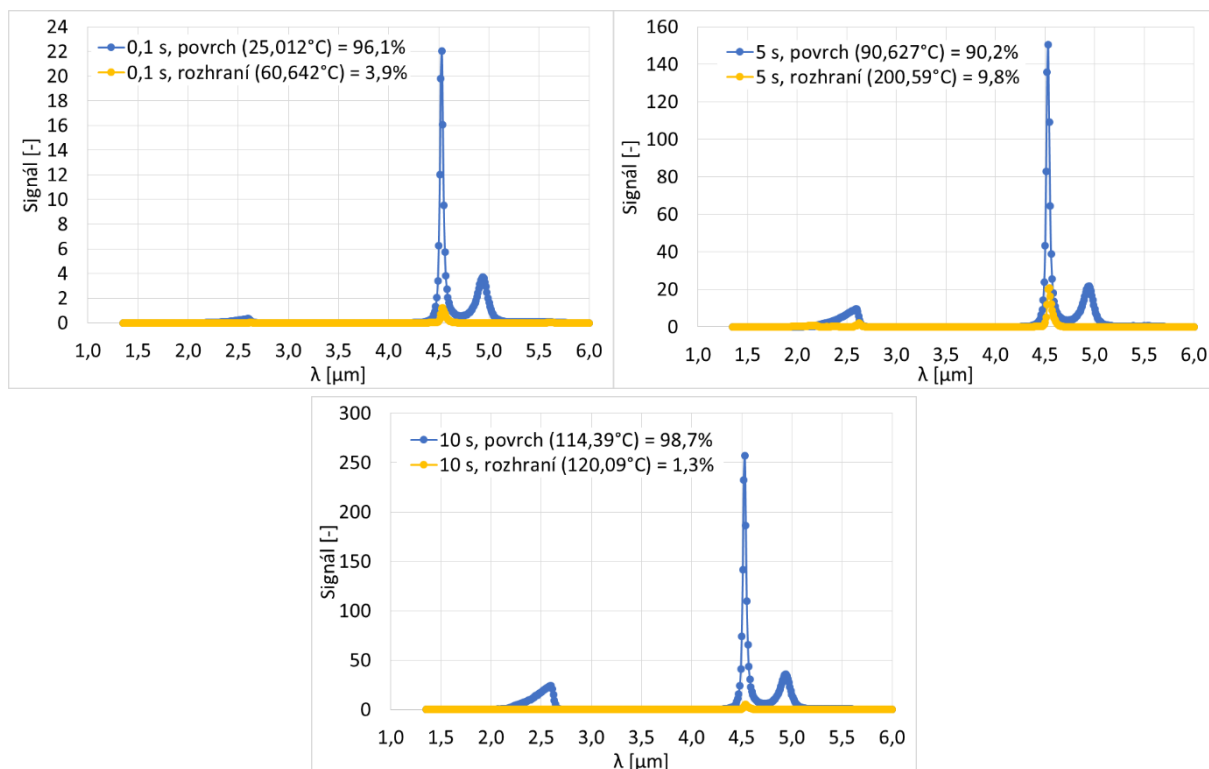
tyto grafy platí pro všechny dále uvedené příklady včetně kamery Hamamatsu C14041-10U. Intenzita vyzařování se ve všech časech zvyšuje se zvyšující se vlnovou délkou. Do cca 2  $\mu\text{m}$  je intenzita vyzařování minimální, ale pro delší vlnové délky výrazně roste. V čase 0,1 s spektrální intenzity vyzařování z povrchu i z rozhraní pro obě tloušťky horního plastu splývají, protože teploty se na povrchu a rozhraní téměř neliší. Intenzita vyzařování z rozhraní je vyšší, protože dle Planckova vyzařovacího zákona se se zvyšující teplotou zvyšuje intenzita. V čase 5 s je intenzita vyzařování pro rozhraní, kde je opět téměř stejná teplota pro obě tloušťky plastu, až osmkrát vyšší než v čase 0,1 s. Na povrchu je již viditelný rozdíl. Intenzita vyzařování pro tlustější plast je nižší kvůli nižším teplotám. V čase 10 s intenzita vyzařování z rozhraní již klesla, protože klesla i teplota. Intenzita vyzařování z povrchu se více přiblížila intenzitě vyzařování z rozhraní.



Obr. 5.34: Spektrální intenzita vyzařování z povrchu a rozhraní pro horní plast o tloušťce 1 i 2 mm v časech 0,1 s, 5 s a 10 s.

Pokud chceme znát infračervený signál vyzařování, musíme hodnoty z Planckova vyzařovacího zákona vynásobit pro signál z povrchu emisivitou horního polymeru (Obr. B.3), citlivostí kamery (Obr. B.4), propustností daného optického filtru (Obr. B.5 – Obr. B.6) a krokem výpočtu. Pro signál z rozhraní je nutné Planckův vyzařovací zákon vynásobit propustností horního polymeru (dvě možnosti – difuzní Obr. B.1, nebo přímá Obr. B.2), citlivostí kamery, propustností daného optického filtru a krokem výpočtu. Signály vyzařování už tedy závisí na tloušťce horního plastu, použité kameře a optickém filtru. Na Obr. 5.35 jsou signály vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s pro případ horního plastu o tloušťce 1 mm, filtr SP2600 a přímou propustnost. Velikost signálu je ve skutečnosti 10 000 krát menší, ale pro lepší názornost v grafech byl signál vždy vynásoben koeficientem 10 000.

V legendě grafů je uveden čas výpočtu, zda jde o povrch či rozhraní, teplota a kolik procent ze signálu je z povrchu, a kolik z rozhraní. Vidíme, že pro danou konfiguraci je výrazný signál po celou dobu výpočtu kolem vlnové délky 4,5  $\mu\text{m}$  a menší píky se nacházejí v oblasti kolem 2,5  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ . V průběhu celé simulace je signál z povrchu výrazně vyšší než z rozhraní (více než 90 % z celkového signálu). S časem se velikost signálu zvyšuje.



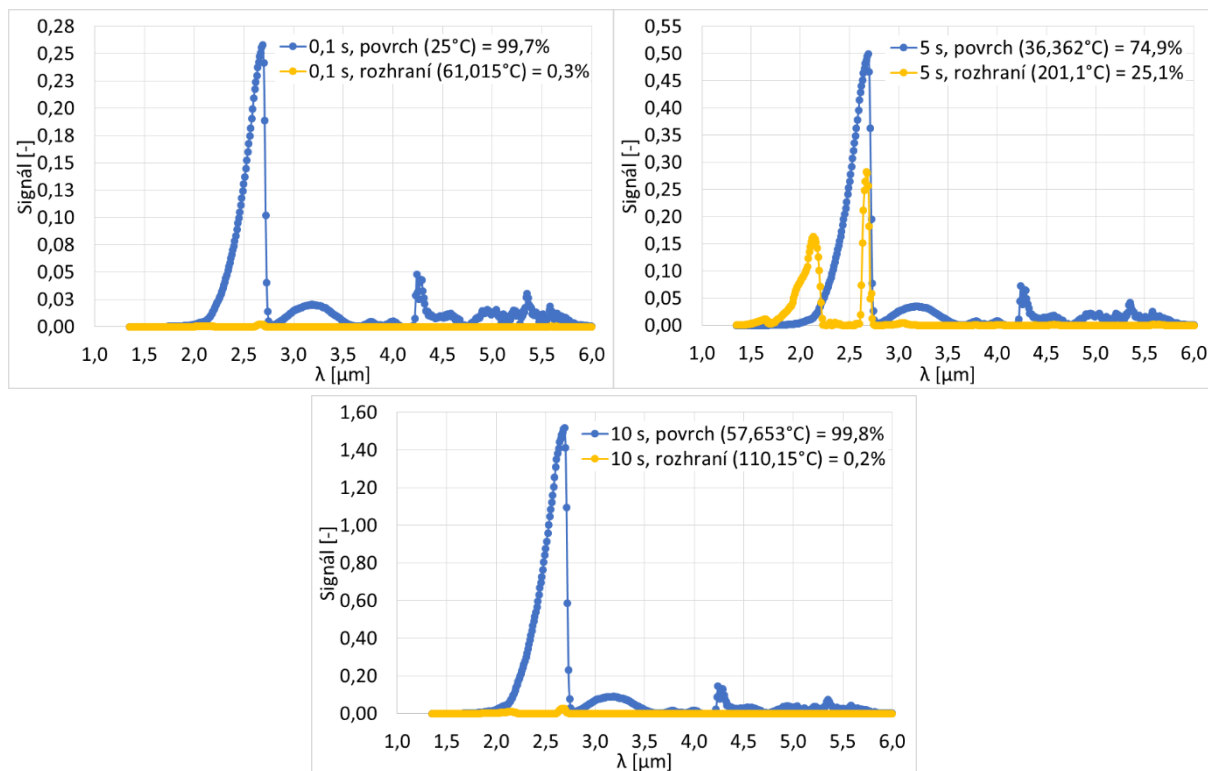
Obr. 5.35: Signál vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s v závislosti na vlnové délce. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm, filtr SP2600 a přímou propustnost. Křivky jsou vynásobeny koeficientem 10 000.

Pro srovnání, jak moc závisí signál infračerveného vyzařování na volených parametrech, jsou na Obr. 5.36 znázorněny stejné signály jako na Obr. 5.35, ale tentokrát pro horní plast o tloušťce 2 mm a filtr WG12012-C. Ostatní parametry jsou stejné. V tomto případě je maximální signál vyzařování ve vlnových délkách 2 – 2,8  $\mu\text{m}$ , ale i pro jiné vlnové délky není signál nulový. Velikost signálu opět s časem roste, ale zde jsou hodnoty o hodně menší, než na Obr. 5.35. Na počátku a konci simulace je téměř celý signál jen z povrchu (přes 99 %). Uprostřed simulace v čase 5 s je signálu z povrchu jen 74,9 % a 25,1 % signálu je z rozhraní.

Následuje porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase s experimentálně získanými hodnotami pomocí kamery FLIR SC7650. Abychom signály z výpočtu a kamery mohly porovnat, musely se upravit, protože původní hodnoty nejsou v nějakých daných jednotkách, a proto jsou neporovnatelné. Od signálu z kamery byl odečten průměr hodnot signálu před začátkem pálení laseru. Od signálu ze simulace je odečtena hodnota signálu v čase 0,1 s tak, aby první hodnota signálu byla 0. Potom jsou všechny hodnoty signálu vynásobeny koeficientem 10 000 a následně vyděleny nějakým číslem tak, aby se křivky ze simulace blížily

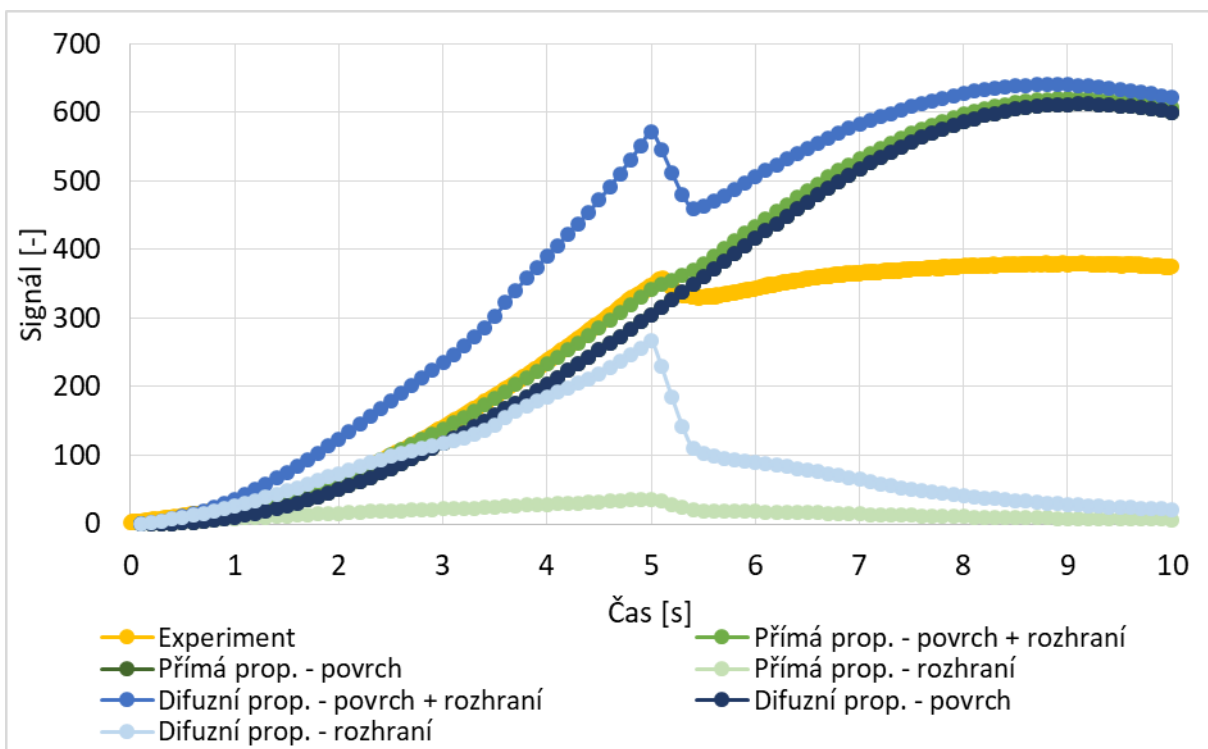


křivkám z měření. Porovnání bylo provedeno pro několik koeficientů dělení, protože není dáno, jakým číslem by se signál měl dělit. Rovněž není jasné, jakou propustnost horního plastu používat. Proto byla ve všech výpočtech porovnávána difuzní i přímá propustnost. Nejprve proběhne diskuze k signálu vyzařování v závislosti na čase pro horní plast o tloušťce 1 mm.

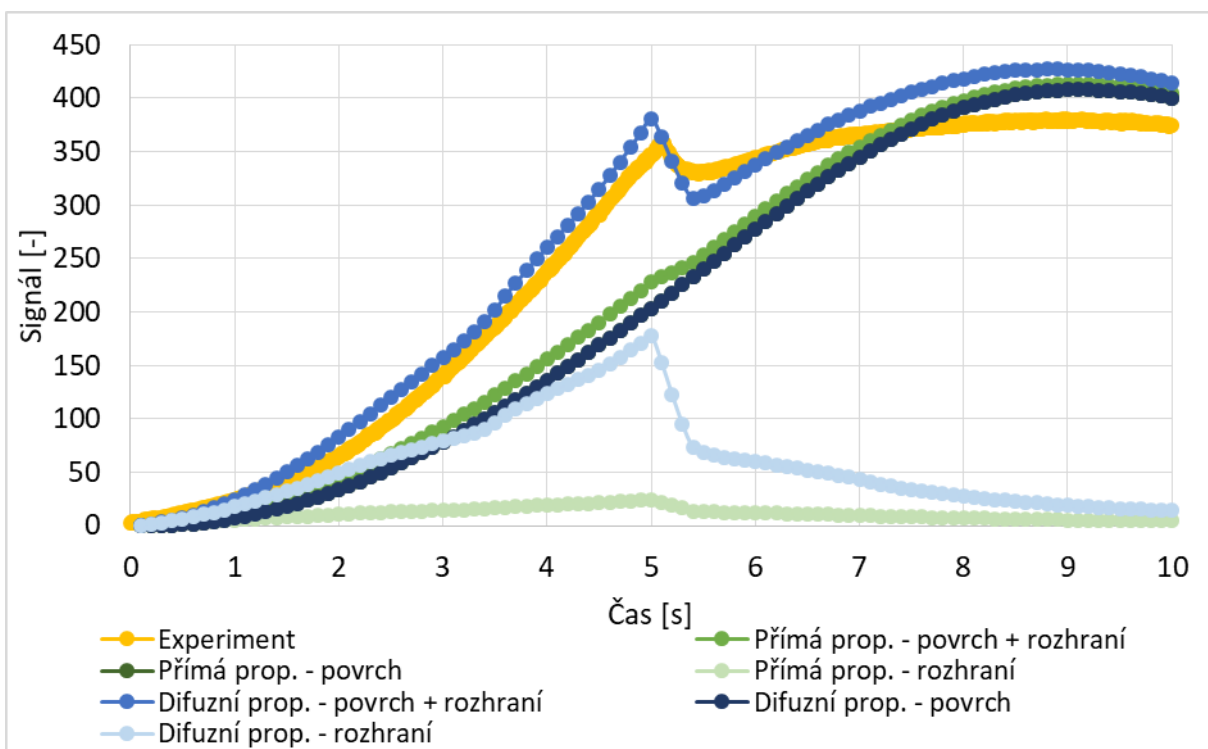


Obr. 5.36: Signál vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s v závislosti na vlnové délce. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm, filtr WG12012-C (sklo) a přímou propustnost. Křivky jsou vynásobeny koeficientem 10 000.

Na Obr. 5.37 je znázorněn signál vyzařování v závislosti na čase. V grafu jsou pro přímou i difuzní propustnost uvedeny křivky vyzařování z povrchu a rozhraní a poté jejich součet, který by měl odpovídat signálu z experimentu, jež je v grafu také uveden. V případě Obr. 5.37 byl zvolen filtr SP2600 a celá simulace byla vynásobena koeficientem 2 500 (vynásobena 10 000 a následně vydělena 4). Křivky z povrchu pro přímou a difuzní propustnost splývají (i ve všech dalších grafech v této kapitole), protože signál na povrchu není závislý na propustnosti horního plastu. Signál z povrchu v čase pálení téměř kopíruje signál z kamery, ale po vypnutí laseru roste rychleji, než signál z kamery. Signál z rozhraní pro difuzní propustnost s časem pálení laseru roste a po vypnutí klesá. Stejně tak je tomu u signálu z rozhraní pro přímou propustnost, ale signál je o hodně menší. Součet signálu z povrchu a rozhraní dává lepší výsledek s měřením pro přímou propustnost, kde si v prvních pěti sekundách odpovídají, na rozdíl od difuzní propustnosti, která je vyšší. Po vypnutí laseru ale neodpovídá signál ani pro přímou, ani pro difuzní propustnost, protože roste o hodně rychleji než v experimentu. V tomto případě simulace tvrdí, že v čase pálení je vhodnější použít přímou propustnost a po vypnutí laseru je detekce signálu z povrchu vyšší než v experimentu.



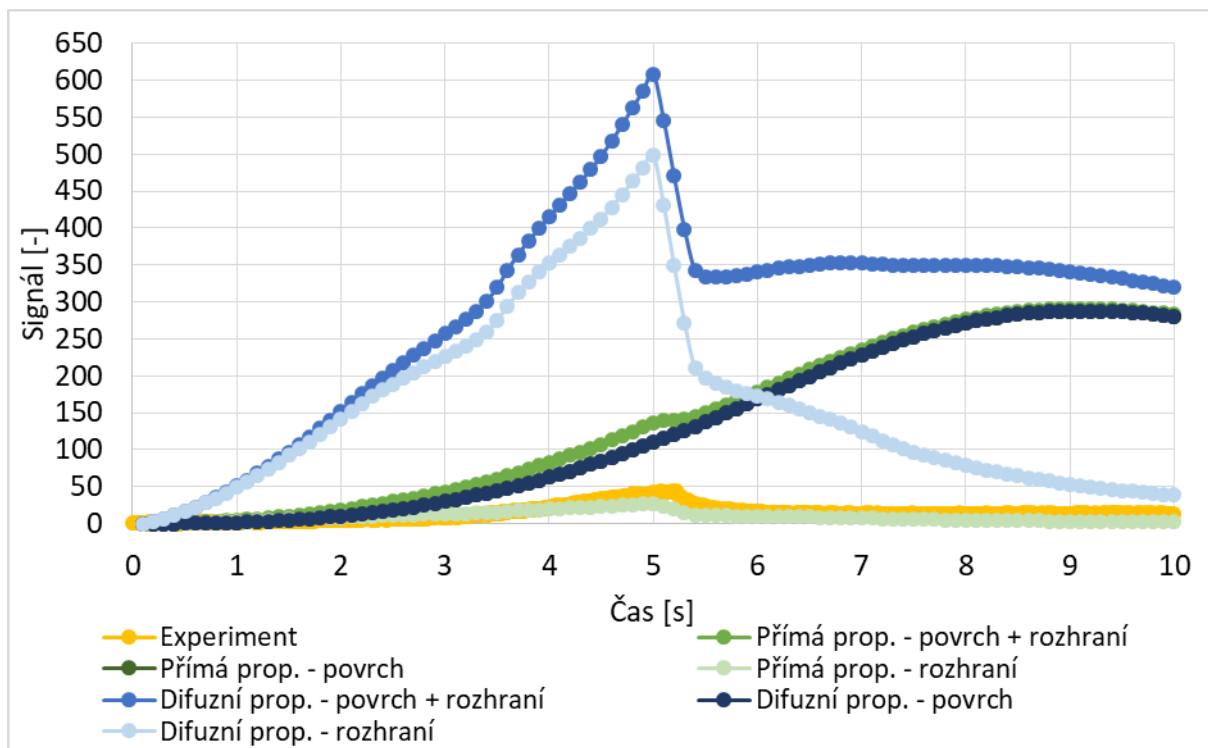
Obr. 5.37: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a filtr SP2600. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.



Obr. 5.38: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a filtr SP2600. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 1667.

Pokud se ale podíváme na Obr. 5.38, dostáváme jiné výsledky. Jsou zde stejné vstupní parametry jako na Obr. 5.37, jen hodnoty signálu ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 1 667 (vynásobeny 10 000 a pak vyděleny 6) místo koeficientem 2 500. V tomto případě naopak v čase pálení laseru experimentu více odpovídá případ s difuzní propustností. Hodnoty signálu pro přímou propustnost jsou příliš malé. Po vypnutí laseru je v křivce s difuzní propustností vidět snížení a poté zvyšování signálu stejně jako u experimentu. Tento „zub“ je pravděpodobně dán tím, že po vypnutí laseru teplota na rozhraní klesá rychleji než zvyšování teploty na povrchu, což sníží hodnotu signálu, ale poté začne teplota rozhraní klesat pomaleji, takže v signálu převládá zvyšující se signál z povrchu. Hodnoty i dále po vypnutí laseru více odpovídají experimentu, než na Obr. 5.37. Z tohoto výpočtu tedy vyplývá, že se více hodí použít difuzní propustnost, která i po vypnutí laseru více odpovídá experimentu, než přímá propustnost na Obr. 5.37.

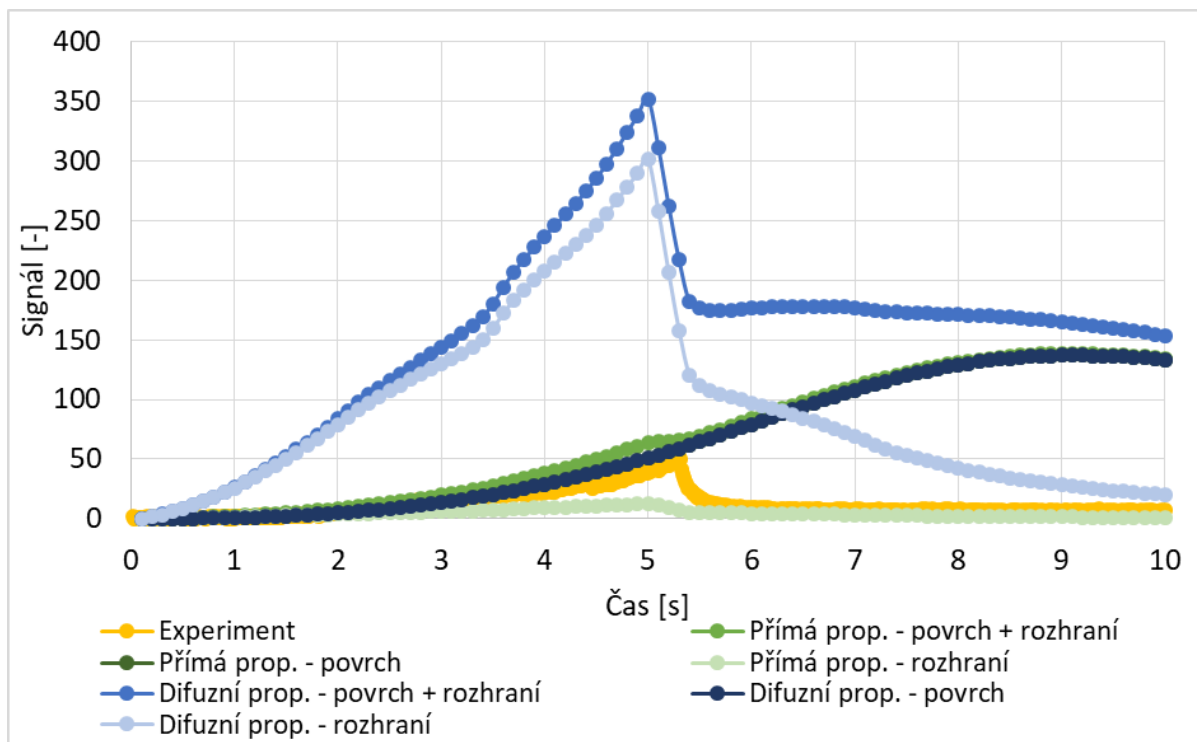
Jaký koeficient násobení signálu z výpočtu použít, nebylo dáno. Pro různé koeficienty a různé použité filtry vycházely výsledky různě. Příklad různých koeficientů pro stejné signály je porovnán na Obr. 5.37 a Obr. 5.38. Příklady toho, že necháme stejný koeficient, kterým jsou hodnoty z výpočtu vynásobeny, ale změníme použité optické filtry, jsou uvedeny na Obr. 5.39 – 5.41. V těchto případech byl zvolen koeficient 2 500 stejně jako na Obr. 5.37, kde závěrem bylo, že během pálení laseru je vhodnější použít přímou propustnost a po vypnutí laseru neodpovídají experimentu ani jedny hodnoty signálu ze simulace.



Obr. 5.39: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a filtr SP3100. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.

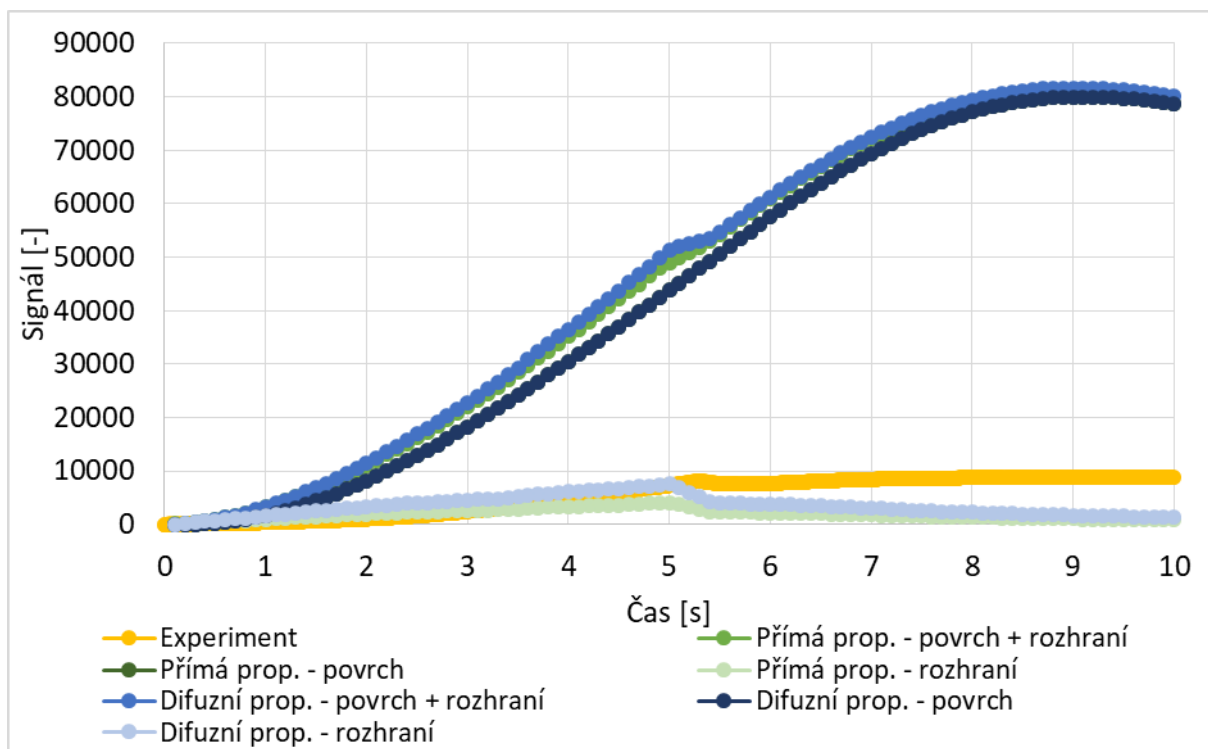
Na Obr. 5.39 je uvedena verze pro filtr SP3100. Signál z experimentu je poměrně malý v porovnání se signálem při použití filtru SP2600. V tomto případě je signál pro difuzní propustnost několikanásobně vyšší, protože signál z povrchu a zejména signál z rozhraní jsou vyšší než v experimentu. Vyzařování pro přímou propustnost je rovněž vyšší kvůli vyššímu signálu z povrchu. Nejlépe experimentu odpovídá signál z rozhraní pro přímou propustnost, který alespoň řádově souhlasí. Maximum signálu z experimentu je v čase dále než v simulaci, protože v experimentu páčil laser o 0,3 s déle. Závěr z tohoto výpočtu je, že nejlépe s experimentem souhlasí signál z rozhraní pro přímou propustnost, takže se zdá, že by filtr SP3100 propouštěl jen signál z rozhraní a nedetekoval signál na povrchu.

Velmi podobné průběhy signálu jako pro filtr SP3100 lze vidět pro filtr WG12012-C na Obr. 5.40. Je nutné podotknout, že signál z měření je pro výkon 45 W, ale v simulaci se počítalo s výkonem 36 W. Neproběhlo žádné měření s filtrem WG12012-C a výkonem 36 W, se kterým bychom mohli porovnávat. V experimentu jsou tedy vyšší teploty, a tím pádem i signál by měl být o něco vyšší než v simulaci. Signály z výpočtu jsou o něco nižší než pro předchozí filtry. Opět je signál s difuzní propustností mnohonásobně vyšší z důvodů vyšších signálů na rozhraní i povrchu. Celkový signál pro přímou propustnost je v době pálení laseru velmi podobný experimentu, ale poté stále roste kvůli signálu z povrchu, ale signál z experimentu klesá. V prvních pěti sekundách se tedy lépe jeví přímá propustnost, ale po ukončení pálení laseru neodpovídá experimentu ani jedna simulace.



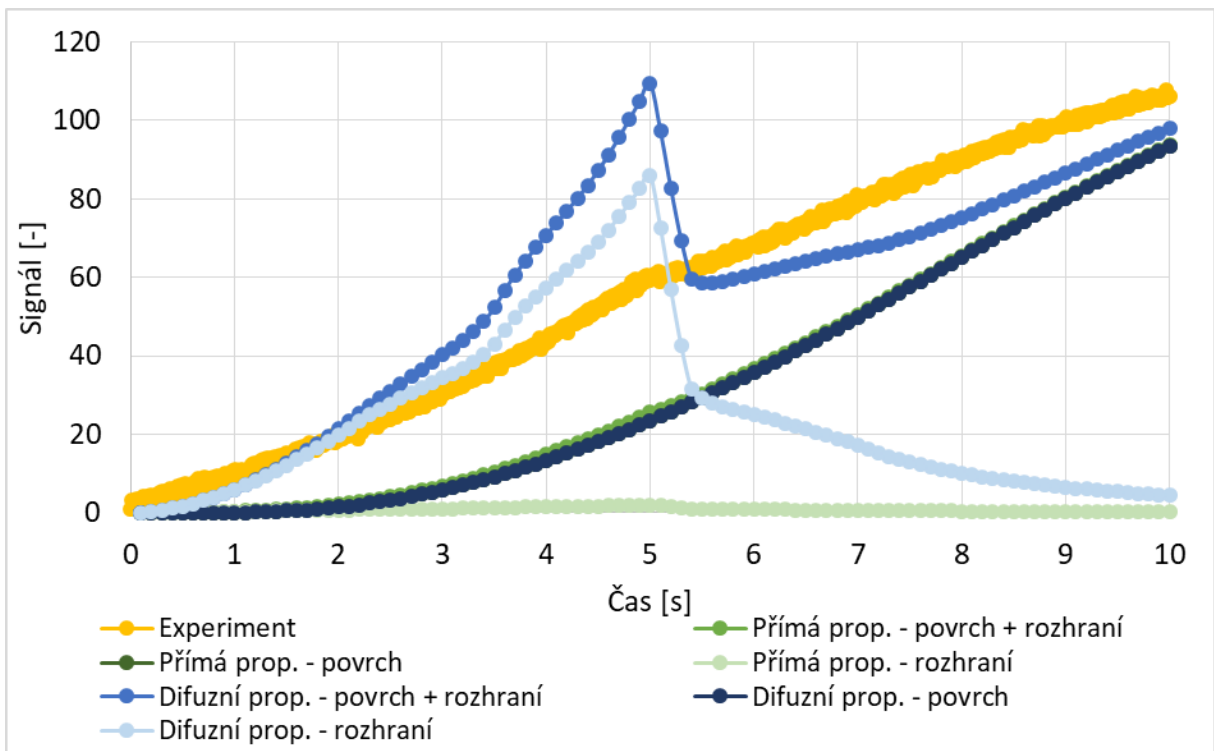
Obr. 5.40: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a filtr WG12012-C (sklo). Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.

Nakonec v sérii pro horní plast o tloušťce 1 mm a koeficient násobení 2500 uvádím graf pro měření bez filtru (viz Obr. 5.41). Síla signálu z experimentu bez filtru je mnohonásobně vyšší než při použití filtrů. Z výpočtů vychází ještě větší signály pro oba druhy propustnosti. Ty jsou dány velmi vysokým signálem z povrchu. Naopak signál z rozhraní pro difuzní propustnost má v první půlce simulace řádově shodné hodnoty signálu, takže se pro tento případ dá říct, že experiment při pálení laseru skutečně detekuje signál z rozhraní.

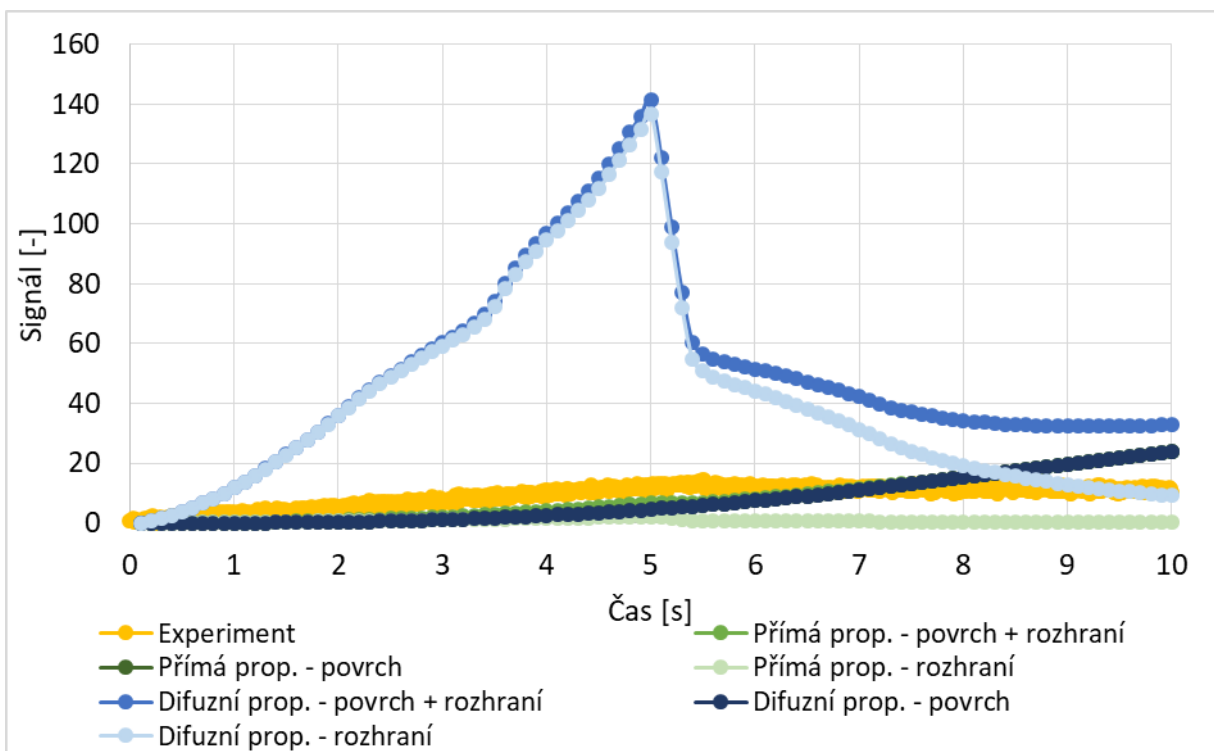


Obr. 5.41: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Případ pro horní plast o tloušťce 1 mm a bez filtru. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.

Následuje diskuze k verzím, kde má horní plast tloušťku 2 mm. Nejprve ponecháme koeficient, jímž jsou násobeny signály z výpočtů, stejný jako v případech pro tloušťku 1 mm (2 500), abychom mohli porovnat výsledky. Na Obr. 5.42 jsou znázorněny křivky pro horní plast o tloušťce 2 mm, filtr SP2600 a koeficient 2 500. V případě 1 mm tlustého horního plastu v tomto nastavení odpovídala experimentu nejlépe přímá propustnost, ale jen během pálení laseru. V tomto případě nesouhlasí s experimentem ani jedna verze. Přímá propustnost je nižší než experiment, protože pro ní není detekován téměř žádný signál z rozhraní. Difuzní propustnost odpovídá hodnotami více experimentu, ale tvar křivky si není podobný. V čase 3 – 5 s signál ze simulace roste výrazně rychleji než pro experiment, který roste mírně po celou dobu simulace. Zde tedy nelze vyslovit, která propustnost je vhodnější.



Obr. 5.42: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm a filtr SP2600. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.



Obr. 5.43: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm a filtr SP3100. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.

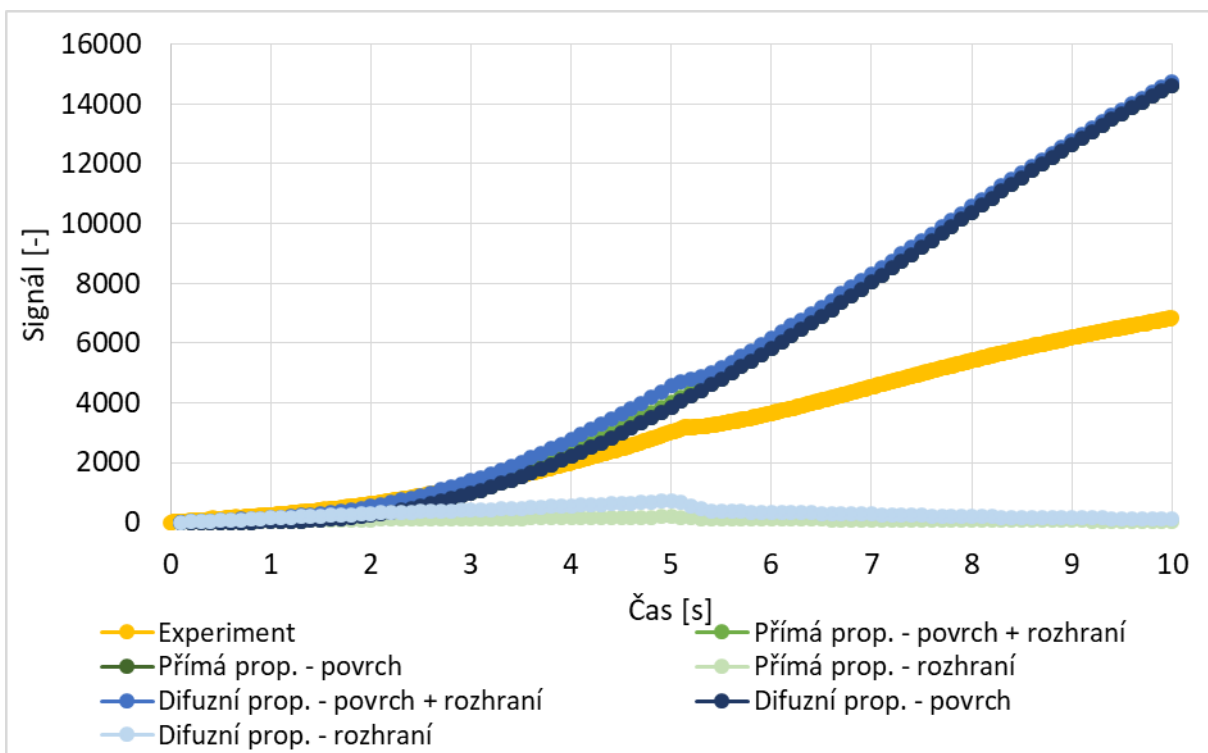
Tvar všech křivek pro filtry SP3100 a WG12012-C jsou téměř shodné, jen pro filtr WG12012-C jsou o něco nižší hodnoty signálu. Například maximální hodnota signálu pro difuzní propustnost je pro WG12012-C o 40 jednotek menší než pro filtr SP3100. Proto zde uvádím a diskutuji jen graf pro filtr SP3100 (viz Obr. 5.43). Stejně jako pro horní plast o tloušťce 1 mm je signál pro difuzní propustnost výrazně vyšší než signál z experimentu, protože signál z rozhraní je velký. Pro přímou propustnost si křivky odpovídají více, ale po vypnutí laseru signál z experimentu spíše klesá, kdežto signál z výpočtu roste. Zde tedy neodpovídá experimentu ani jedna propustnost.

Poslední porovnání v této kapitole bude pro měření bez filtru a 2 mm tlustý horní polymer. Na Obr. 5.44 jsou znázorněny křivky vynásobené koeficientem 2 500 a na Obr. 5.45 koeficientem 1 667. Přímá a difuzní propustnost pro oba případy téměř splývá, protože signál z povrchu mají shodný a signál z rozhraní je pro difuzní propustnost jen mírně vyšší. Pro horní plast o tloušťce 1 mm, koeficient 2 500 a verzi bez filtru byly hodnoty ze simulace pro obě propustnosti výrazně vyšší než signál z experimentu. Zde se v průběhu pálení laseru celkem blíží experimentu, ale pokud simulaci vynásobíme menším koeficientem 1 667 (viz Obr. 5.45), dostaneme ještě větší shodu. Lépe se zde jeví difuzní propustnost, která obsahuje „zub“ na konci pálení stejně jako experiment. Po ukončení pálení laseru je ale opět signál ze simulace vyšší kvůli signálu z povrchu. Pokud bychom ale nechali koeficient 2 500, pak je asi lepší zvolit přímou propustnost, která má hodnoty blíže experimentu. Máme zde tedy stejný trend jako pro horní plast o tloušťce 1 mm a filtr SP2600, kde pro koeficient 2 500 bylo lepší zvolit přímou propustnost a pro koeficient 1 667 difuzní propustnost.

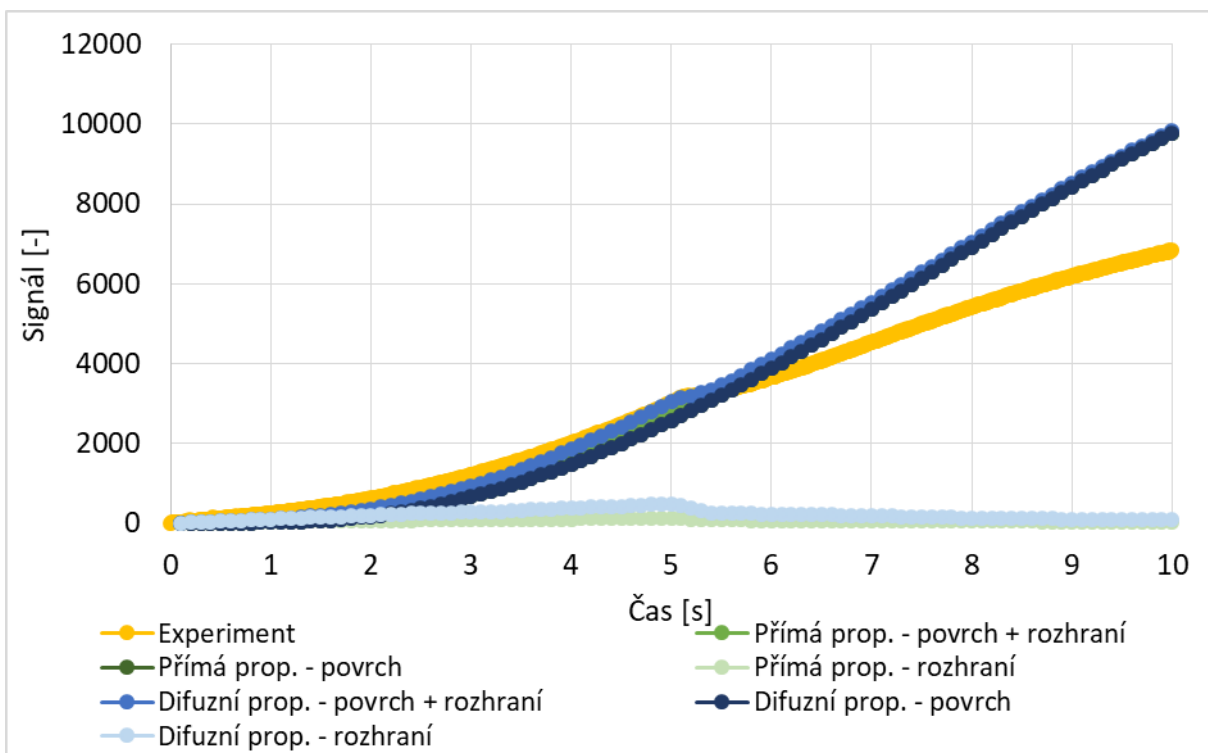
Na závěr této kapitoly uvádím v Tab. 5.1 shrnutí výše porovnávaných kombinací tloušťky plastů, optických filtrů a koeficientů násobení simulace. V tabulce je uvedena jejich vhodnost použití s verzí přímé i difuzní propustnosti.

*Tab. 5.1: Porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase ze simulace s experimentem pro verzi s přímou a difuzní propustností horního plastu. V tabulce jsou uvedeny různé kombinace tloušťky horního plastu, optických filtrů a koeficientu násobení křivek v simulaci.*

<b>Tloušťka horního plastu</b>	<b>Optický filtr</b>	<b>Koeficient násobení</b>	<b>Přímá propustnost</b>	<b>Difuzní propustnost</b>
1 mm	SP2600	2 500	ano, v době pálení	ne
	SP2600	1 667	ne	ano
	SP3100	2 500	ano, signál z rozhraní	ne
	WG12012-C	2 500	ano, v době pálení	ne
	bez filtru	2 500	ne	ne
2 mm	SP2600	2 500	ne	ne
	SP3100	2 500	ano, v době pálení	ne
	WG12012-C	2 500	ano, v době pálení	ne
	bez filtru	2 500	ano, v době pálení	ne
	bez filtru	1 667	ne	ano, v době pálení



Obr. 5.44: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm a bez filtru. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 2 500.

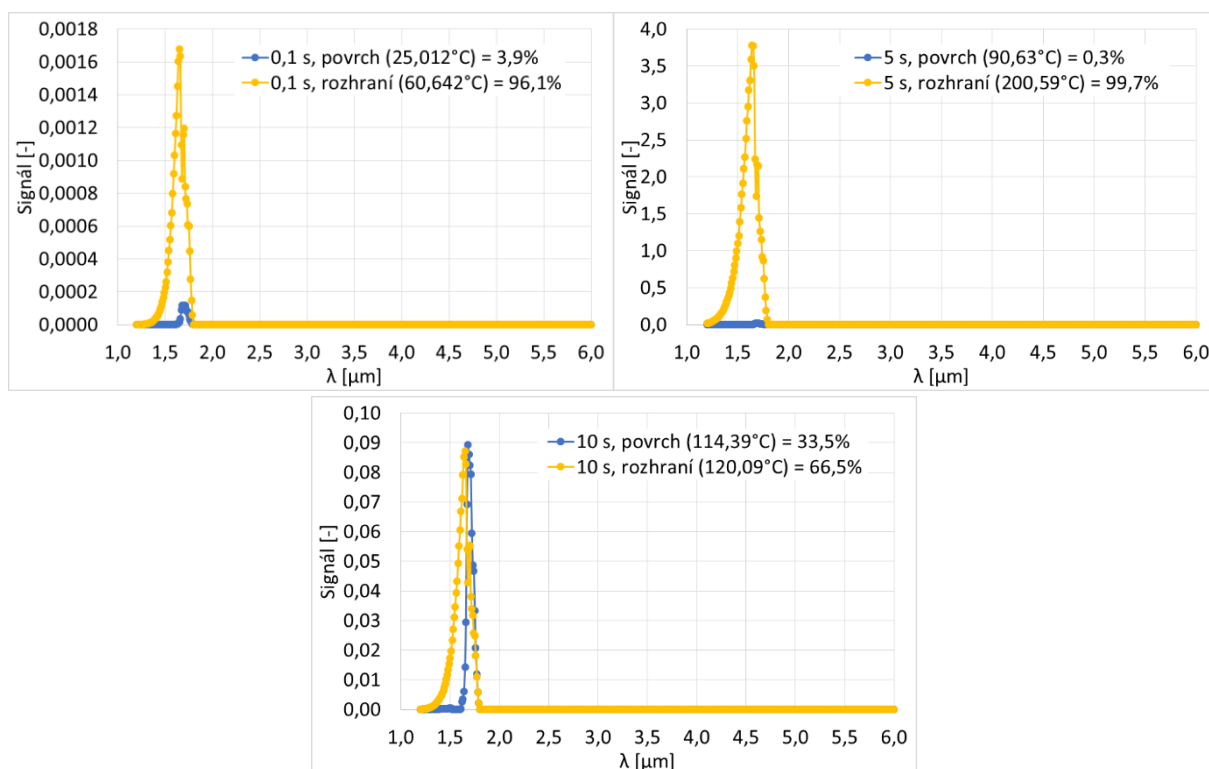


Obr. 5.45: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu je rovněž znázorněna křivka z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm a bez filtru. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 1 667.



## 5.2.2. Porovnání výpočtů s výsledky z kamery Hamamatsu C14041-10U

V této kapitole budou ze získaných časových průběhů teploty určeny časové závislosti intenzity vyzařování z rozhraní a povrchu vzorku. Vstupními teplotami do všech výpočtů byly opět křivky výchozího modelu (Obr. 5.5 – Obr. 5.7). Výsledky výpočtů budou porovnány s měřením pomocí kamery Hamamatsu C14041-10U, jež má citlivost v rozsahu 0,95 – 1,7  $\mu\text{m}$ . Tato kamera tedy pracuje v kratších vlnových délkách než kamera FLIR SC7650, a proto by měla být vhodnější pro měření vyzařování z rozhraní. Byl zde použit filtr pro odstínění vlnových délek kratších než 1,25  $\mu\text{m}$ , aby se zabránilo ovlivnění signálu intenzivním laserovým světlem.

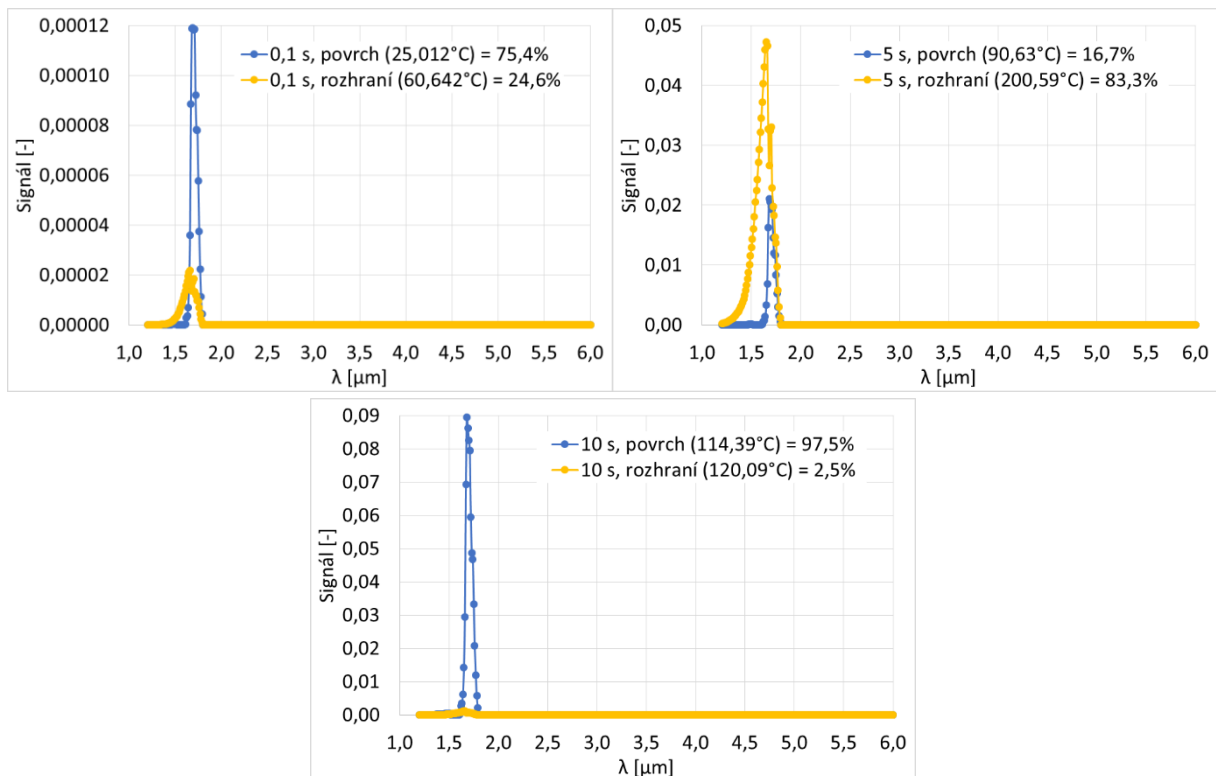


Obr. 5.46: Signál vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s v závislosti na vlnové délce. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a difuzní propustnost. Křivky jsou vynásobeny koeficientem 10 000.

Spektrální intenzita vyzařování je stejná jako pro kameru FLIR SC7650 (viz Obr. 5.34), protože nezávisí na volbě kamery. Signály infračerveného vyzařování z povrchu a rozhraní už se ale liší. Pokud chceme signál z povrchu, musíme spektrální intenzitu vyzařování vynásobit emisivitou horního plastu (Obr. B.3), citlivostí kamery (Obr. B.4) a krokem výpočtu. Při výpočtu signálu vyzařování z rozhraní nahradíme emisivitu horního plastu jeho propustností. Opět používáme dvě verze propustnosti, difuzní (Obr. B.1) a přímou (Obr. B.2). Na Obr. 5.46 je znázorněn signál vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s v závislosti na vlnové délce pro horní plast o tloušťce 1 mm a difuzní propustnost. Pro lepší názornost jsou opět křivky vynásobeny koeficientem 10 000. V legendě je uveden čas simulace, jestli jde o signál z povrchu či rozhraní, teplota a kolik procent signálu je z rozhraní a kolik z povrchu. Kamera FLIR SC7650 detekovala signál zejména z povrchu, ale zde vidíme, že většina signálu

je z rozhraní (více než 90 %). Jen na konci simulace je podíl vyzařování z povrchu větší (33,5 %). V grafech je vidět, že kamera je citlivá na vyzařování ve vlnových délkách 1,25 – 1,7  $\mu\text{m}$ , kde se nachází velký pík hodnot signálu. Pro větší vlnové délky kamera už žádný signál nedetekuje. Maximální signál vyzařování je v čase 5 s, kdy i teploty jsou nejvyšší.

Pro porovnání, jaký je rozdíl mezi přímou a difuzní propustností, je na Obr. 5.47 znázorněn signál vyzařování z povrchu a rozhraní v závislosti na vlnové délce pro stejné nastavení jako na Obr. 5.46, jen je zde uvažována přímá propustnost místo difuzní. Vidíme, že největší (a též jediný) pík se nachází ve stejných vlnových délkách jako pro difuzní propustnost, ale tentokrát je po většinu času simulace větší část vyzařování z povrchu. V čase 0,1 s je 75,4 % signálu z povrchu, v čase 5 s se situace otočí a z povrchu je jen 16,7 % signálu a v čase 10 s je naprostá většina vyzařování z povrchu (97,5 %). Zda je většina signálu z rozhraní či povrchu, závisí na čase během simulace. Maximální hodnoty signálu jsou pro přímou propustnost menší než pro difuzní propustnost a největší signál je detekován v čase 5 s.

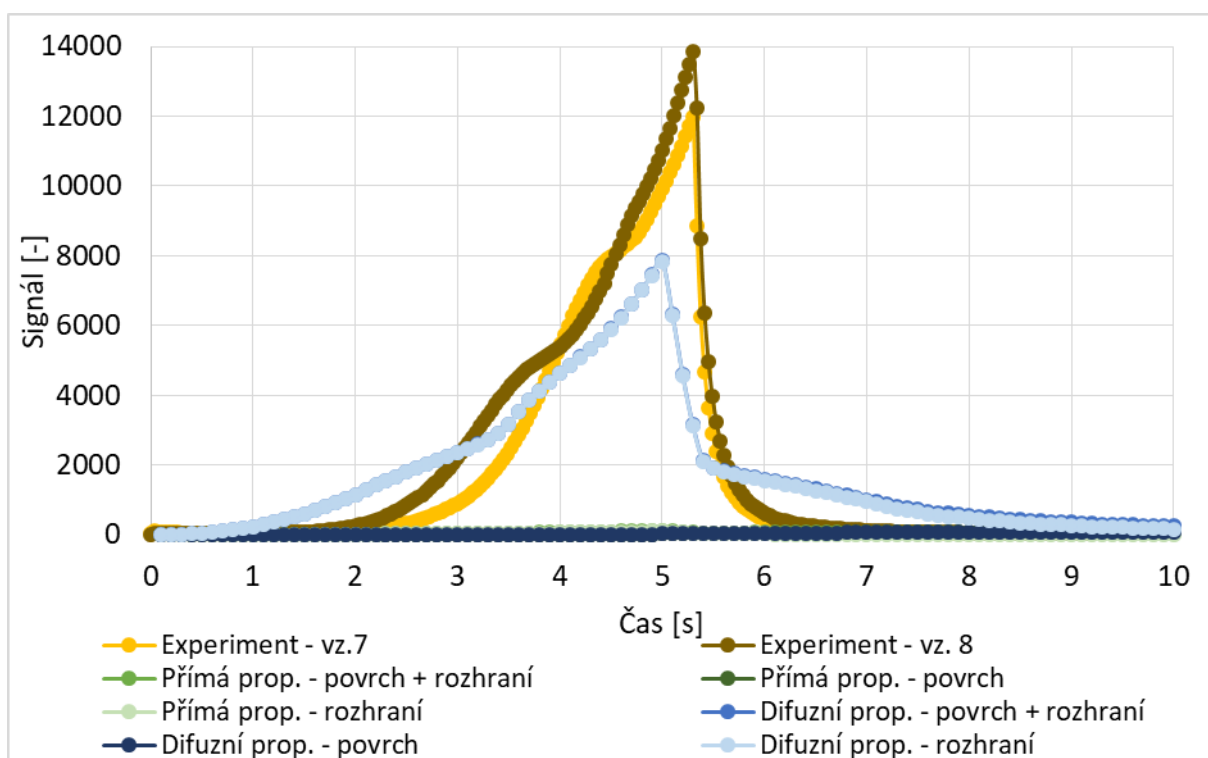


Obr. 5.47: Signál vyzařování z povrchu a rozhraní v časech 0,1 s, 5 s a 10 s v závislosti na vlnové délce. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm a přímou propustnost. Křivky jsou vynásobeny koeficientem 10 000.

Následuje, stejně jako v předchozí kapitole, porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase s experimentem. I zde bylo nutné upravit signály tak, aby byly porovnatelné. Od signálu z experimentu byl odečten průměr signálu v čase před pálením laseru. Signály ze simulace byly vynásobeny nějakým koeficientem tak, aby co nejlépe odpovídaly experimentům. Dále budou ukázky pro násobení koeficientem 120, kdy se s experimentem více shoduje difuzní propustnost a koeficientem 9 500, pro který s experimentem více souhlasí

přímá propustnost. V následujících grafech je znázorněn signál vyzařování v závislosti na čase pro dvě experimentální měření se stejnými parametry, pro rozhraní, povrch a součet signálu z povrchu a rozhraní pro difuzní i přímou propustnost.

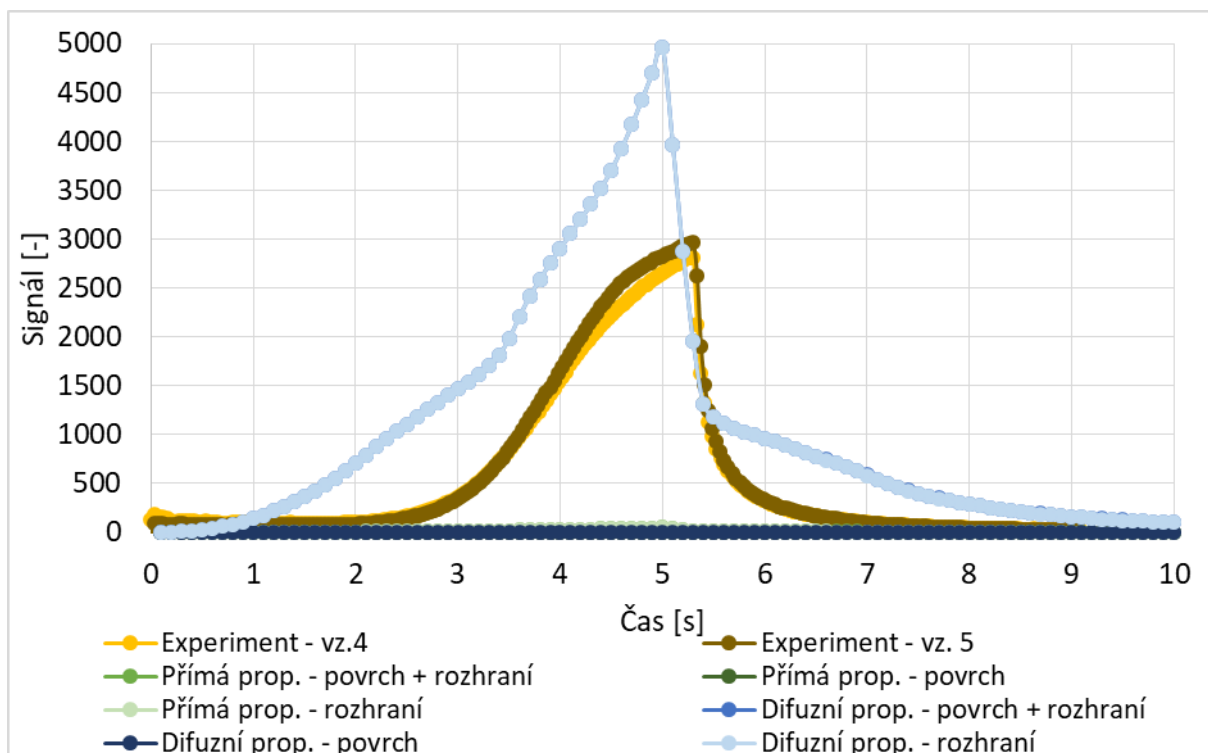
Na Obr. 5.48 je znázorněn signál vyzařování v závislosti na čase pro horní polymer o tloušťce 1 mm a koeficient 120, jímž jsou vynásobeny signály ze simulace. Signál z povrchu je pro přímou a difuzní propustnost stejný, protože nezávisí na propustnosti horního plastu, a je velmi malý. Signál z rozhraní pro přímou propustnost je rovněž velmi malý. Součet signálů pro přímou propustnost je maximální v čase 5 s, kdy dosahuje 120 jednotek signálu. Naopak signál pro difuzní propustnost je výrazně vyšší, protože jeho signál z rozhraní je vysoký. Průběh s experimentem je podobný. V čase pálení laseru roste a po vypnutí laseru klesá k nule. Maximum v experimentu je v čase déle, protože při experimentu páčil laser o 0,3 s déle než v simulaci. V čase 5 s je velikost signálu ze simulace o více než 3 000 jednotek signálu menší, než signál z experimentu pro vzorek číslo 8.



Obr. 5.48: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu jsou rovněž dvě křivky z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 120.

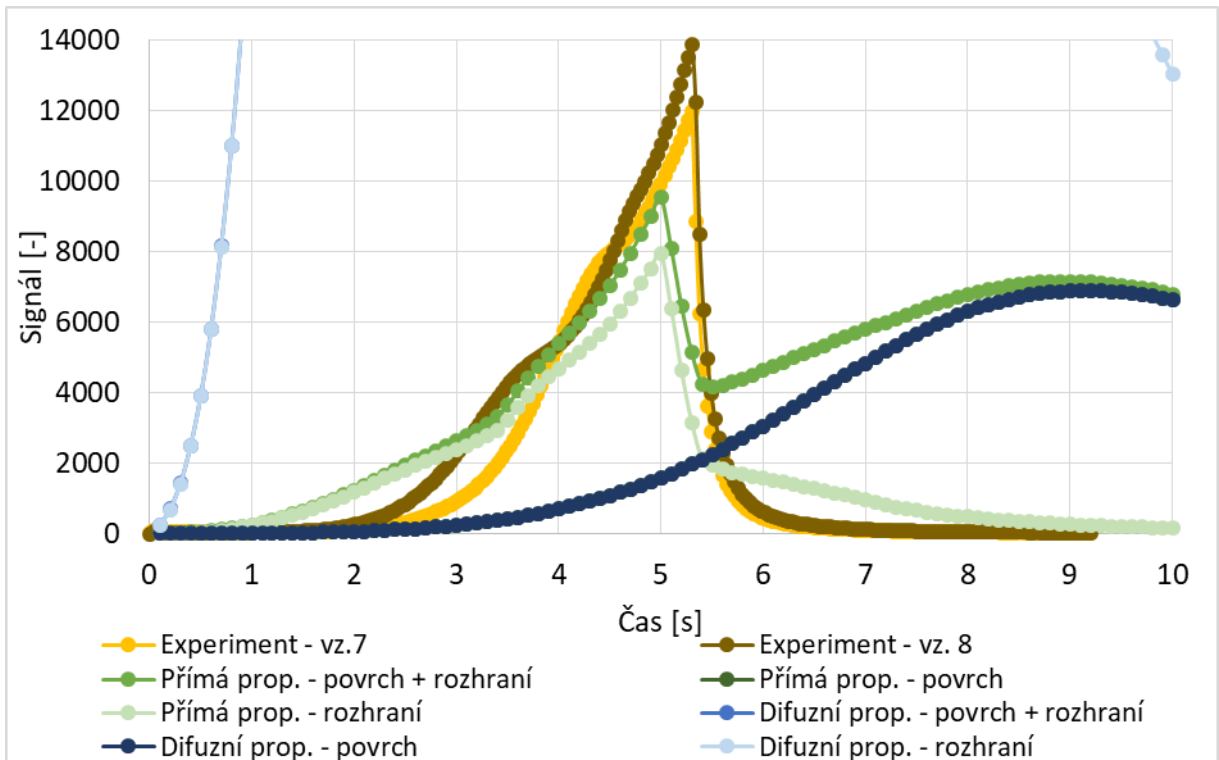
Na Obr. 5.49 je stejné nastavení parametrů jako na Obr. 5.48, jen horní plast má tloušťku 2 mm. Všechny signály jsou zde přirozeně menší, protože horní plast je tlustější. Signál z experimentů je přibližně čtvrtinový oproti Obr. 5.48. Trendy jsou podobné jako pro 1 mm tlustý horní plast. Signál z povrchu je minimální. Signál z rozhraní pro přímou propustnost rovněž nedosahuje vysokých hodnot, takže celkový signál pro přímou propustnost je malý. Maximální signál je v čase 5 s o velikosti 47 jednotek signálu. Průběh celkového signálu pro difuzní propustnost, jež téměř splývá se signálem z rozhraní, je podobný jako pro 1 mm

tlustý plast, ale jeho hodnoty jsou vyšší, než hodnoty z experimentů. V čase 5 s je signál pro difuzní propustnost o více než 2 000 jednotek vyšší než signál z experimentu pro vzorek číslo 5. Pro koeficient násobení 120 se experimentu více podobá difuzní propustnost, ale pro horní plast o tloušťce 1 mm dosahuje nižších hodnot než experiment a pro 2 mm tlustý horní polymer vyšších hodnot než experiment. Najít takový koeficient, aby pro obě tloušťky horního plastu difuzní propustnost hodnotami odpovídala experimentu, není možné. Můžeme říci, že kamera snímá signál z rozhraní, protože signál z povrchu je téměř nulový.

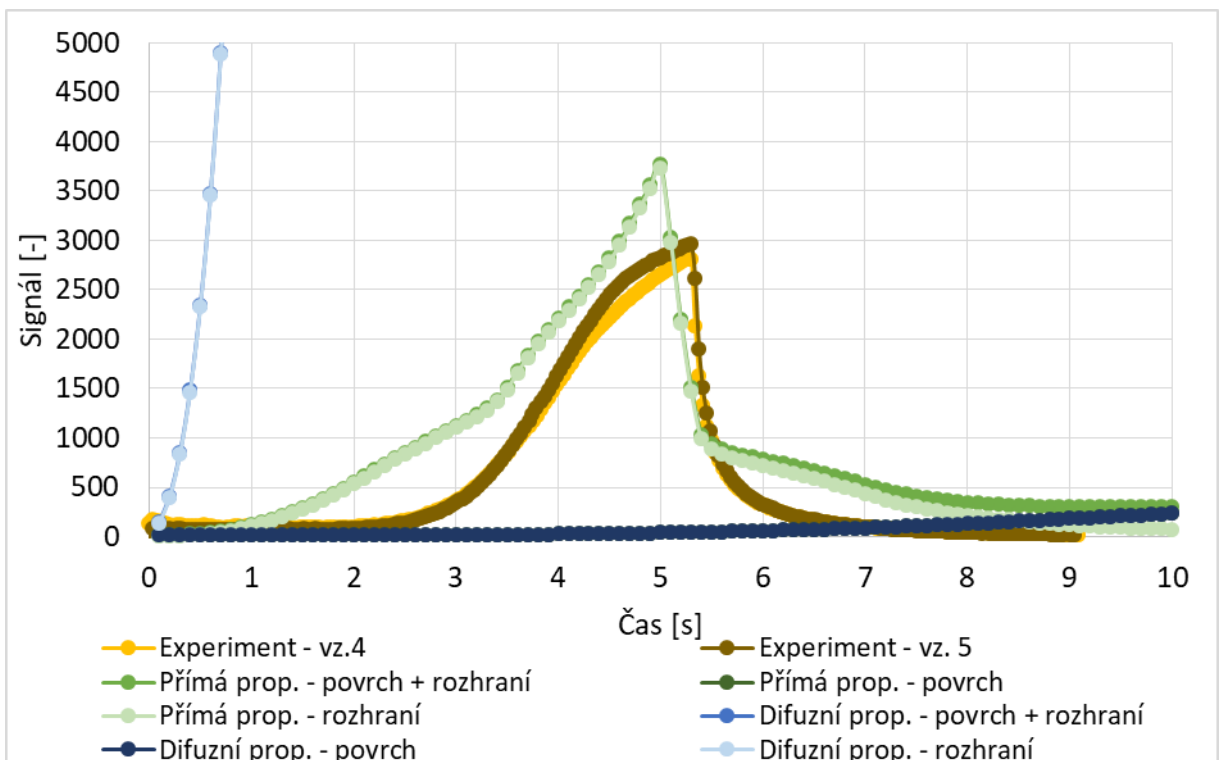


Obr. 5.49: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu jsou rovněž dvě křivky z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 120.

Následuje stejné porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase, ale tentokrát pro koeficient násobení 9 500. Na Obr. 5.50 jsou signály vyzařování pro horní polymer o tloušťce 1 mm. Pro koeficient 9 500 je situace opačná, než pro koeficient 120. Signál pro difuzní propustnost je kvůli signálu z rozhraní mnohonásobně větší než signály z experimentů. Pro maximální hodnotu v čase 5 s je simulace s difuzní propustností téměř 57 krát větší než signál z experimentu pro vzorek číslo 8. Naopak signál pro přímou propustnost více odpovídá experimentům. Během pálení laseru mají podobný průběh, ale po vypnutí pálení laseru a krátkém poklesu signálu začne signál pro přímou propustnost dále růst, protože signál z povrchu stále roste. Maximální hodnoty signálu s přímou propustností jsou nižší než hodnoty z experimentů. V čase 5 s je signál ze simulace o 1203 jednotek signálu menší než experiment pro vzorek číslo 8.



Obr. 5.50: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu jsou rovněž dvě křivky z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 1 mm. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 9 500.



Obr. 5.51: Signál vyzařování v závislosti na čase z povrchu, rozhraní a součet signálu z povrchu a rozhraní pro verzi s přímou i difuzní propustností. V grafu jsou rovněž dvě křivky z experimentu. Příklad pro horní plast o tloušťce 2 mm. Křivky ze simulace jsou vynásobeny koeficientem 9 500.

Porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase s experimentem pro tloušťku horního plastu 2 mm a koeficient 9 500 je na Obr. 5.51. Signál pro difuzní propustnost je zase mnohonásobně vyšší než signály z experimentu, protože signál z rozhraní je velmi vysoký. V čase 5 s je signál dokonce 139 krát vyšší než signál z experimentu pro vzorek číslo 5. Signál pro přímou propustnost opět více souhlasí s experimenty, ale zde jsou hodnoty vyšší než experiment. V čase 5 s je signál pro přímou propustnost o 978 jednotek signálu vyšší než experiment pro vzorek číslo 5. Po vypnutí laseru zde přímá propustnost více souhlasí s experimentem, protože signál z povrchu roste pomaleji, než pro tenčí horní plast. Pro koeficient 9 500 lze vyslovit závěr, že signál pro difuzní propustnost je mnohonásobně větší než signál z experimentů a experimentům více odpovídá signál pro přímou propustnost. Ten je pro horní plast o tloušťce 1 mm nižší než experiment a pro 2 mm tlustý horní plast vyšší než experiment. Po vypnutí laseru pro horní plast o tloušťce 1 mm už ani signál z přímé propustnosti neodpovídá experimentu, ale pro horní plast o tloušťce 2 mm je podobnost větší.

V Tab. 5.2 je znázorněno shrnutí výše porovnávaných kombinací tloušťky plastů a koeficientů násobení simulace. V tabulce je uvedena jejich vhodnost použití s verzí přímé i difuzní propustnosti.

*Tab. 5.2: Porovnání signálu vyzařování v závislosti na čase ze simulace s experimentem pro verzi s přímou a difuzní propustností horního plastu. V tabulce jsou uvedeny různé kombinace tloušťky horního plastu a koeficientu násobení křivek v simulaci.*

<b>Tloušťka horního plastu</b>	<b>Koeficient násobení</b>	<b>Přímá propustnost</b>	<b>Difuzní propustnost</b>
1 mm	120	ne	ano, ale nižší hodnoty signálu
	9 500	ano, jen v čase pálení a nižší hodnoty signálu	ne
2 mm	120	ne	ano, ale vyšší hodnoty signálu
	9 500	ano, ale vyšší hodnoty signálu	ne

## 6. Závěr

Prvním cílem této diplomové práce bylo provést rešerši problematiky modelování a měření tepelných procesů při laserovém svařování plastů. V kapitole 2 je shrnut současný stav problematiky. Tato kapitola obsahuje podkapitoly na téma laser, laserové svařování plastů a modelování laserového svařování plastů. V kapitole o laseru je vysvětlen jeho princip, jsou uvedeny vlastnosti a typy laserů a jejich využití. Při laserovém svařování plastů jsou důležité materiálové vlastnosti plastů a využívané laserové zdroje. V této kapitole je rovněž popsán proces laserového svařování a měření procesů při svařování plastů. V poslední části o modelování laserového svařování plastů jsou shrnuty současné poznatky v simulaci této problematiky.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo sestavit a odladit numerický model pro transmisní laserové svařování. V softwaru COSMOSM byl vytvořen výchozí model pro výpočet rozložení teploty ve vzorku a pro získání časových závislostí teploty na povrchu a rozhraní vzorku. Parametry výchozího modelu jsou uvedeny v Tab. 4.1. V programu Matlab byly použity časové průběhy teploty získané softwarem COSMOSM, jež se využily na výpočet časové závislosti intenzity vyzařování z rozhraní a povrchu vzorku.

V kapitole 5.1 jsou znázorněny rozložení teploty a časové průběhy teploty na povrchu a rozhraní pro výchozí model. Dále je zde diskutován vliv materiálových a procesních parametrů na časové průběhy teploty. Bylo zjištěno, že se zvyšující se propustností horního plastu roste teplota jak na povrchu, tak na rozhraní vzorku. Se zvyšující se tepelnou vodivostí použitého materiálu roste teplota na povrchu vzorku, ale na rozhraní teplota klesá. Při svařování plastů dochází k jejich tavení, tj. prochází fázovou přeměnou. Kdyby se fázová přeměna neuvažovala v simulaci, na rozhraní i povrchu bychom získali vyšší hodnoty teploty, než jsou dosaženy ve výchozím modelu, který fázovou přeměnu zahrnuje. Se zvyšujícími se násobky závislosti tepelné kapacity na teplotě se snižuje teplota na povrchu i rozhraní vzorku. Poslední materiálovou vlastností diskutovanou v této práci je vliv přestupu tepla na časový průběh. Bylo zjištěno, že koeficient přestupu tepla mezi vzorkem a kovem, ve kterém je vzorek přichycen, neovlivňuje teplotu ve vzorku a koeficient přestupu tepla ze vzorku do okolního vzduchu má jen velmi malý vliv na teplotu na povrchu a rozhraní.

V poslední podkapitole kapitoly 5.1 je diskutován vliv parametrů procesu. Čím déle laser pálí, tím větší teploty na rozhraní i povrchu budou a tím více plastu bude roztaveno. Pokud zvyšujeme dodávaný výkon, teplota bude na rozhraní i povrchu růst a tavenina se bude zvětšovat. Pokud zvolíme příliš malou hodnotu výkonu nebo příliš krátký čas pálení laseru, k tavení materiálu vůbec nemusí dojít, takže nevznikne svar mezi vzorky. Dále byl prozkoumán tvar laserového spotu, jehož reálný tvar je velmi těžko napodobitelný. Ve výchozím modelu je používán konstantní výkon, tj. do všech uzlů výpočetní sítě je zadávána stejná velikost výkonu, což je velké zjednodušení. Pro přiblížení k realitě byl vytvořen Gaussův profil výkonu. V rozložení teploty je v okolí rozhraní v době pálení laseru velký rozdíl oproti výchozímu modelu. Tvar vzniklé taveniny se liší, což je stěžejní pro vytvoření kvalitního svaru. Po vypnutí

laseru se rozdíl smazávají. V časových průbězích teploty na povrchu není téměř žádný rozdíl při volbě různého tvaru laserového spotu, protože celkový výkon dodaný do materiálu je stejný. Na rozhraní už je průběh teploty rozdílný, protože je přímo závislý na velikosti výkonu v jednotlivých uzlech. Bylo zjištěno, že pro vznik homogenní taveniny a všude stejně pevného svaru, by bylo ideální mít konstantní profil výkonu. Dále je ještě zkoumán průběh teploty podél rozhraní a na povrchu v čase 5 s. Na povrchu není rozdíl příliš velký, ale na rozhraní teplota kopíruje tvar laserového spotu.

Další částí diplomové práce bylo porovnání intenzity tepelného vyzařování z povrchu a rozhraní v závislosti na čase se signálem naměřeným kamerou FLIR SC7650 a kamerou Hamamatsu C14041-10U. Stejně jako v první části výsledků i zde se používaly dvě varianty vzorků, jeden s tloušťkou horního plastu 1 mm a druhý s tloušťkou 2 mm. Při měření kamerou FLIR SC7650 byly používány různé optické filtry k oříznutí vyšších vlnových délek za účelem omezení detekování vyzařování z povrchu. Ve výsledcích byly porovnávány křivky pro přímou i difuzní propustnost horního polymeru. Aby byly signály z výpočtů porovnatelné s experimentem, musely se upravit a vždy násobit nějakým koeficientem. Pro různé kombinace výše zmíněných parametrů vychází různé výsledky, takže nelze jednoznačně vyslovit, jaká propustnost je vhodnější a jakým koeficientem by se měly výsledky násobit. Shrnutí porovnávaných signálů pro různé parametry a jejich souhlas s experimentem je uveden v Tab. 5.1.

V poslední části kapitoly 5 byly porovnávány výpočty intenzity tepelného vyzařování z povrchu a rozhraní v závislosti na čase s výsledky naměřenými kamerou Hamamatsu C14041-10U. Tato kamera má citlivost v kratších vlnových délkách než kamera FLIR SC7650, takže by měla být vhodnější pro měření vyzařování z rozhraní. Aby se signály mohly porovnat, bylo opět nutné signály ze simulace vynásobit určitým koeficientem. Pokud byl zvolen koeficient 120, více experimentům odpovídal výpočet s difuzní propustností. Tvar křivek relativně souhlasil, ale pro horní plast o tloušťce 1 mm byly hodnoty signálu nižší a pro 2 mm tlustý horní plast byly vyšší. Signál vyzařování z povrchu byl velmi malý, takže lze říci, že kamera skutečně detekuje signál hlavně z rozhraní. Při volbě koeficientu 9 500 naopak více odpovídaly experimentu výsledky s přímou propustností. Pro horní plast o tloušťce 1 mm byly hodnoty signálu o něco nižší a pro tlustý plast vyšší než signál z experimentu. Po vypnutí laseru zejména pro 1 mm tlustý horní plast signál z povrchu výrazně roste, a ovlivňuje tak i celkový signál pro přímou propustnost. Signál z experimentu se ale po vypnutí laseru blíží k nule, takže po ukončení pálení laseru už simulace experimentu příliš neodpovídá. Shrnutí porovnávaných signálů pro různé parametry a jejich souhlas s experimentem je uveden v Tab. 5.2.

Diplomová práce je součástí komplexně řešeného výzkumu v oblasti laserového svařování plastů a plastových kompozitů. Práce přispívá k pochopení vlivu parametrů procesu a vlastností materiálu na teplotní pole ve svařovaných materiálech a dále k pochopení problematiky emise infračerveného záření umožňujícího měření teplot na rozhraní plastů a případně kontroly a řízení procesu.



Další výzkum v oblasti analýzy tepelných procesů při laserovém svařování plastů by mohl směřovat k použití modelu a výpočtu vyzařování pro jiné materiály (např. PA6, PA66 nebo kompozit PA6 se skelnými vlákny), vylepšení modelu o časově proměnný zdroj tepla simulující přejezdy laserového svazku, o pohlcování laserového svazku na určité hloubce ve spodním plastu, započtení okrajové podmínky radiace, přidání pohybu roztaveného materiálu, umožnění výpočtu 3D úlohy s defektem (mezerou mezi plasty) a pro výpočet vyzařování rozdělení horního plastu na více hladin a výpočet vyzařování z každé hladiny s různou teplotou, emisivitou a propustností zvlášť.

## Seznam literatury

- [1] V. Sochor, *Lasery a koherentní svazky*. Academia, Praha, 1990, ISBN 80-200-354-1.
- [2] P. Engst, M. Horák, *Aplikace laserů*. SNTL, Praha, 1989, L11-E1-IV31/11940.
- [3] B. Mellish, *Stimulatedemission.png* (640×281) [online] [cit. 2017-11]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stimulatedemission.png>
- [4] R. Klein, *Laser Welding of Plastics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2012, ISBN 978-3-527-40972-3.
- [5] J. Tesař, *Termografie v plazmových a laserových technologiích*. [online] [cit. 2017-11], disertační práce, ZČU Plzeň, 2014.
- [6] D. Brych, *Přesnost měření teplotních polí pomocí IR termografie*. [online] [cit. 2017-11], bakalářská práce, ZČU Plzeň, 2014.
- [7] L. S. Mayboudi, *Heat Transfer Modelling and Thermal Imaging Experiments in Laser Transmission Welding of Thermoplastics*. Disertační práce, Queen's University, Kingston, Canada, 2008.
- [8] D. Rosenthal, *Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting*. Welding Journal – Welding Research Supplement, 1941, **20 (5)**, pp. 220s-234s.
- [9] C. Y. Kennish, H. R. Shercliff, *Heat flow model for laser welding of polymers*. ANTEC, 2002, pp. 1132-1136.
- [10] H. Potente, J. Korte, F. Becker, *Laser transmission welding of thermoplastics: analysis of the heating phase*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999, **18 (10)**, pp. 914 – 920.
- [11] A.Ch.A. Asséko, B. Cosson, M. Deleglise, F. Schmidt, Y. Le Maout, E. Lafranche. Analytical and numerical modeling of light scattering in composite transmission laser welding proces. International Journal of Material Forming, 2015, **8 (1)**, pp. 127-135.
- [12] M. Devrient, X. Da, T. Frick, M. Schmidt. Experimental and simulative investigation of laser transmission welding under consideration of scattering. Physics Procedia, 2012, **39**, pp. 117-127.
- [13] D. Grewell, *Applications with infrared welding of thermoplastics*. ANTEC, 1999, pp. 1411 – 1451.
- [14] R. Probhakaran, *Laser Transmission Welding of PA6*. Diplomová práce, Queen's University, Kingston, Canada, 2003.
- [15] Y. Kurosaki, T. Matayoshi, K. Sato, *Overlap welding of thermoplastic parts without causing surface thermal damage by using CO<sub>2</sub> laser*. ANTEC, 2003, pp. 1121 – 1125.

- [16] A. Shaban, R. Mahnken, L. Wilke, H. Potente, H. Ridder. *Simulation of rate dependant plasticity for polymers with asymmetric effects*. International Journal of Solids and Structures, 2007, **44**, pp. 6148-6162.
- [17] M. Ilie, J.C. Kneip, S. Mattei, A. Nichici, C. Roze, T. Girasole. *Through-transmission laser welding of polymers – temperature field modeling and infrared investigation*. Infrared Physics and Technology, 2007, **51**, pp. 73-79.
- [18] S.K. Sooriyapiragasam, Ch. Hopmann. *Modeling of the heating process during the laser transmission welding of thermoplastics and calculation of the resulting stress distribution*. Weld World, 2016, **60**, pp. 777-791.
- [19] Ch. Hopmann, S. Kreimeier. *Modelling the Heating Process in Simultaneous Laser Transmission Welding of Semicrystalline Polymers*. Journal of Polymers, 2016, Article ID 3824065, 10 pages.
- [20] K. Sato, Y. Kurosaki, T. Satio, I. Satoh. *Laser welding of plastics transmitting to near-infrared radiation*. Proceedings of SPIE, 2002, **4637**, pp. 528-536.
- [21] L.S. Mayboudi, A.M. Birk, G. Zak, P.J. Bates. *A 3-D thermal model for spot laser transmission welding of thermoplastics*. Welding in the World Journal, 2007, **51 (1/2)**, pp. 74-78.
- [22] L.S.Mayboudi, A.M. Birk, G. Zak, P.J. Bates. *A three-dimensional thermal finite element model of laser transmission welding for lap-joint*. International Journal of Modelling and Simulation, 2009, **29 (2)**, pp. 149-155.
- [23] L.S. Mayboudi, A.M. Birk, G. Zak, P.J. Bates. *Infrared observations and finite element modeling of a laser transmission welding process*. Journal of Laser Applications, 2009, **21 (3)**, pp. 111-118.
- [24] M. Speka, S. Mattei, M. Pilloz, M. Ilie. *The infrared thermography control of the laser welding of amorphous polymers*. NDT&E International, 2008, **41**, pp. 178-183.
- [25] D. Flock, M. Sickert, E. Haberstroh. *Temperature measurement in laser transmission welding of plastics*. International Polymer Science and Technology, 2013, **40 (4)**, pp. T1-T6.
- [26] D. Misra, B. Acherjee, A.S. Kuar, S. Mitra. *Transmission laser contour welding of polycarbonates with a moving laser beam: proces simulation via FEM*. MTM, 2011, **11**, pp. 11-14.
- [27] B. Acherjee, A.S. Kuar, S. Mitra, D. Misra. *Modeling of laser transmission contour welding process using FEA and DoE*. Optics & Laser Technology, 2012, **44 (5)**, pp. 1281-1289.
- [28] T. Mahmood, A. Mian, M.R. Amin, G. Auner, R. Witte, H. Herfurth, G. Newaz. *Finite element modeling of transmission laser microjoining process*. Journal of Materials Processing Technology, 2007, **186**, pp. 37-44.

- [29] M. Hohmann, M. Devrient, F. Klampfl, S. Roth, M. Schmidt. *Simulation of light propagation within glass fiber filled thermoplastics for Laser transmission welding*. Physics Procedia, 2014, **56**, pp. 1198-1207.
- [30] A. Schmailzl, S. Hierl, M. Schmidt. *Gap-bridging during quasi-simultaneous laser transmission welding*. Physics Procedia, 2016, **83**, pp. 1073-1082.
- [32] *Electronic Documentation of COSMOSM 2.95* [CD-ROM] [citováno 2018-04-24].
- [33] *MATLAB Programming Language* [online]. 2007-20018, Altius Directory [citováno 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.altiusdirectory.com/Computers/matlab-programming-language.php>
- [34] *Katalogový list materiálu Polyoxymethylen (POM)* [online]. PolyPLASTY s.r.o. [citováno 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.polyplasty.cz/polyoximetylen.html?mobile=0&lang=1>
- [35] *Databáze materiálových vlastností závislých na teplotě MBDB* [online]. 2018, JAHM Software, Inc. [citováno 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.jahm.com/index.html>

## Publikace autora

- [31] J. Martan, J. Tesař, M. Kučera, P. Honnerová, M. Benešová, M. Honner. *Analysis of short wavelength infrared radiation during laser plastics welding process*. Applied Optics, 2018, **57 (18)**, pp. D145-D154.

## Přílohy

### Příloha A – Skriptový soubor výchozího modelu v programu COSMOSM

C\*

C\* COSMOSM GeoStar 2007 (128K Version)

C\* Problem : Vz\_17\_31\_prop\_25\_vod Date : 04-27-2018 Time : 15:38:38

C\*

PT,1,0,0,0

PT,2,0.0107,0,0

PT,3,0.0125,0,0

PT,4,0.0143,0,0

PT,5,0.0250,0,0

PT,6,0.025,-0.001,0

PT,7,0.0135,-0.001,0

PT,8,0.0125,-0.001,0

PT,9,0.0115,-0.001,0

PT,10,0,-0.001,0

PT,11,0.0115,-0.003,0

PT,12,0.0115,-0.026,0

PT,13,0.0135,-0.026,0

PT,14,0.0135,-0.003,0

PT,15,0.0125,-0.0005,0

CRLINE,1,1,2

CRLINE,2,2,3

CRLINE,3,3,4

CRLINE,4,4,5

CRLINE,5,5,6

CRLINE,6,6,7

CRLINE,7,7,8

CRLINE,8,8,9

CRLINE,9,9,10

CRLINE,10,10,1

CRLINE,11,9,11

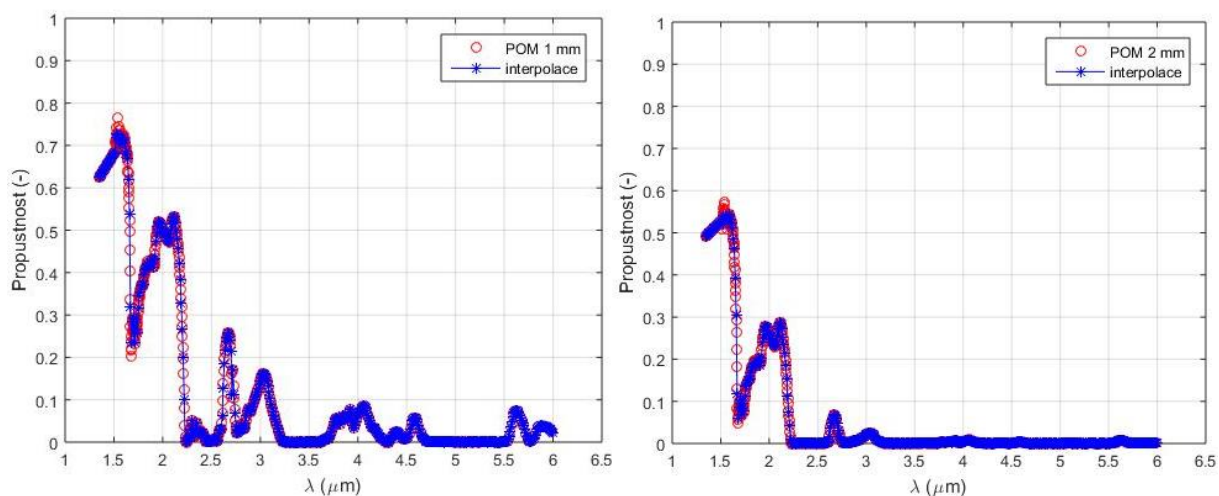
CRLINE,12,11,12

CRLINE,13,12,13

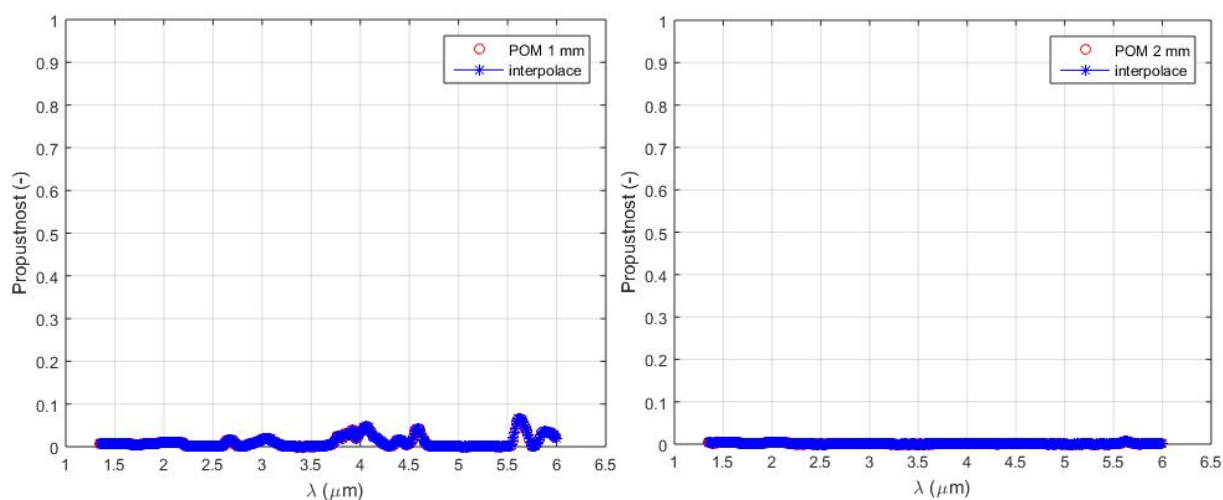
CRLINE,14,13,14  
CRLINE,15,14,7  
CTTOL,0.00001  
CT,1,0,0.0001,10,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,0  
CT,2,0,0.0001,7,11,12,13,14,15,7,8,0,1  
RG,1,1,1,0  
RG,2,1,2,0  
TOFFSET,273.15  
EGROUP,1,TRIANG,0,1,0,0,0,0,0  
RCONST,1,1,1,2,0.001,0  
MPROP,1,KX,0.25  
MPROP,1,DENS,1410  
CURDEF,TEMP,1,1,-50,453,0,544,25,765,50,1092,75,1353,100,1671,125,2209&  
,150,4083,160,12626,162,17540  
CURDEF,TEMP,1,11,164,14893,166,8096,168,2917,170,1806,175,1867,180,187&  
2,400,1874  
ACTSET,TP,1  
MPROP,1,C,1  
ACTSET,TP,0  
MA\_RG,1,1,1,3,1,0  
EGROUP,2,TRIANG,0,1,0,0,0,0,0  
RCONST,2,2,1,2,0.001,0  
MPROP,1,DENS,1410  
MPROP,1,KX,0.25  
CURDEF,TEMP,2,1,-50,1055,0,1151,25,1261,50,1545,75,1830,100,2195,125,2865&  
,150,5110,160,14678,162,20067  
CURDEF,TEMP,2,11,164,17283,166,10136,168,4642,170,2703,175,2579,180,258&  
8,400,2632  
ACTSET,TP,2  
MPROP,1,C,1  
ACTSET,TP,0  
MA\_RG,2,2,1,3,1,0  
NMERGE,1,8041,1,0.00001,0,1,0  
CECR,1,100,25,1,1,0  
CECR,2,10,25,3,1,0  
CECR,5,10,25,6,1,0

CECR,4,100,25,4,1,0  
CECR,9,10,25,10,1,0  
CECR,11,10,25,11,1,0  
CECR,12,100,25,14,1,0  
CECR,15,10,25,15,1,0  
INITIAL,TEMP,1,8041,1,25  
CURDEF,TIME,3,1,0,1,2,1,5,1,5.1,0.75,5.2,0.5,5.3,0.25,5.4,0,6,0,10,0  
QND,376,0.01329,396,1  
R\_CHECK,THERMAL  
TIMES,0,10,0.1  
A\_FFETHERMAL,T,2,0.00001,20,1  
ACTSET,TP,0  
R\_THERMAL

## Příloha B – Grafy veličin potřebných pro výpočet vyzařování v Matlabu

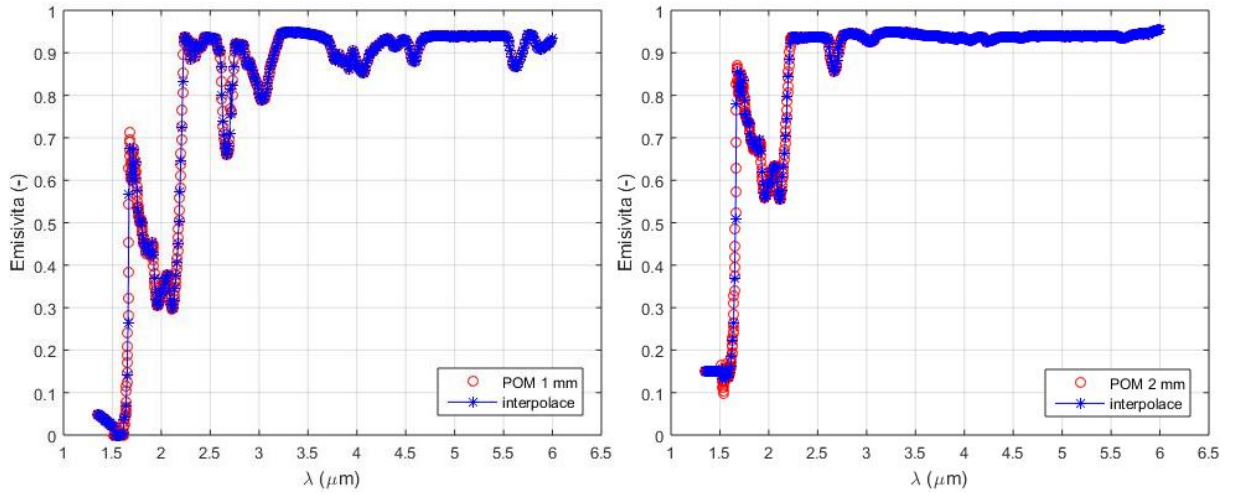


Obr. B.1: Spektrální difuzní propustnost  $\tau_{pol}$  horního polopropustného polymeru POM. Vlevo pro plast o tloušťce 1 mm, vpravo pro plast o tloušťce 2 mm.

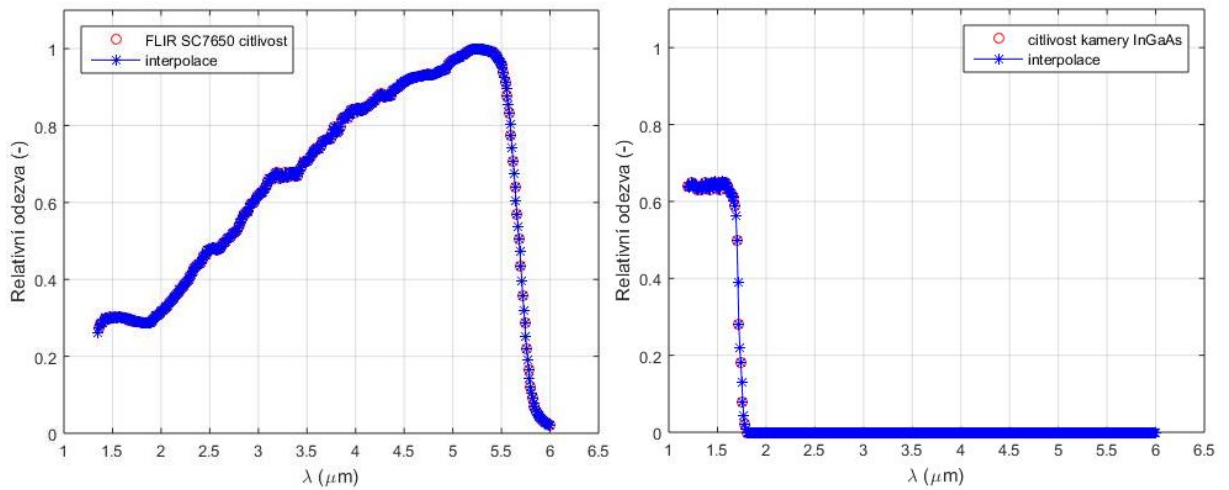


Obr. B.2: Spektrální přímá propustnost  $\tau_{pol}$  horního polopropustného polymeru POM. Vlevo pro plast o tloušťce 1 mm, vpravo pro plast o tloušťce 2 mm.

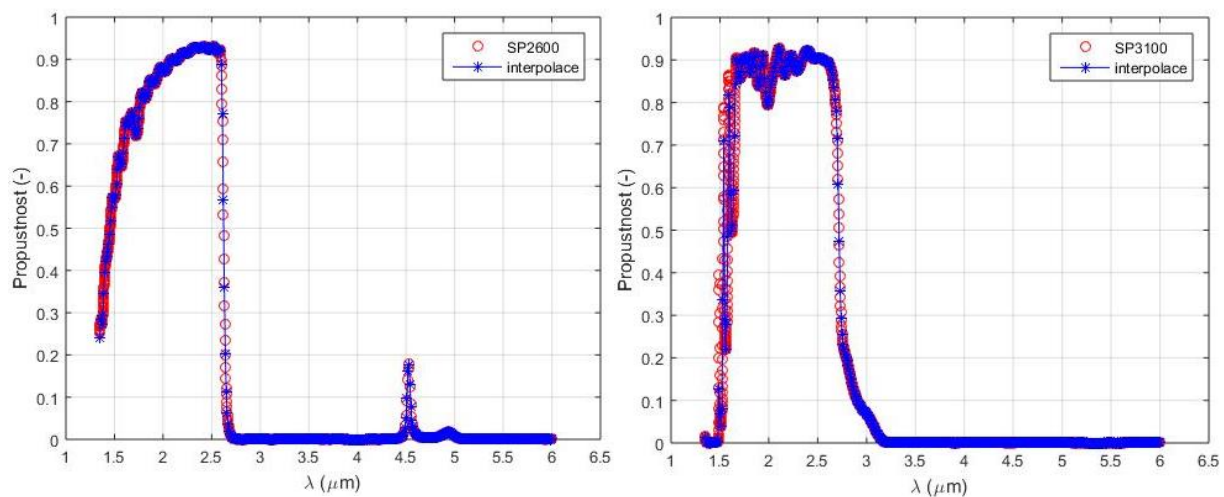




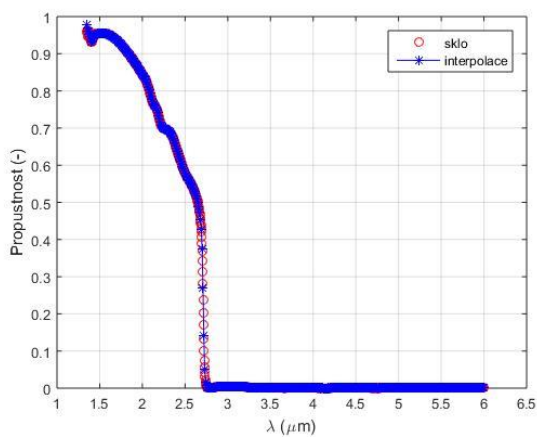
Obr. B.3: Spektrální emisivita  $\epsilon_{sur}$  horního polopropustného polymeru POM. Vlevo pro plast o tloušťce 1 mm, vpravo pro plast o tloušťce 2 mm.



Obr. B.4: Relativní spektrální citlivost kamery  $RR_{cam}$ . Vlevo pro kameru FLIR SC7650 a vpravo pro kameru Hamamatsu C14041-10U.

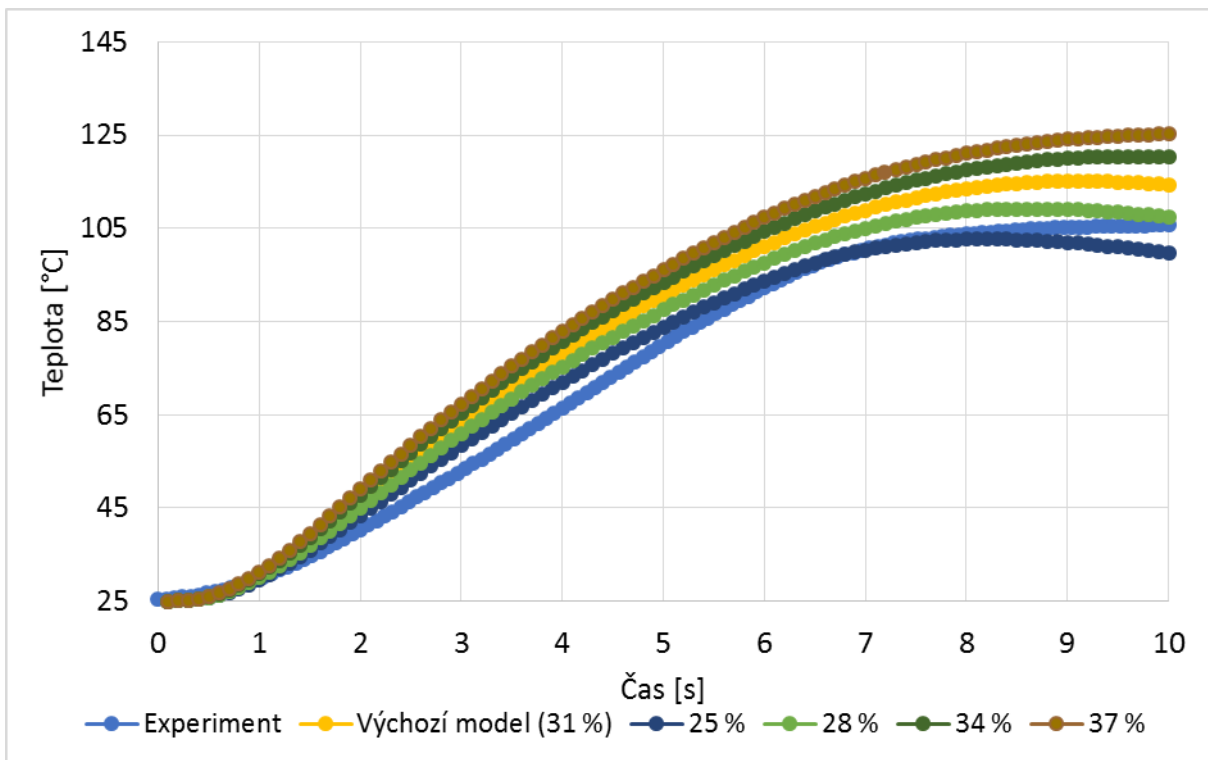


Obr. B.5: Spektrální propustnost optického filtru  $\tau_{fil}$ . Vlevo pro filtr SP2600 a vpravo pro filtr SP3100

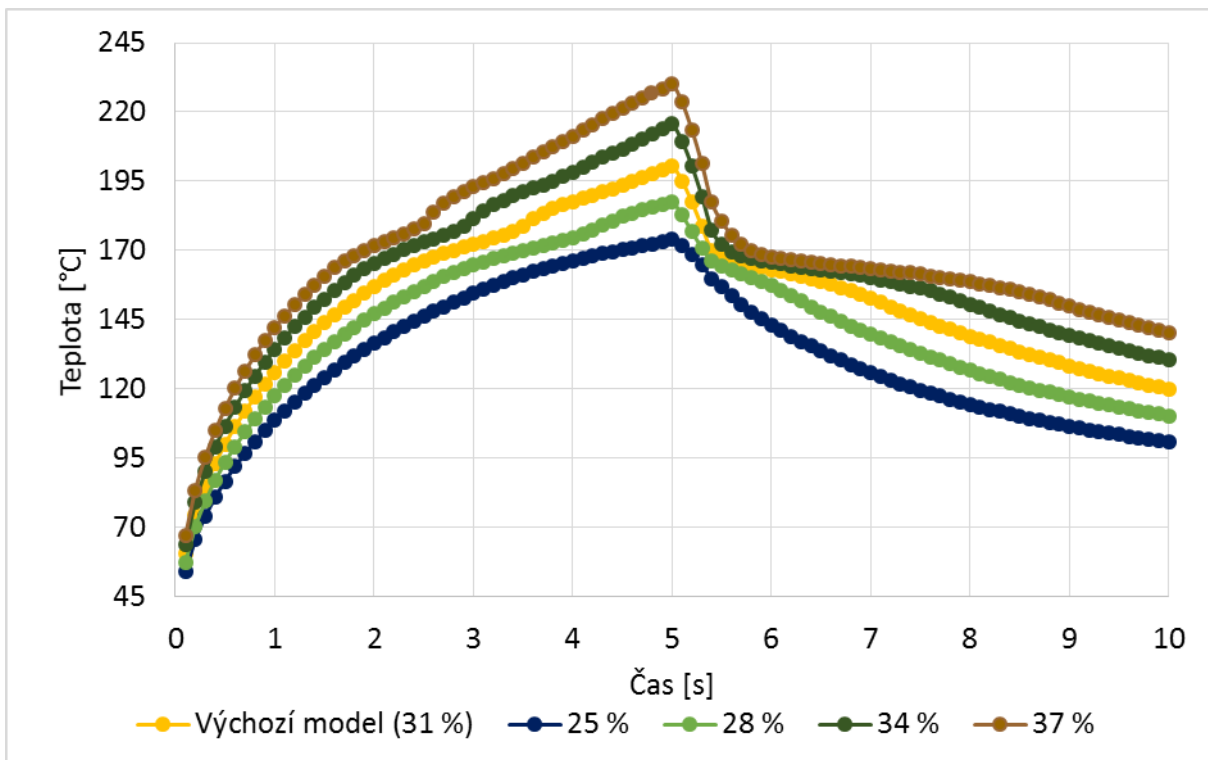


Obr. B.6: Spektrální propustnost optického filtru  $\tau_{fil}$ . Graf pro filtr WG12012-C (sklo).

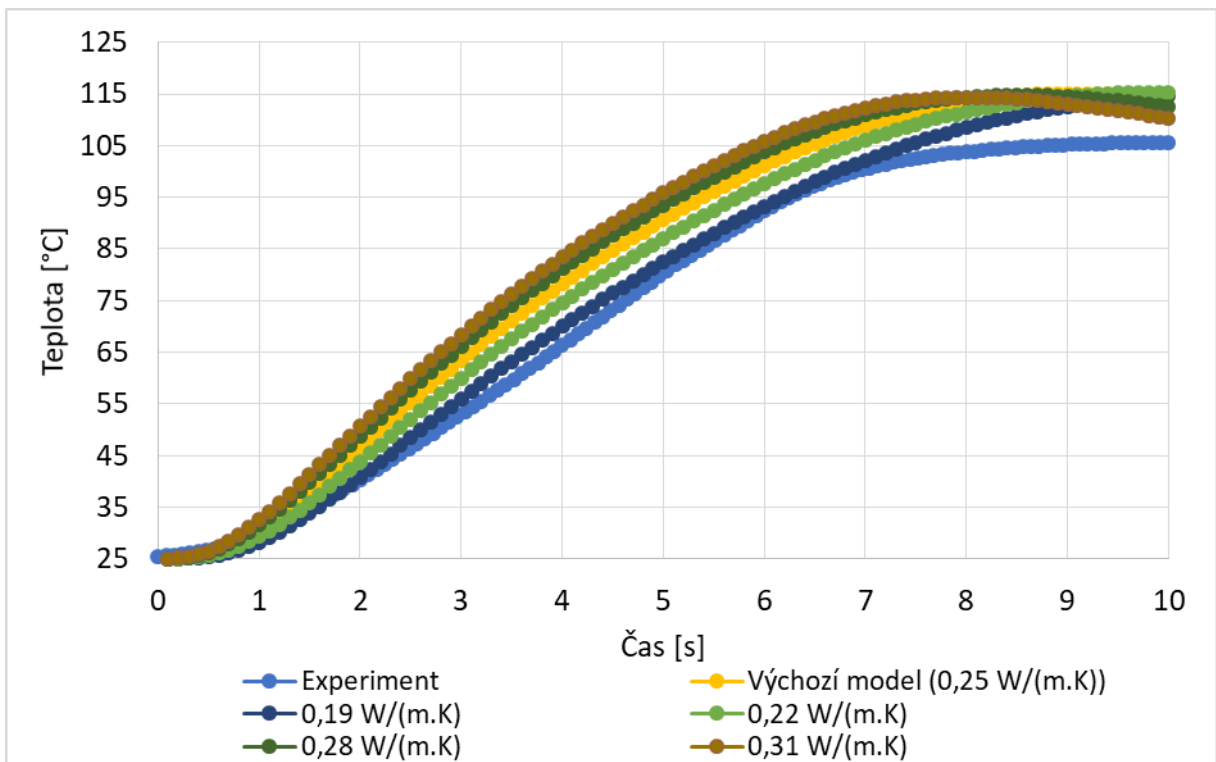
**Příloha C – Časové průběhy, rozložení teploty a profily teploty pro variantu s tloušťkou horního plastu 1 mm**



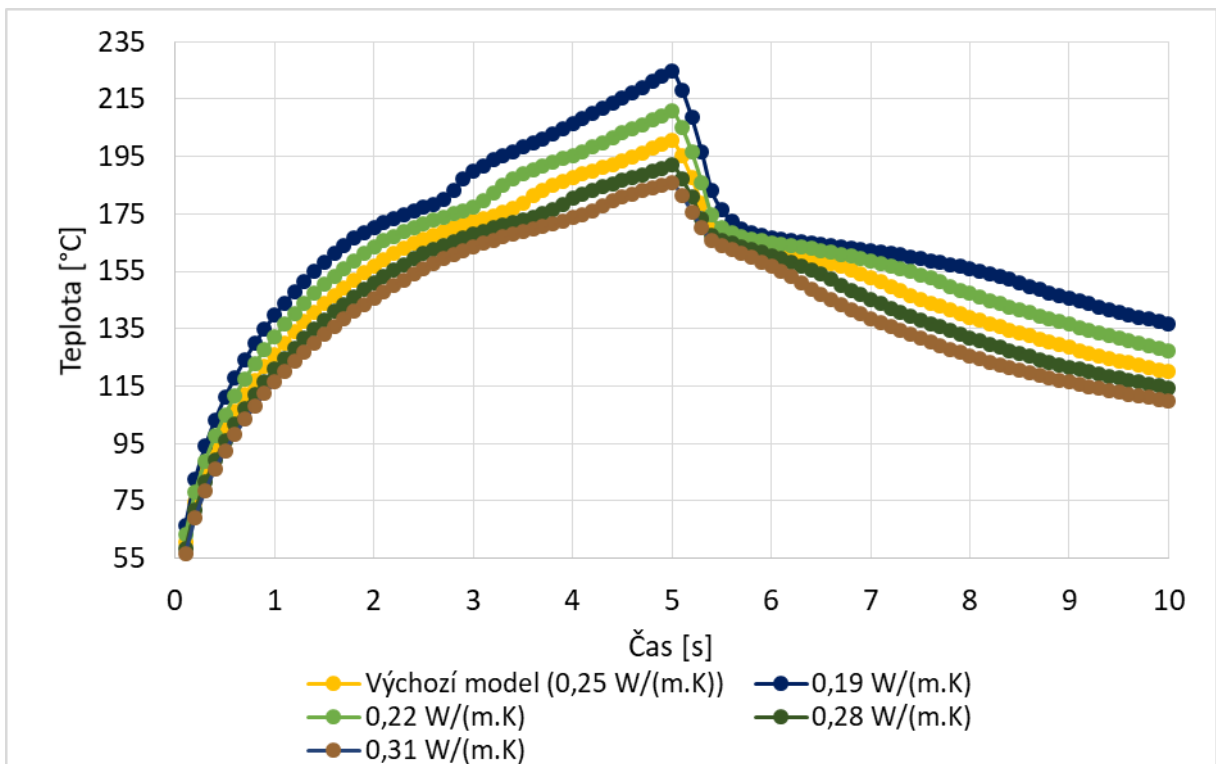
Obr. C.1: Časový průběh teploty na povrchu pro různá procenta propustnosti horního plastu a jeho tloušťku 1 mm. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.



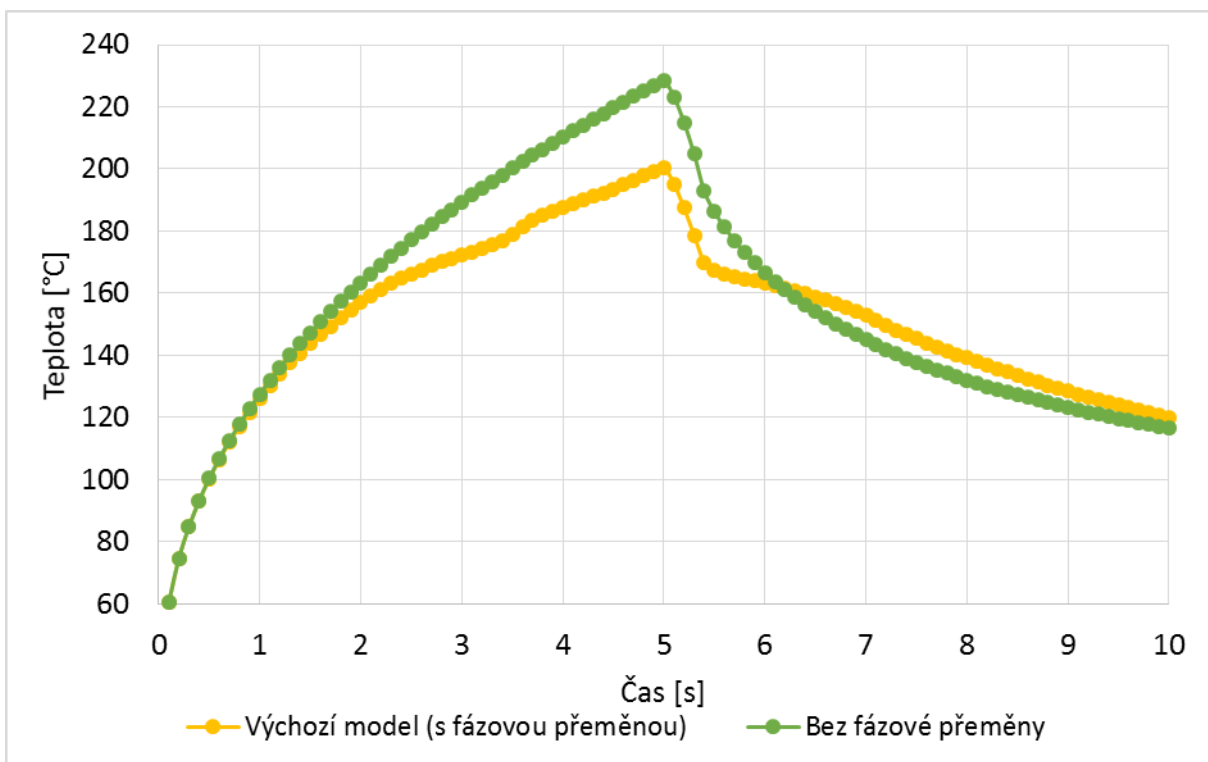
Obr. C.2: Časový průběh teploty na rozhraní pro různá procenta propustnosti horního plastu a jeho tloušťku 1 mm.



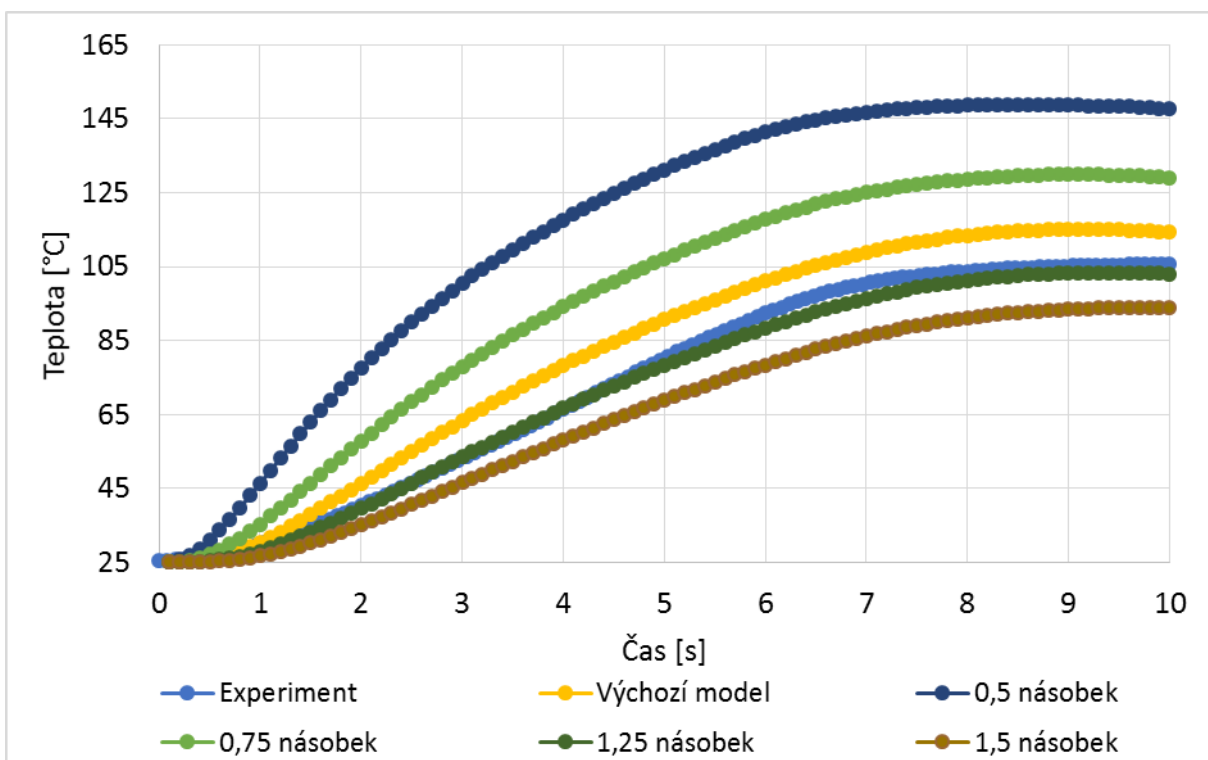
Obr. C.3: Časový průběh teploty na povrchu pro tloušťku horního plastu 1 mm a různé hodnoty tepelné vodivosti. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.



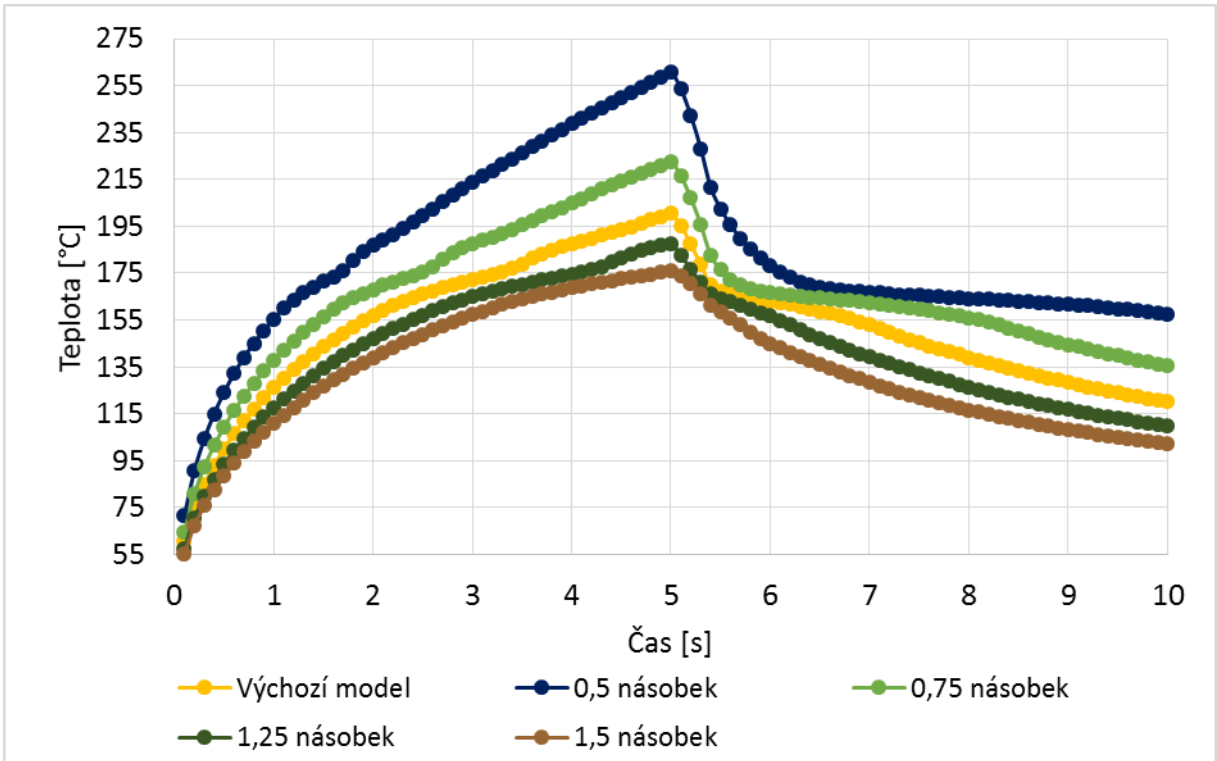
Obr. C.4: Časový průběh teploty na rozhraní pro tloušťku horního plastu 1 mm a různé hodnoty tepelné vodivosti.



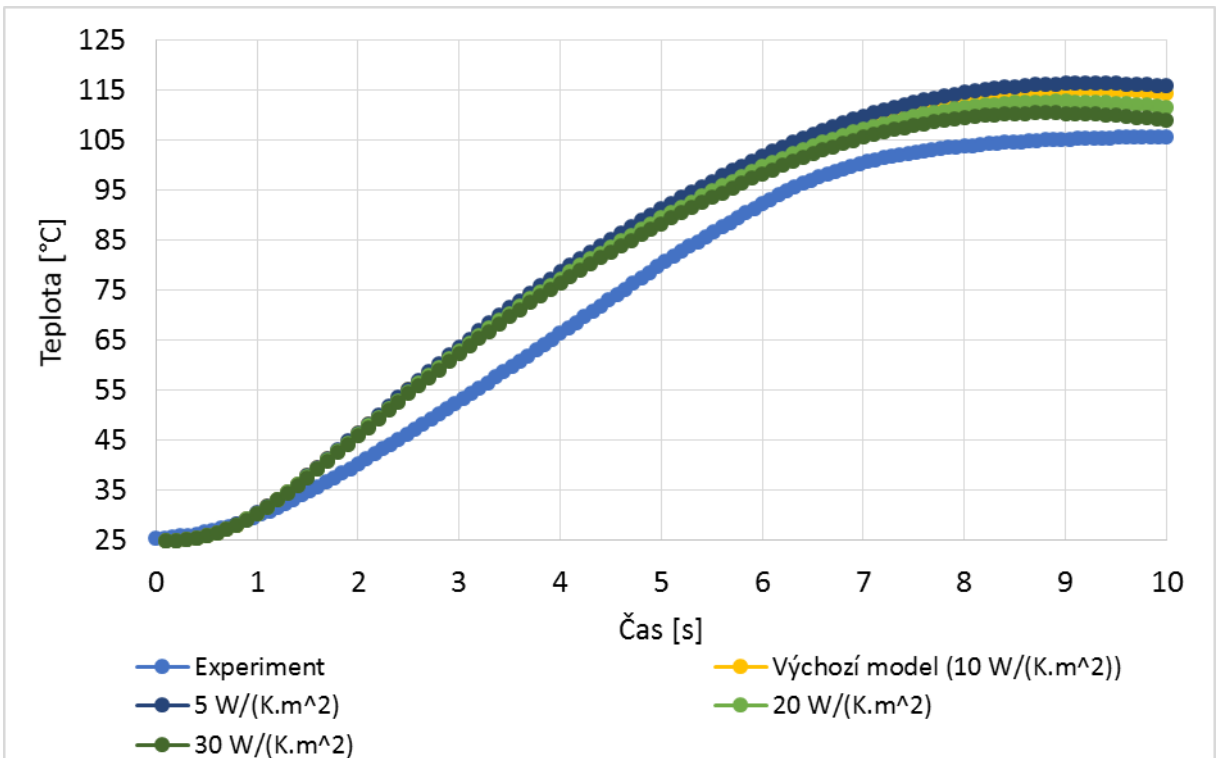
Obr. C.5: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 1 mm s uvažováním fázové přeměny a bez uvažování fázové přeměny.



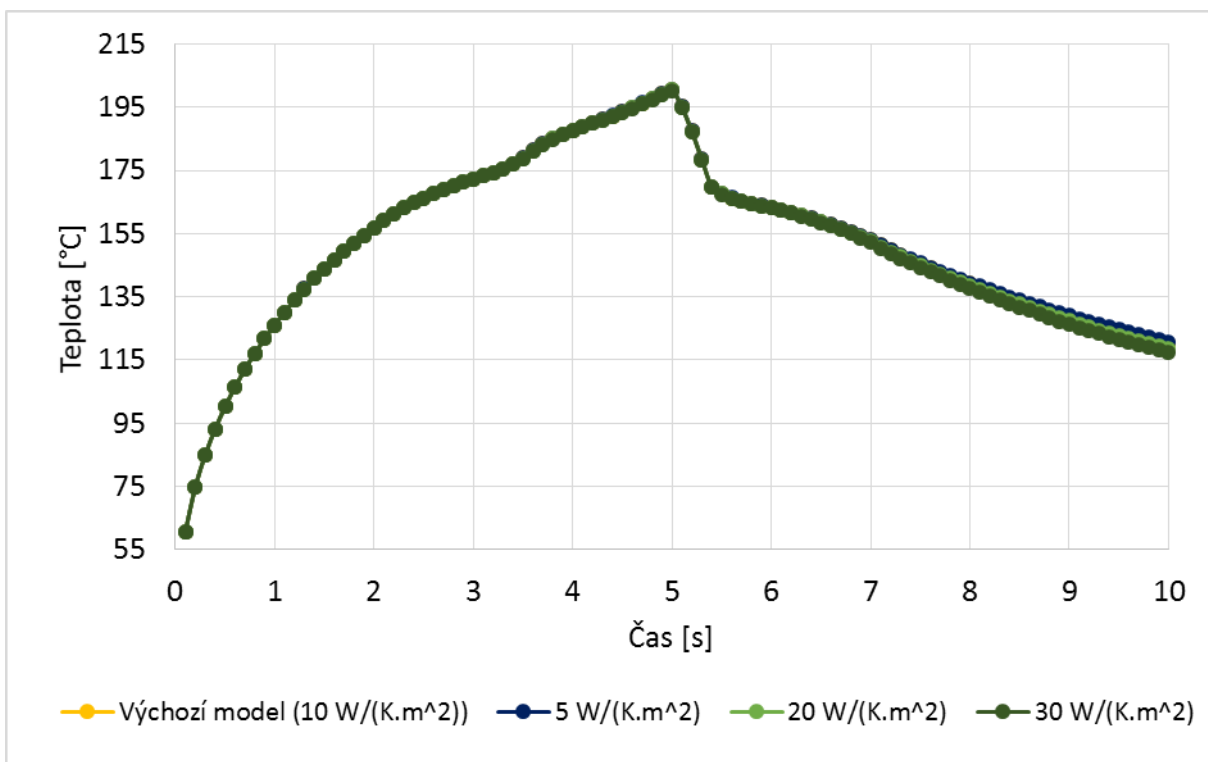
Obr. C.6: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé násobky naměřené měrné tepelné kapacity, jež je použita ve výchozím modelu. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.



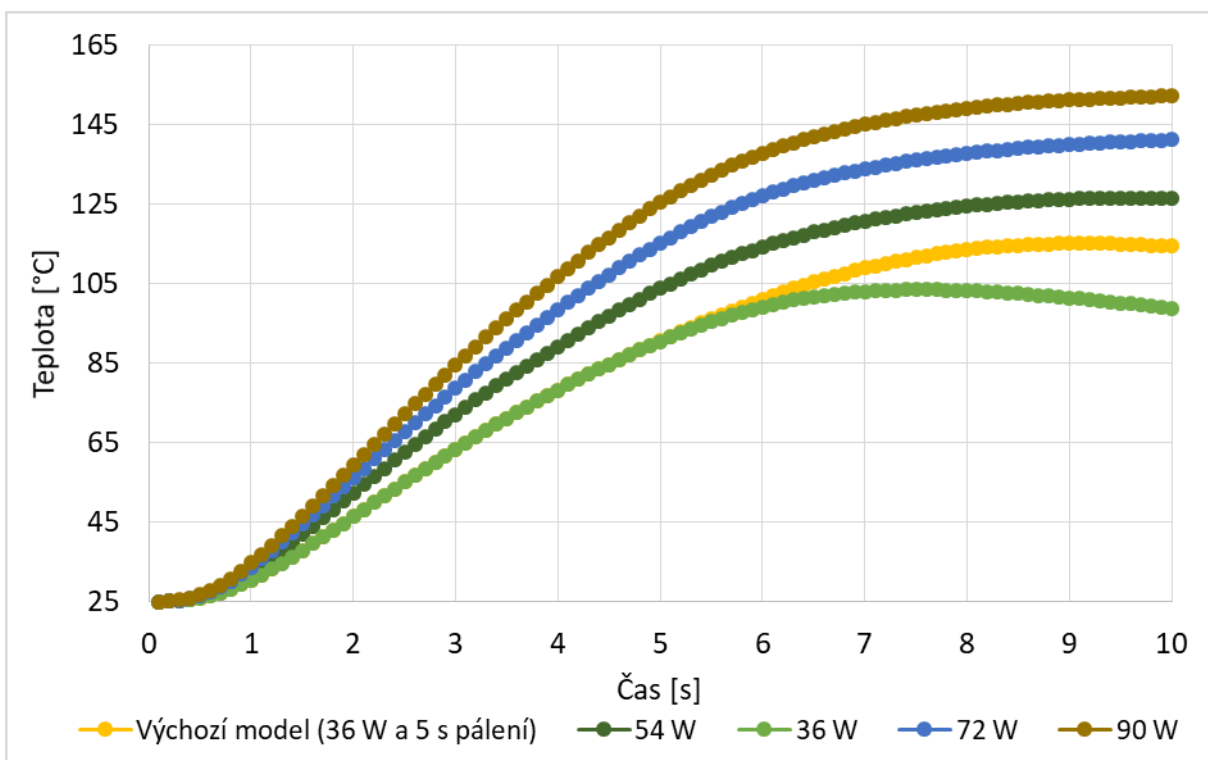
Obr. C.7: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé násobky naměřené měrné tepelné kapacity, jež je použita ve výchozím modelu.



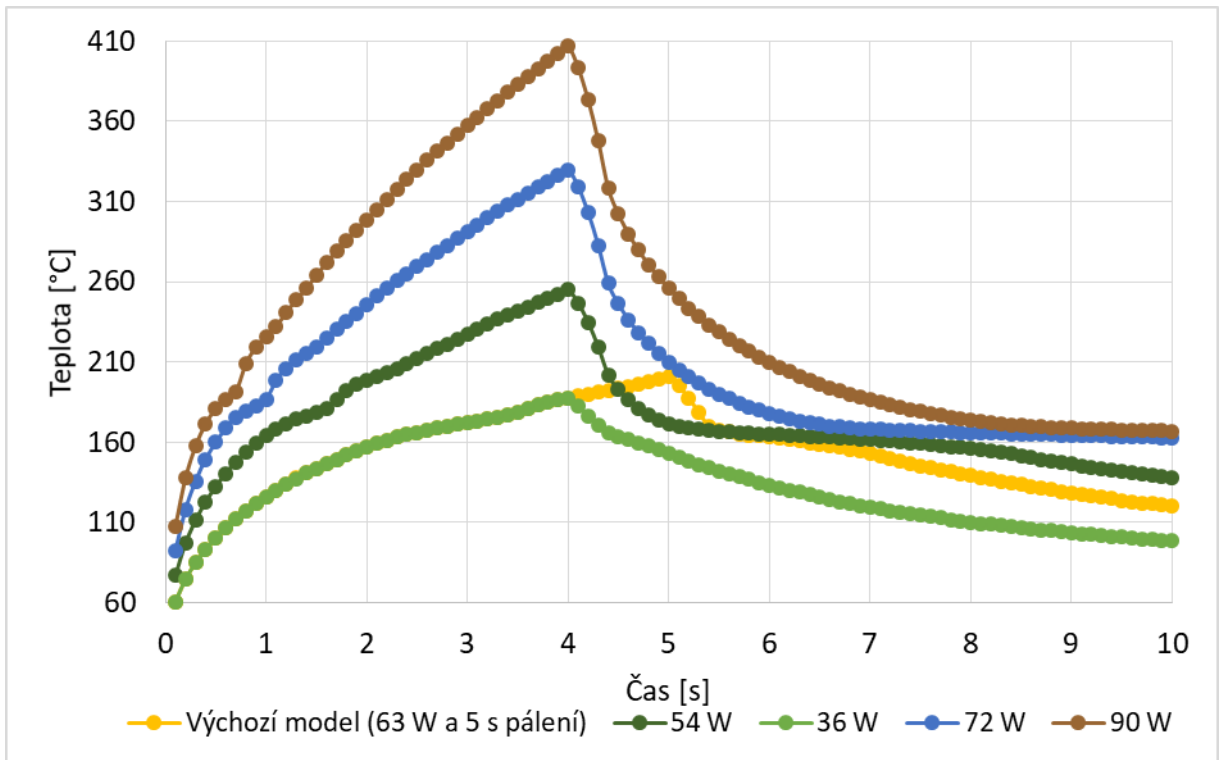
Obr. C.8: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé hodnoty přestupu tepla z plastu do vzduchu a pro přestup tepla  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  z plastu do kovu. V grafu je rovněž znázorněna časová závislost teploty zjištěná z experimentu.



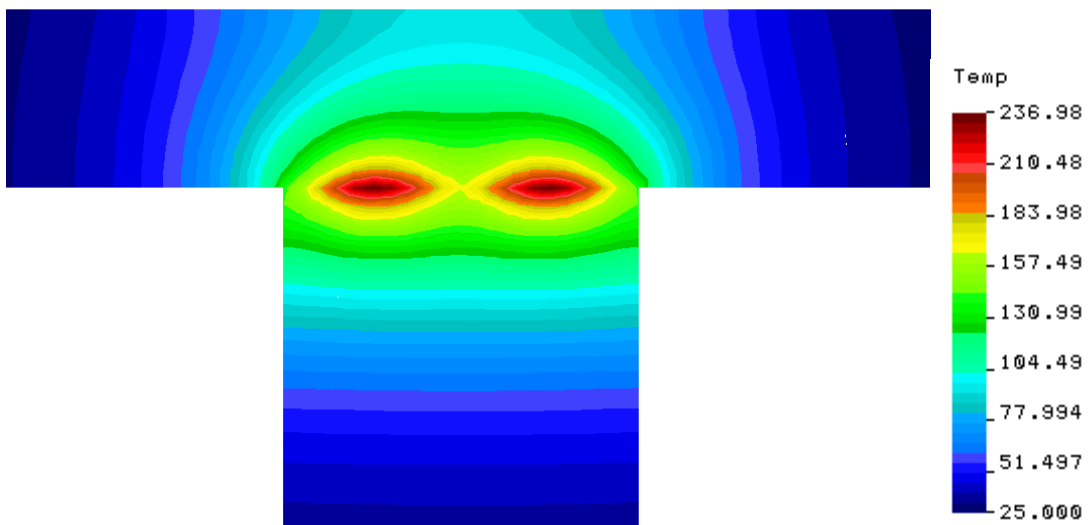
Obr. C.9: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé hodnoty přestupu tepla z plastu do vzduchu a pro přestup tepla  $100 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  z plastu do kovu.



Obr. C.10: Časový průběh teploty na povrchu pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé výkony. Délka pálení laseru je 4 s. V grafu je pro srovnání znázorněn i výchozí model.

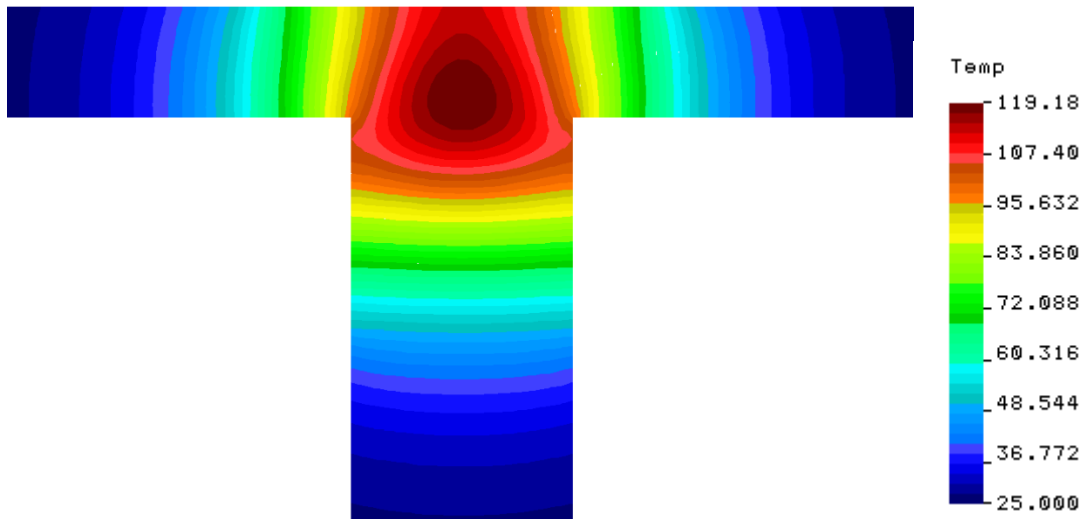


Obr. C.11: Časový průběh teploty na rozhraní pro horní plast o tloušťce 1 mm pro různé výkony. Délka pálení laseru je 4 s. V grafu je pro srovnání znázorněn i výchozí model.

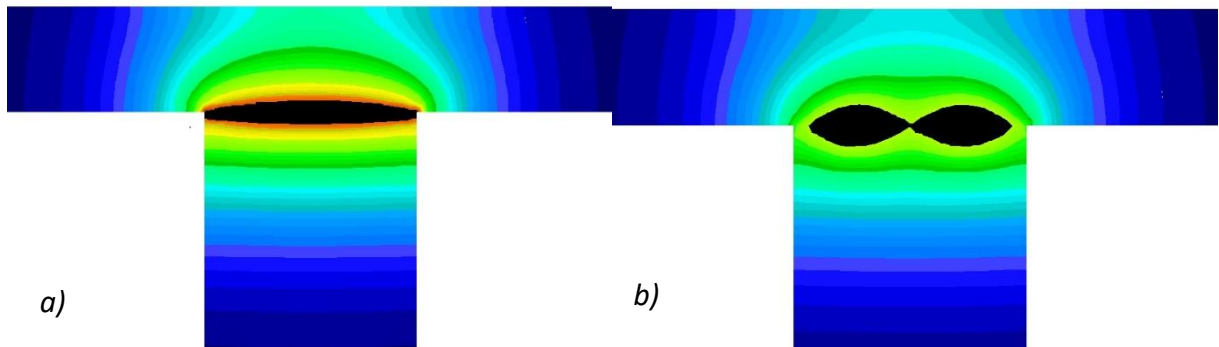


Obr. C.12: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 1 mm v čase 5 s. Verze pro Gaussův profil výkonu.

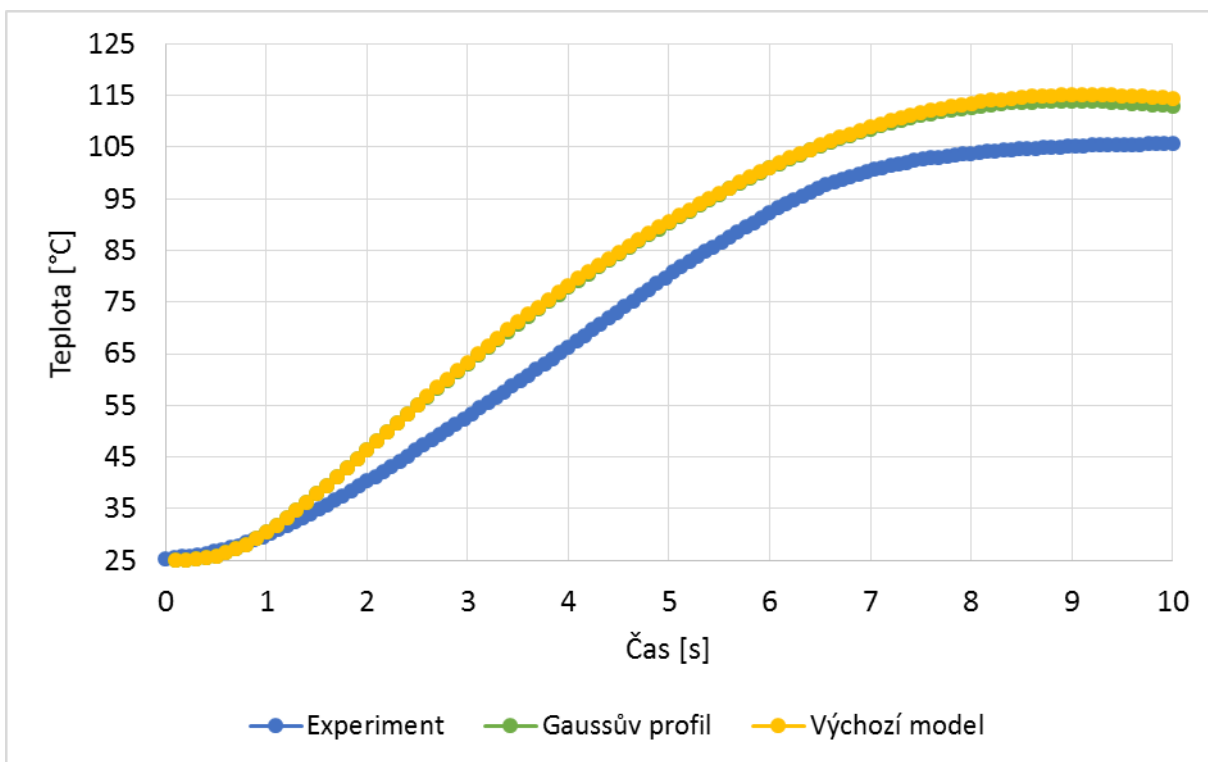




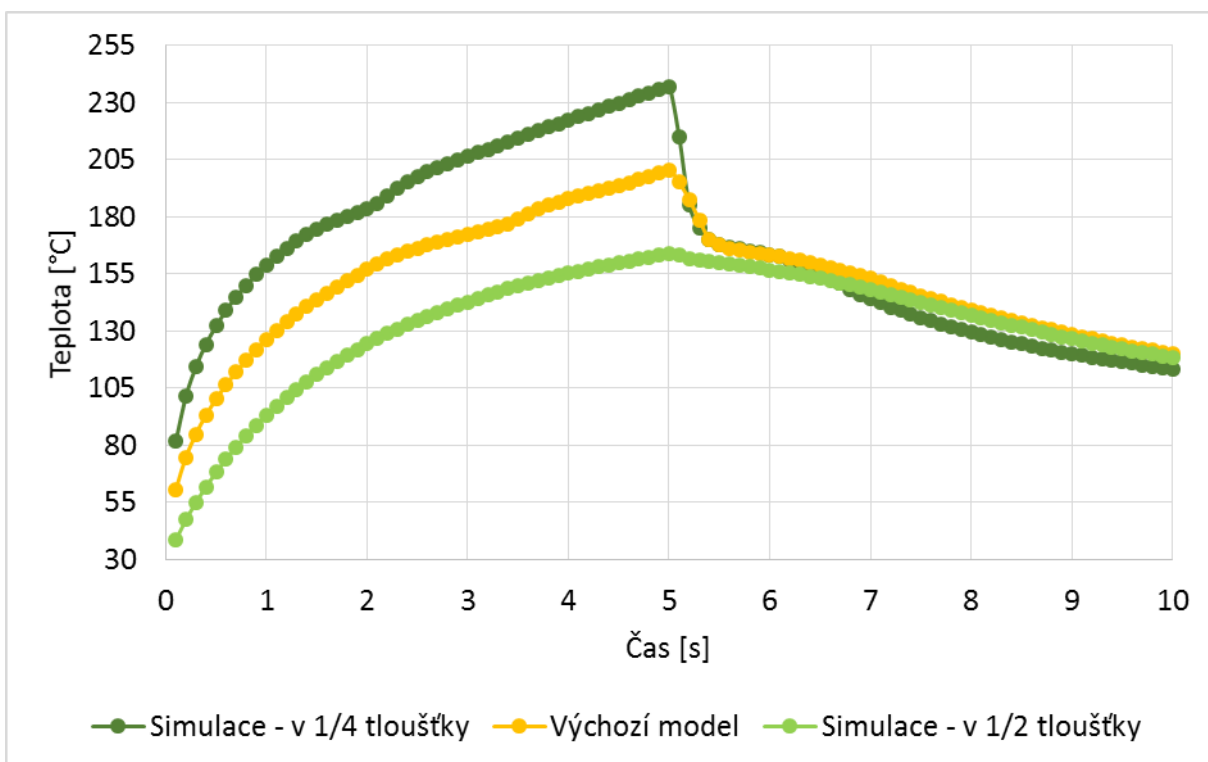
Obr. C.13: Rozložení teploty pro horní plast o tloušťce 1 mm v čase 10 s. Verze pro Gaussův profil výkonu.



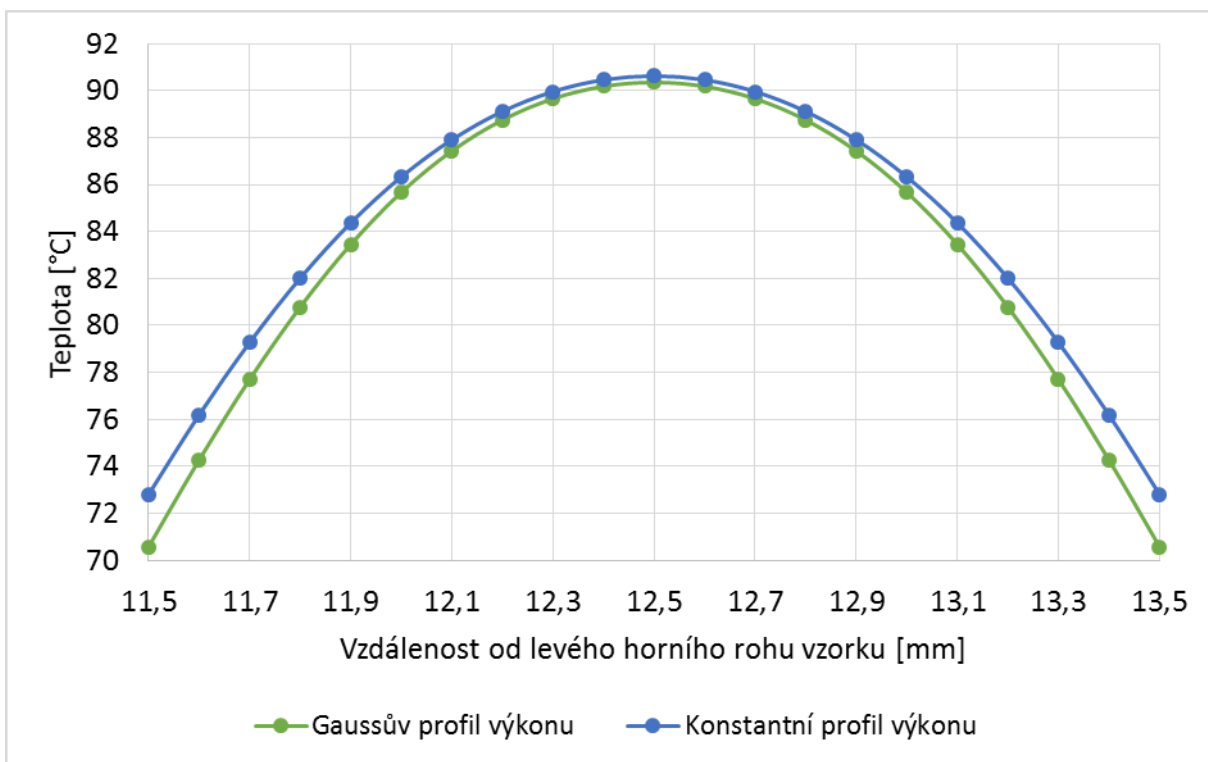
Obr. C.14: Porovnání roztavené části pro horní plast o tloušťce 1 mm v čase 5 s. Vlevo: a) konstantní profil výkonu, tj. výchozí model. Vpravo: b) Gaussův profil výkonu.



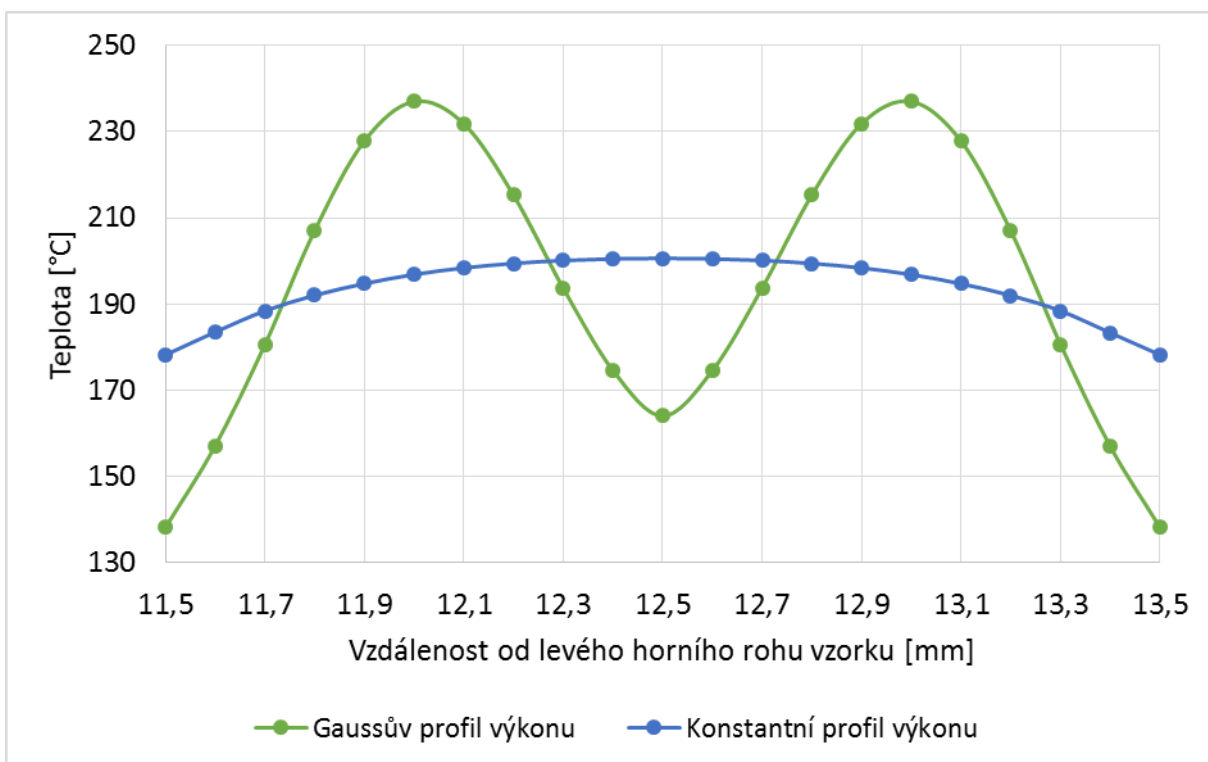
Obr. C.15: Porovnání časového průběhu teploty na povrchu vzorku pro horní plast o tloušťce 1 mm pro konstantní profil výkonu, tj. výchozí model, Gaussův profil výkonu a experiment.



Obr. C.16: Porovnání časového průběhu teploty na rozhraní vzorku pro horní plast o tloušťce 1 mm pro konstantní profil výkonu, tj. výchozí model, Gaussův profil výkonu v 1/4 tloušťky a Gaussův profil výkonu 1/2 tloušťky rozhraní.



Obr. C.17: Průběh teploty po úsečce na povrchu znázorněné na Obr. 5.31 v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 1 mm. V grafu jsou znázorněny závislosti pro Gaussův i konstantní profil výkonu.



Obr. C.18: Průběh teploty po úsečce na rozhraní znázorněné na Obr. 5.31 v čase 5 s pro horní plast o tloušťce 1 mm. V grafu jsou znázorněny závislosti pro Gaussův i konstantní profil výkonu.