

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Brno, 2025

Ing. Milan Hurban



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VÝZKUM A OPTIMALIZACE PROUDĚNÍ TEPLA V KONVEKČNÍ PECI PRO PÁJENÍ PŘETAVENÍM

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF HEAT FLOW IN THE CONVECTION FURNACE FOR REFLOW
SOLDERING

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Milan Hurban

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2025

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou metodiky a měřením rychlosti proudění v konvekční průtahové peci. V současné době nejsou k dispozici systémy, které měří přímo za provozních teplot, jež dosahují hodnot přes 250°C. Cílem práce bylo provést analýzu stávající situace a navrhnout měřicí systém, který umožní hlubší analýzu, reprodukovatelné měření a následně optimalizaci proudění v konvekční průtahové peci určené pro pájení elektronických sestav za provozních teplot.

Vzhledem k evropské legislativě a používání bezolovnatých pájecích slitin s vyšší teplotou tavení rostou energetické nároky na pájecí pece. Otázka optimalizace, a tím snížení spotřeby pájecího zařízení, proto nabývá velkého významu.

Vyvinutý měřicí systém byl odzkoušen a výsledky získané experimentálním měřením na průtahových pecích byly graficky vyhodnoceny. Díky spolupráci s jedním z bývalých zaměstnavatelů autora práce se podařilo povést sadu měření na třech různých pájecích zařízeních, což umožnilo jejich exaktní porovnání. Podařilo se jednoznačně prokázat vztah mezi mechanickou stavbou a výslednými vlastnostmi dané pece.

Další částí práce byla zjednodušená simulace přenosu tepla a rozložení proudění uvnitř pájecí pece a porovnání s naměřenými výsledky. Přestože simulace je založena na mnoha zjednodušujících předpokladech, může být nápomocna přiblížit základní situaci v zařízení a při návrhu nového umožní odhalit některé případné nedostatky konstrukce. V konečném důsledku ale musí takové zařízení být podrobena detailnímu měření, což navržený a odzkoušený systém umožňuje.

Klíčová slova

Pájení přetavením, pájecí pec, přenos tepla, rychlost proudění, laminární proudění, turbulentní proudění, Reynoldsovo číslo, simulace proudění,

Abstract

The main aim is the analysis of methodology and the measurement of flow velocity in a convection reflow oven. Currently, there are no available systems that measure directly at operating temperatures exceeding 250 °C. The main aim was to analyse the current approach and propose a measuring system that would enable a deeper analysis, reproducible measurements, and subsequent optimization of airflow in a convection reflow oven that was designed for soldering electronic assemblies at operating temperatures.

Due to European legislation and the use of lead-free solder alloys with higher melting points, the energy demands on soldering ovens are increasing. The issue of optimization and the reduction of energy consumption of soldering equipment is therefore of great importance.

The developed measuring system was tested and the results obtained by experimental measurements on ovens were graphically evaluated. Thanks to cooperation with one of the author's former employers, it was possible to conduct a series of measurements on three different soldering devices, allowing for their precise comparison. The relationship between the mechanical structure and the resulting properties of the given oven was clearly demonstrated.

Another part of the work involved a simplified simulation of heat transfer and airflow distribution inside the soldering oven, which was then compared with the measured results. Although the simulation is based on many simplifications, it provides a basic overview of the conditions inside the device and helps identify major structural deficiencies when designing a new system. However, in the end, such a device must undergo detailed measurement, which the proposed and tested system allows.

Keywords

Reflow soldering, soldering oven, heat transfer, gas flow velocity, laminar flow, turbulent flow, Reynolds number, simulation of gas flow

Bibliografická citace

Hurban, M. Výzkum a optimalizace proudění tepla v konvekční peci pro pájení přetavením
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav mikroelektroniky, 2025. 108 s. Vedoucí disertační práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch,
CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Chci poděkovat v první řadě vedoucímu mé disertace, panu doc. Ing. Szendiuchovi, CSc. za to, že mne přesvědčil k této práci, poskytl mi velmi cenné rady, podporu a konzultace během ní.

Další poděkování patří mé ženě Marcele, dceři Lucii a zeti Martinovi za pochopení, podporu a konzultace především při sepisování této práce.

Velké poděkování patří i prof. Musilovi za cenné praktické rady a pomoc při korektuře této práce.

Jako dalšimu v řadě bych rád poděkoval kamarádovi, panu Zdeňkovi Jabůrkovi, OK2VJZ, za významnou pomoc a konzultace ohledně měřicího zařízení.

Dále bych rád poděkoval pánům Jaroslavovi Mihálovi a Danielovi Zdařilovi za jejich vstřícný postoj při organizaci a přátelskou pomoc při provádění praktických měření na pájecích zařízeních různých výrobců.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i všem ostatním lidem, kteří mne v práci na této disertaci podporovali a byli mi nápomocni. Díky!

V Brně dne: 18. března 2025

podpis autora

Obsah

Úvod.....	1
1 Současný stav	3
2 Cíle disertační práce.....	5
3 Konvekce a konvekční ohřev.....	6
3.1 Základy mechaniky proudění	6
3.1.1 Fyzikální veličiny [11, 12]	6
3.1.2 Základní rovnice	6
3.1.3 Vlastnosti látek	8
3.1.4 Podobnostní čísla [13]	8
3.2 Konvekce a konvekční pece.....	11
3.2.1 Proudění v konvekčním ohřevu	11
3.2.2 Vliv rychlosti proudění	14
3.2.3 Vliv rozdílové teploty	16
3.2.4 Vliv topení zespolu	18
4 Měření konvekčního proudění v průtahové peci.....	21
4.1 Příklady aplikace konvekčního vytápění	21
4.1.1 Teorie volného proudění.....	21
4.1.2 Vytápění prouděním plynu	21
4.2 Měření součinitele přenosu tepla	25
4.2.1 Metody měření [9]	25
4.2.2 Metoda výpočtu	27
5 Experimentální část.....	30
5.1 Sensor FS7.4W [20].....	30
5.2 Návrh a sestavení měřicího pracoviště.....	32
5.3 Princip měřicího systému	34
5.4 Experimentální měření rychlosti proudění v peci.....	36
5.4.1 Ověření funkčnosti měřicího systému	36
5.4.2 Měření standardního profilu průtahové pájecí pece	38
5.5 Praktické měření rychlosti proudění v peci.....	39
5.5.1 Pec č. 1 (R)	41

5.5.2	Pec č. 2 (V)	50
5.5.3	Pec č. 3 (S)	55
5.6	Srovnání naměřených hodnot	59
6	K problematice simulace tepelných polí v průtahových pecích	61
6.1	Základní metody počítačové simulace proudění (CFD)	64
6.2	Simulace desetizónové pece	72
6.3	Grafické znázornění výsledků.....	84
6.4	Silové působení proudění na desku plošných spojů	89
6.5	Tepelné rozdíly na desce plošných spojů	90
6.6	Silové působení proudění na součástku	92
7	Zhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praxi.....	94
8	Závěr.....	96
9	Literatura	98
10	Seznam vlastních publikací	101
11	Použité zkratky a symboly.....	103
12	Seznam obrázků	105
13	Seznam tabulek.....	108

Úvod

Technika povrchové montáže (SMT) je v dnešní době vedoucí technologií ve výrobě desek plošných spojů (DPS) pro elektronická zařízení [1]. Protože do výroby přicházejí stále komplexnější elektronické sestavy, je třeba neustále zlepšovat technologii výrobních procesů. Jedním ze stěžejních je proces pájení. I když tento proces je nám známý velmi dlouhou dobu, je neustále co zlepšovat a optimalizovat.

Pájení je v současné době nejpoužívanější technologií spojování součástek do elektronických sestav. Principiálně rozlišujeme pájení měkké a tvrdé. Za tvrdé pájení se považuje spojování kovových součástí při teplotách nad 450 °C, měkké pájení potom při teplotách nižších. Pokud je pájka v tekuté fázi (tedy nad tavnou teplotou), označujeme tento stav jako liquidus. Pevnou fázi potom nazýváme solidus.

Historie pájení sahá do starověku. Už v době cca 4000 let před naším letopočtem je známé spojování kovů tvrdým pájením. Měkké pájení (tj. při teplotách liquidu nižších jak 450 °C) je známo z Mezopotámie a starého Egypta z doby přibližně 2000 let před naším letopočtem. Tehdy se, samozřejmě, jednalo o šperky apod., nikoliv o elektroniku. [1]

Velkou výhodou pájení je, že je levné, má vysokou mechanickou pevnost, velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti, vysokou spolehlivost a životnost. Vzhledem k relativní jednoduchosti je možné celý proces automatizovat a případné opravy jsou snadno proveditelné.

Používané měkké pájení je technika spojování dvou kovových částí za použití dalšího kovu (kovů), přičemž nedochází k překročení tavné teploty spojovaných částí. Vždy je při něm nutné dodat další kov (slitinu), což při spojování např. svařováním není nutné. V elektrotechnice se nejčastěji využívala slitina cínu a olova, v dnešní době (po r. 2006) musí být toxické olovo nahrazeno jinými kovy. Původní slitina olova a cínu byla tzv. eutektikum, které vzniká v takovém míšicím poměru obou složek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší. Proto, i když cín má teplotu tavení (liquidus) 232 °C a olovo 328 °C, výsledná směs v poměru přibližně Sn63Pb37 (hmotnostní poměr) má teplotu liquidu 183 °C. Po zavedení direktivy EU o používání bezolovnatých slitin přichází ke slovu slitiny cínu s mědí a stříbrem, kdy teploty tavení se zvedají na 217–221 °C. Existují i slitiny cínu s indiem nebo vizmutem, kdy teplota liquidu je pod 150 °C, ale např. v automobilní elektronice tato slitina nemůže být nasazena do výroby, a proto se používá pouze u části spotřební elektroniky.

V pájení se využívají často pájecí pasty, které jsou vlastně směsí drobných kuliček použité slitiny s tavidlem, které je složeno z několika organických i anorganických sloučenin. Detailní složení je samozřejmě tajné a je nedílnou součástí know-how jednotlivých výrobců. Podle toho, jaké typy součástek (rozteč vývodů) vstupují do výrobního procesu, se potom používají pasty s různou velikostí kuliček pájecí slitiny. Nejčastější použití nachází pasta typu 3, kdy velikost částí pasty nepřesahuje 50 μm. Jemnější pasty se potom používají na součástky velmi malé, s malou roztečí vývodů. Např. pasta typu 4 se používá pro součástky velikosti 0201 (tedy součástky velikosti 0,5×0,25 mm) . Jemnější pasty potom samozřejmě jsou i výrazně dražší, a proto se používají jen ve zcela nutných případech.

Celý proces výroby elektroniky v automatizovaných linkách začíná u prázdné desky plošných spojů (DPS). Tato je posunuta do sítotiskového stroje, kde je pomocí šablony a stěrky nanášena na příslušné pájecí plošky pájka ve formě pájecí pasty. Tato pasta vykazuje jistou lepivost, a proto následně osazené „bezvývodové“ součástky drží na svých pozicích a celá tato sestava (často po optické kontrole tvaru a množství nanášené pasty) poté vstupuje do pájecího zařízení. Po pájení pak vznikne elektrický obvod, na němž lze provést první elektrická kontrolní měření.

Z počátku se používaly pro pájení přetavením pece s ohřevem vyvolaným infračerveným zářením. Jejich nevýhodou byl velký rozdíl teplot mezi zdrojem tepla a pájenou součástkou. To znesnadňovalo přesné nastavení teploty na pájených spojkách. Proto byl tento způsob s postupem času nahrazen konvekčním ohřevem, kde proudění teplého vzduchu vytváří podstatně homogennější tepelné pole. Přesto je i u tohoto způsobu obtížné dosáhnout dokonale homogenního tepelného pole, které je stále více aktuální vzhledem ke zmenšujícím se rozměrům součástek, a s tím i pájených spojů, které jsou u moderních součástek umístěny na jejich spodní straně. A právě homogenita a rozložení tepelného pole závisí na celé řadě faktorů, které je třeba řešit při konstrukci pece pro pájení přetavením.

Je třeba si uvědomit, že technologický proces pájení přetavením je stěžejní operací celého komplexního výrobního procesu povrchové montáže elektronických sestav, neboť v jeho průběhu se rozhoduje o kvalitě pájených spojů, a s tím současně i o spolehlivosti a životnosti realizované sestavy. Vzhledem ke skutečnosti, že elektronika je dnes přítomna prakticky ve všech průmyslových odvětvích, je třeba neustále tento proces sledovat, zlepšovat a zdokonalovat, což je i posláním této disertační práce.

1 Současný stav

Přestože pájecí proces je nám známý již velmi dlouhou dobu, jsou před námi stále nové a nové požadavky, jak z hlediska použitých materiálů, tak i z hlediska výsledků pájení. V první řadě to znamená poznat pájecí proces do nejmenších detailů, poznat jaké procesy probíhají uvnitř pájecího zařízení. Jak vypadá proudění plynu (vzduch nebo dusík) uvnitř zařízení, jak se mění koeficient přenosu tepla v závislosti na geometrii jednotlivých zón, vzdálenosti zóny a DPS, tlakových poměrech uvnitř zařízení atd. Vlivem proudění vznikají různé síly, které mohou, v jistých případech, posunout součástku mimo pájecí plošky. Tím se zvyšují náklady na výrobu, protože výrobek je třeba opravit. Někteří koncoví zákazníci dokonce zakazují jakékoliv ruční opravy. To klade zvýšené požadavky na kvalitu výrobního procesu. Pájení je jedním z nejdůležitějších procesů výroby. Dokážeme-li, alespoň v určitém rozsahu, změřit a vyhodnotit proudění uvnitř pájecí pece, pomůže nám to ke zlepšení nejen výsledků pájení, ale k celkovému zvýšení produktivity a efektivity pájecího procesu, a v neposlední řadě také ke zvýšení jeho kvality.

Je možné si položit otázku, jaké metody se používaly a používají pro automatizované pájení elektronických sestav. Všechny vycházely ze základního principu přenosu tepla ze zdroje na daný objekt. Tak se s postupem času vyvíjely jednotlivé typy pájecích zařízení, u nichž jedním z prioritních cílů je dosáhnout co nejdefinovanější teplotní profil zajišťující požadovanou teplotu v místě pájení.

Základní, všeobecně známá rovnice popisující přenos tepla, v tomto případě uskutečňující se v průtahové peci ze zdroje tepla na pájený výrobek (DPS), má následující tvar [2]:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot (T_{\text{pece}} - T_{\text{výrobku}}), \quad (1.1)$$

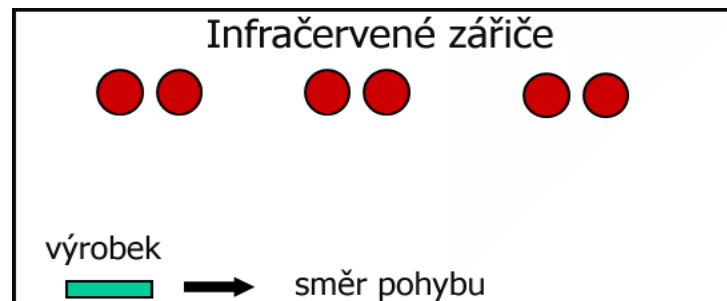
kde A je povrch tělesa (m^2), t je čas (s), α je koeficient přenosu tepla ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

Pro konvekční ohřev je $\alpha = 10\text{--}70 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, pro pájení kondenzační $100\text{--}300 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ [4].

Pájení výrobků v elektronice spočívá v tom, že na pájený bod je přivedeno z příslušného zdroje teplo, přiložená pájecí slitina se přetaví, a tak dojde k vytvoření pevného mechanického i elektrického spojení příslušné součástky s vodivým kontaktem na nosné desce plošných spojů. V praxi se používá několik hlavních způsobů ohřevu pájeného výrobku. Za nejdůležitější způsoby přenosu tepla, jež se využívají v současných elektronických výrobcích, jsou považovány:

- přenos tepla zářením (infračervené záření, laser)
- přenos tepla vedením (konduktivní ohřev)
- přenos tepla prouděním (konvekční ohřev)

Prvotní, a také v 80. letech nejrozšířenější způsob pájení měkkých pájek v technologii povrchové montáže, je pájení přetavením. Tato metoda je založena na ohřevu pájecí slitiny zdrojem tepla, který byl zpočátku realizován na principu infračerveného záření. Základní princip uspořádání takové pece je ve zjednodušené podobě znázorněn na Obr. 1.1



Obr. 1.1: Princip ohřevu infračervenými zářiči [4]

Jako zdroj tepla se zde používaly speciální trubice z křemenného skla. Tyto systémy se používaly často koncem minulého století. Výhodou je velmi dobrá účinnost přenosu tepla a relativně jednoduchá konstrukce zařízení. Velkou nevýhodou je potom výrazná citlivost na reflexe na výrobku i DPS, vliv barvy součástek a DPS, které mělo za důsledek velmi výrazné vysokou rozdílovou replotu ΔT (°C) mezi součástkami. Stávalo se často, že tmavší součástka byla na hranici svého dovoleného tepelného zatížení a malé světlé součástky nebyly zapájeny vůbec. Později se začala více uplatňovat metoda konvekce, v tomto případě vynucené. To znamená, že horký plyn je nuceně hnán ventilátorem prostřednictvím pole trysek směrem k pájené elektronické sestavě. Po určitou dobu se také používalo řešení s konvekcí v oblasti předeřevu a v přetavovací (peak) zóně byly umístěny infračervené zářiče jako podpora konvekce. Postupem doby bylo ale toto řešení opuštěno a dnes se využívá v průmyslové velkovýrobě jen vynucená konvekce.

Vzhledem ke komplexnosti současné elektroniky se aktivně řeší provedení pájecích zařízení využívajících kondenzační princip přenosu tepla. Zvláště v oblasti automotive, kde nárůst výroby výkonové elektroniky vyžaduje zvýšený přísun tepla pro pájení. Vzhledem k tomu, že vedle sebe jsou stále častěji použité velmi malé součástky v bezprostřední blízkosti velkých, dostává se přenos tepla proudícím plynem na hranice použití. Hrozí nebezpečí, že malé součástky budou přehřáté a malé nezapájené. Při pájení v kondenzačních zařízeních se rozdíl teplot mezi součástkami snižují, ale v současné době nejsou tato zařízení schopná konkurovat konvekčním především z důvodu nižší prouštnosti výroby. To je v době, kdy je kladen velký důraz na rychlost a objem výroby poměrně velký handicap.

Pájení za pomoci kondukce, tedy přenosu tepla vedením, se používá spíše v laboratorní praxi nebo v malosériové výrobě. Pájený výrobek je položen na topné desce, která ho ohřívá. Tato zařízení bývají řešena jako uzavřená komora, proto je možné používat různé druhy pomocné atmosféry, např. dusík, vodík (do 7–8 %), směs dusíku a kyseliny mravenčí apod. Výtěžnost takového zařízení je ale velmi malá, nehodí se tedy pro velkosériovou výrobu.

Další deatily budou zaměřeny na konvekci jako nejčastější způsob ohřevu pájených elektronických sestav.

2 Cíle disertační práce

Cílem této disertační práce je analyzovat na základě vědeckého přístupu současný stav konstrukce konvekčních průtahových pecí pro pájení přetavením a zjistit obecně platné zákonitosti pohybu ohřevového média při jeho průchodu pecí. Na základě získaných poznatků a vědecky podložených experimentů potom definovat hlavní faktory a stanovit doporučení pro inovativní kroky v podobě definice konstrukčních pravidel využitelných při vývoji nových průtahových přetavovacích pecí, a to především se zaměřením na uspořádání ohřevových trysek a jejich nastavení.

Řešení této problematiky, která je aktuální také v souvislosti s ekologickými požadavky současné doby, lze výstižně definovat cíle této práce v následujících chronologicky uspořádaných bodech:

- analýza proudění tepla v průběžné přetavovací peci na základě známých fyzikálních zákonitostí,
- výzkum proudění tepla v průběžné přetavovací peci a stanovení inovativní měřicí metody pro měření proudění,
- syntéza a kvalifikace měření proudění tepla s pomocí vyvinutého a realizovaného měřicího zařízení,
- porovnání naměřených výsledků u různých typů pecí se simulací, rozbor získaných výsledků,
- návrh a doporučení pro optimalizace rozložení a uspořádání topných zón, resp. provedení trysek, kterými proudí tepelná energie do přetavovací zóny s cílem dosažení co možná nejhomogenějšího tepelného pole.

3 Konvekce a konvekční ohřev

3.1 Základy mechaniky proudění

Mechanika proudění popisuje chování proudících tekutin nebo plynů a vysvětluje fyzikální základy pro řešení mnohých problémů. Pohyb reálných tekutin a plynů je velmi komplikovaný a numerická řešení jsou získávána na základě určitých zjednodušujících předpokladů. Pro naše účely můžeme definovat dvě základní oblasti šíření tepla v prostoru:

- obtékání těles,
- proudění.

U proudění jde především o výpočet sil, které působí na dané médium (tekutina, plyn). Častým problémem bývá řešení snižování ztráty tlaku p , rozložení proudění a také vlastní proudící hmoty. Pro studium této problematiky je třeba osvětlit některé stěžejní pojmy jako jsou rychlost proudění v , tlakem p a hustotou média ρ .

3.1.1 Fyzikální veličiny [11, 12]

Abychom mohli popsat rychlost proudění nějakého média (kapaliny, plynu), budeme předpokládat, že částice tohoto média se pohybují po trajektoriích, které se nazývají proudnice. Budeme-li sledovat chování média v kartézské soustavě souřadnic (osy X, Y, Z), pak projde průřezem A_1 , rychlostí v_1 a za čas Δt celkový objem média ΔV , který lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\Delta V = A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Přitom předpokládáme, že médium je nestlačitelné a proudění laminární. Rychlost může být buď konstantní (proudění stacionární), ale může být i časově závislá (nestacionární proudění), tedy proměnná a potom za stejný časový interval musí projít i průřezem A_2 stejný objem média rychlostí v_2 , takže platí:

$$\Delta V = A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

$$A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

3.1.2 Základní rovnice

Pro výpočty a analýzu v oblasti proudění používáme některé známé základní rovnice. Tyto rovnice se dají popsat v různé formě, v reálné i v diferenciální podobě, což je nutné definovat v případě využití CFD simulací (Computational-Fluid-Dynamics).

Rovnice kontinuity [11]

Tato rovnice (3.4) vychází ze vztahů v rovnicích (3.1) a (3.2) a říká, že při stacionárním proudění zůstává celkové množství proudící hmoty beze změny (princip zachování hmoty).

To znamená, že pokud se zmenší nebo zvětší průměr trubice, kterou dané médium proudí, dojde k odpovídajícím změnám rychlosti a tlaku. Dá se tedy říci, že platí, že proud média, vstupující do bodu A musí ve stejném množství opustit bod B ($m_1 = m_2$).

Podél proudové trubice potom musí platit následující rovnice:

$$R = A \cdot v, \quad (3.4)$$

kde veličina R je objemový tok (m^3/s), A je plocha a v je rychlost proudění.

Rovnice (3.4) se nazývá rovnice kontinuity proudění a vyjadřuje stálost objemového toku média určitým průřezem. V praxi to znamená, že průtok média je rychlejší v užším průřezu (proudnice jsou blíže u sebe) než v průřezu širším (proudnice jsou od sebe vzdáleny).

Vynásobíme-li veličinu R hustotou média ρ , dostaneme výraz $A \cdot v \cdot \rho$, který představuje hmotnostní tok (kg/s). Z toho je patrné, že při průtoku je zachována jak stálost objemového toku média, tak i jeho hmotnostní objem.

Zachování impulzu

Zachování impulzu hraje v mechanice proudění velkou roli. Malé částičky média kolidují mezi sebou a uvolňují tím impulzy. Těmito kolizemi je proudění velmi silně ovlivněno. Impulzní chování vychází přímo z druhého a třetího Newtonova axiomu. Změna impulzu v čase je vyjádřena jako součin sumy hmotnostních sil a hmoty plus sumy povrchových sil krát plocha povrchu, což lze matematicky vyjádřit rovnicí (3.5). [3]

$$\frac{d}{dx} \int \rho \cdot w \cdot dV = \int \rho \cdot F_m dV + \int_A F_0 dA \quad (3.5)$$

Bernoulliova rovnice [32]

Bernoulliova tlaková rovnice je jednou z nejdůležitějších definicí v mechanice proudění. Týká se energií jednotlivých částic daného média. Každá částice média má svoji potenciální energii a energii ve formě tlaku. U proudících médií, tak jak je tomu v případě průtahových pecí pro pájení přetavením, k tomu ještě patří kinetická energie. Budeme-li vycházet ze vztahů (3.2) a (3.3), potom lze pro výšku v tíhovém poli y_1 , rychlost média v_1 a tlak média v místě vstupu p_1 a tytéž veličiny y_2 , v_2 a p_2 v místě výstupu napsat při stacionárním proudění média s konstantní hustotou ρ následující rovnici:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot y_2, \quad (3.6)$$

kde p je tlak, ρ je hustota, v je rychlost proudění, y_1 a y_2 je výška a g je gravitační zrychlení.

Na základě energetických úvah lze napsat obecně platný vztah [12]:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot y = \text{konstanta} \quad (3.7)$$

Vztah (3.7) je Bernoulliho rovnice, která říká, že pro ustálené stacionární proudění je součet kinetické a potenciálové energie objemové jednotky a tlaku všude stejný. Vzhledem k tomu, že proudění v kontinuální přetavovací peci je vodorovné, lze položit hodnotu $y = 0$, pak vztah (3.6) přejde na tvar:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (3.8)$$

Ze vztahu (3.7) potom lze vyvodit nepřímou úměru mezi rychlostí a tlakem proudícího plynu, což znamená, že když vzrůstá rychlost proudění plynu, tak klesá jeho tlak a naopak.

3.1.3 Vlastnosti látek

Abychom mohli analyzovat a vyhodnotit aspekty proudění, je třeba si říct něco ke stavbě daného média, dané látky, resp. plynu. Média obecně mění silně své vlastnosti v závislosti na tlaku a teplotě. Protože u plynů je hustota velmi závislá na teplotě, dá se vyjádřit známou zákonitostí. Ve fyzice bylo prokázáno, že ideální plyny se chovají při nízkých hustotách podle vztahu [11]:

$$p \cdot v = n \cdot R \cdot T, \quad (3.9)$$

kde p je tlak plynu, V je objem plynu (m^3), n je počet molů plynu a R je plynová konstanta.

Plynová konstanta má pro všechny plyny hodnotu

$$R = 8,314 \frac{J}{K \cdot mol} \quad (3.10)$$

Rovnice (3.9) popisuje makroskopické vlastnosti plynu a lze podle ní nalézt mnoho dalších vlastností ideálního plynu [11]. Někdy je nazývána jako spojený zákon Boyle-Gay Lussacův [2].

3.1.4 Podobnostní čísla [13]

Experimentální měření není často možné provádět v měřítku 1:1. Proto se testy a měření často provádí na geometricky zmenšených modelech. Na základě podobnosti lze potom analyzovat výsledky a využít je pro přepočítání na skutečný předmět (např. letadlo apod.).

K nejznámějším podobnostním číslům patří Machovo číslo, které udává poměr rychlosti objektu vůči rychlosti zvuku. Nejčastěji se s tímto číslem setkáváme při posuzování rychlosti letadel nebo mezikontinentálních raket.

V oblasti zkoumání proudění uvnitř pájecí pece se vyskytují další podobnostní čísla.

Reynoldsovo číslo Re (-) je bezrozměrný identifikátor, který se používá k výpočtům v oblasti proudění a dá se definovat jako poměr setrvačné síly a viskozity, popisuje tedy odpor prostředí vzhledem k vnitřnímu odporu média. Čím je toto číslo větší, tím je menší vliv vnitřního odporu média na celkový odpor proudění. Při malém Reynoldsovu čísle je proudění laminární, velké označuje turbulentní proudění. Jako hranice mezi turbulentním a laminárním prouděním je bráno Reynoldsovo číslo 2 320. To platí především pro proudění uvnitř uzavřené trubice. U otevřeného kanálu potom klesá k hodnotě cca 500.

Využití nalézá hlavně při výpočtech obtékání těles, např. v oblasti konstrukce letadel. Výpočty a měření na modelu se jednoduše vynásobí poměrem modelu ke skutečnému předmětu (letadlu) a umožní tak posoudit chování daného tělesa, například ve vzduchovém tunelu.

Dá se popsat vztahem:

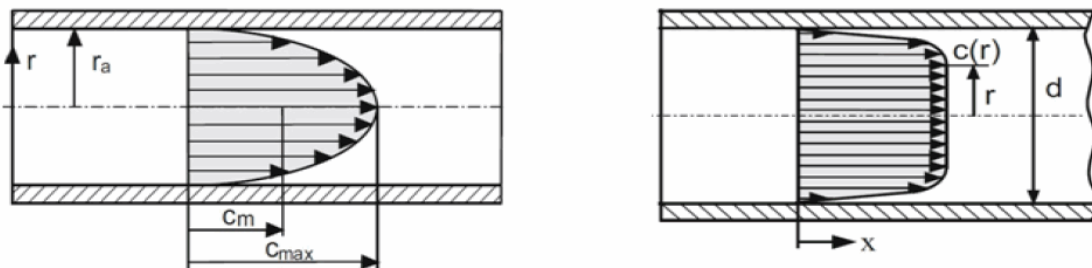
$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3.11)$$

kde v je rychlost proudění (m/s), d (m) je charakteristický rozměr (např. průměr otvoru, kterým plyn proudí) a ν je kinematická viskozita (m^2/s). Hustota je označena ρ (kg/m^3), η potom označuje dynamickou viskozitu ($N \cdot s/m^2$).

Dynamická viskozita η se tak dá vypočítat z kinetické viskozity ν na základě vztahu:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (3.12)$$

Při změně laminárního na turbulentní proudění dochází v proudícím médiu ke kolísání rychlosti, což vede k impulznímu chování na přechodu mezi oběma druhy proudění. Střední rychlost potom vyjádřená graficky vypadá následovně, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění [14]

Nusseltovo číslo Nu (-) je dalším z podobnostních čísel. Udává poměr mezi konvektivním a konduktivním vedením tepla. Popisuje přenos tepla v kapalinách (plynech), pro pevné látky se používá Biotovo číslo.

Je dáno vztahem:

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda} = \frac{l}{\rho_{\vartheta}} \quad (3.13)$$

kde α_K je koeficient přenosu tepla ($W/m^2 \cdot K$), λ je tepelná vodivost ($W/m \cdot K$), ρ_{ϑ} je hustota (kg/m^3) a l je charakteristický rozměr (m). Pokud je Nusseltovo číslo menší než 1, hovoříme o laminárním proudění, pokud je vyšší, je proudění turbulentní.

Prandtlovo číslo Pr (-) je dalším z podobnostních čísel. Vyjadřuje poměr mezi kinematickou viskozitou a teplotní vodivostí. Tím je vyjádřeno, zda při přenosu tepla hraje větší roli konvekce nebo kondukce.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\lambda} \cdot \rho \cdot c = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} \quad (3.14)$$

kde ρ je hustota (kg/m^3), η je dynamická viskozita ($N \cdot s/m^2$), λ je tepelná vodivost ($W/m \cdot K$), c je specifická tepelná kapacita ($J/m \cdot K$), a je teplotní vodivost (m^2/s) a ν kinematická viskozita (m^2/s).

Grashoferovo číslo Gr (-) se používá v oblasti dynamiky tekutin a přenosu tepla, vyjadřuje poměr vztlaku a viskózní síly v kapalině.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.15)$$

kde g je gravitační zrychlení (m/s^2), β je koeficient roztažnosti ($1/K$), L je charakteristický rozměr (délka) (m), T je teplota (K) a ν kinematická viskozita (m^2/s).

Kombinace Grashofova a Prandtlova čísla se používá pro výpočty volné konvekce.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu \cdot a} \quad (3.16)$$

Pomocí podobnostních čísel je možné řešit problémy s prouděním. Například odtrhávání proudnic při malém Reynoldsově čísle, problémy rázové vlny při vysokém Machově čísle apod.

3.2 Konvekce a konvekční pece

Již od devadesátých let minulého století zaujímá konvekční ohřev velmi významnou úlohu při výrobě elektronických sestav a dnes je nejrozšířenějším způsobem přenosu tepla na pájený výrobek. Teplo se zde přenáší pomocí proudícího média, nejčastěji vzduchu nebo dusíku. Jsou ovšem známy také jiné kombinace, např. příměs vodíku (5-7 %, redukční atmosféra), různých formovacích plynů apod. Použité médium přenáší teplo na výrobek tak, že je nejdříve ohřáto na nastavenou teplotu a vynuceným pohybem (pomocí ventilátoru) potom předá tepelnou energii pájenému výrobku.

Základním popisem resp. parametrem tohoto přenosu je tzv. teplotní profil, který je vyjádřen jako závislost průběhu teploty na čase. Existuje celá řada různých teplotních profilů, avšak výstižně lze rozeznat dva základní profily - sedlový a lineární. Jak už samotný název říká, je každý z názvů těchto profilů spojen s tvarem teplotní křivky. [4]

U sedlového profilu se nejprve výrobek předejde, potom setrvává na určité teplotní hladině (dochází k aktivaci chemických komponent v tavidle) a pak následně probíhá proces vlastního přetavení pájky. Po přetavení následuje postupné ochlazení výrobku až na teplotu okolí.

U lineárního profilu dochází k postupnému ohřevu na teplotu blízkou liquidu (teplota tavení použité slitiny) a pak jako u sedlového profilu k následnému ochlazení. Tento profil má zpravidla menší strmost teploty ohřevu, což má pozitivní vliv na výsledky pájení. Ochlazení výrobku hraje velkou roli ve výsledné struktuře pájeného spoje. Rychlejší ochlazení přináší jemnější strukturu, může však být limitujícím faktorem pro vnitřní pnutí základního materiálu desky spojů, součástek nebo keramického substrátu. Vždy je tedy třeba individuální nastavení pro výrobek nebo skupinu výrobků.

Strmost ohřevu, kterou dosahují používaná zařízení, se popisuje v technické praxi jako gradient ohřevu. Tato veličina je velmi důležitá především v počáteční a koncové fázi pájecího procesu, tedy v předejde a v chladicí zóně. Strmost náběhu tepelného profilu musí být v určitých mezích, většinou definovaných výrobcem pájecích past a dalších látek, vstupujících do procesu pájení. Strmější ohřev může mít negativní vliv na kvalitu pájení, např. vznik efektu zvedání součástek (thombstoning efekt), vzniku trhlin ve spoji apod. [4]

3.2.1 Proudění v konvekčním ohřevu

Přenos tepla v obecném pojetí je fyzikální proces přenosu tepelné energie z teplejšího tělesa (prostředí) do tělesa (prostředí) chladnější. Konvekce je proces, při kterém dochází k přenosu tepelné energie na zpravidla pevnou látku, prostřednictvím nějakého proudícího média, plynu nebo kapaliny. Příčinou pro proudění (transport energie) mohou být různé faktory, například přitažlivost, tlak, hustota, teplota nebo rozdíl koncentrace. Rozlišujeme následující tři typy přenosu tepla konvekcí:

1. Volná (přirozená) konvekce, vyvolaná rozdílem hustoty použitého média
2. Vynucená konvekce, vnější vlivy, např. pumpy (exploze) nebo ventilátory
3. Změna fáze odpařováním nebo kondenzací

Účinnost přenosu tepla závisí na koeficientu přenosu tepla α , který nám přenos tepla charakterizuje. Základní, obecně platnou rovnicí pro přenos tepla lze napsat ve tvaru (Newtonův zákon) [10], [11]:

$$\frac{dQ}{dt} = F_c = \alpha \cdot A \cdot (T_h(t) - T_t(t)), \quad (3.17)$$

kde $\frac{dQ}{dt} = F_c$ je tepelný tok (W), $(T_h(t) - T_t(t))$ vyjadřuje teplotní rozdíl v místě přenosu tepla (K), A je plocha přestupu tepla (m^2) a α je koeficient přenosu tepla ($W/m^2 \cdot K$).

Koeficient přenosu tepla α je komplexní parametr, který závisí na hustotě, rychlosti proudění média a v neposlední řadě i na vlastnostech povrchu zkoumaného tělesa. Hodnota tohoto koeficientu dosahuje v plynech typicky velikosti v rozmezí 5 až $500 W/m^2 \cdot K$. [4]

Pokud lze považovat proudící médium a vlastnosti povrchu za konstantní, pak lze rovnici (3.17) upravit na tvar vyjadřující tzv. hmotnostní průtok q_m , kterým se označuje hmotnost média (plynu), která projde za jednotku času průtočným průřezem v určitém systému. Lze ho vyjádřit vztahem:

$$q_m = A \cdot v \cdot dt, \quad (3.18)$$

kde A je průřez průtokového místa (m^2), v je rychlost průtokového plynu (m/s) a dt je časový interval (s).

Výpočet přenosu tepla konvekcí vypadá na první pohled velmi jednoduše, pokud známe hodnotu koeficientu přenosu tepla. Bohužel ve většině případů nám právě tato hodnota chybí.

Parametry (např. rychlost proudění, hustotu použitého média atd.) ovlivňující koeficient přenosu tepla často známe. Neznáme ale sílu jejich vlivu na výslednou hodnotu, která velmi závisí na konkrétních podmínkách a především se v čase neustále mění. Přesto lze pro běžné případy najít exaktní vyjádření přenosu tepla. V případě matice kulatých trysek (kulaté otvory ve velké desce) byla situace popsána v literatuře [6] následujícím vztahem:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2} \cdot \left(1 - 2,2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}\right)}{1 + 0,2 \cdot \left(\frac{H}{D} - 6\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}} \cdot Re^{\frac{2}{3}} \cdot Pr^{0,42} \cdot \left[1 + \left(\frac{\frac{H}{d}}{0,6 \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}}\right)^6\right]^{-0,05} \quad (3.19)$$

kde λ je tepelná vodivost plynu ($W/m \cdot K$),

d je průměr trysek (m),

D je rozteč trysek (m),

H je vzdálenost mezi tryskami a cílem (m),

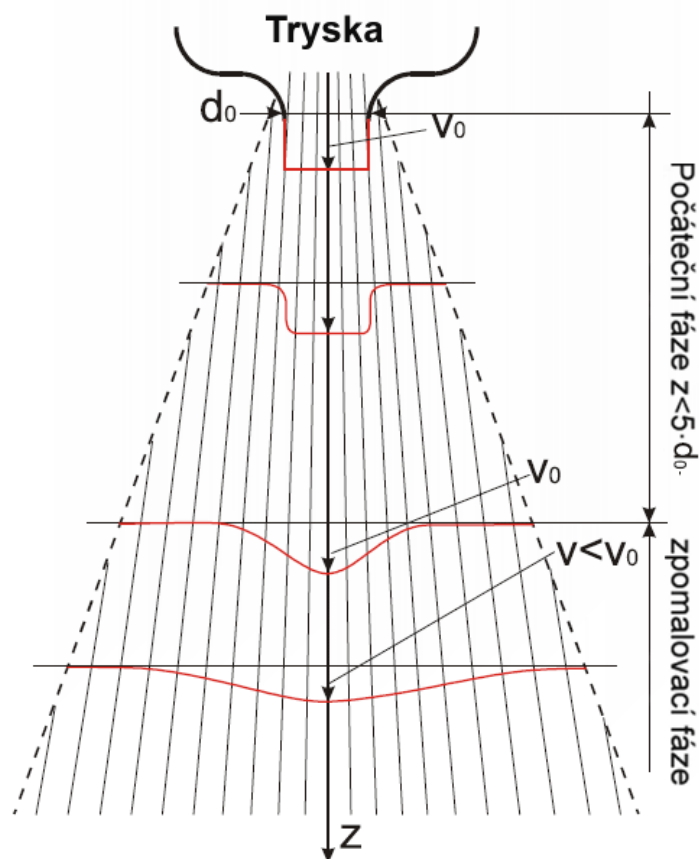
Re je Reynoldsovo číslo (-),

Pr je Prandtlovo číslo (-).

Rovnice (3.19), která je uvedena v předchozím textu, byla odvozena ze systematické série experimentů. Bohužel tato metoda dává pouze průměrnou hodnotu α a neumí se vypořádat se změnami ohřivacího systému (kontaminace, stárnutí atd.). Kromě toho je v mnoha případech obtížné určit přesnou hodnotu některých parametrů, např. rychlost a hustotu plynu, které jsou potřebné pro výpočet čísla Re a Pr.

Nejjednodušší výpočty lze provést s přibližnými koeficienty, které vypočteme jako lineární kombinaci rychlosti proudění a pevných konstant.

V pájecích zařízeních se nejčastěji používají kruhové otvory, kterými proudí horký plyn (vzduch, dusík) směrem k výrobku a nahřívá ho nad teplotu liquidu použité slitiny. Je třeba mírného přehřátí, aby došlo k dobré vzlínivosti pájky, zpravidla se udává 5–7 % z absolutní teploty, tzn. při teplotě tavení slitiny 183 °C se na pájeném bodě nastavuje teplota na cca 210–215 °C. Pro začátek budeme uvažovat jednoduchý případ proudění média do volného prostoru, ve kterém v cestě proudu plynu nestojí žádný předmět, s počáteční rychlostí proudění v_0 . Situaci popisuje následující Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Proudění z kruhového otvoru do volného prostoru [10]

Za počáteční fázi proudění považujeme proudění do vzdálenosti přibližně rovné pětinasobku průměru otvoru. Rychlost v ose proudění zůstává přibližně konstantní. Při vzdálenosti větší potom začíná klesat rychlost i v ose proudění. Počáteční hodnota koeficientu přenosu tepla můžeme označit jako α_0 a považujeme ho v počáteční fázi proudění za konstantní, protože hmotnostní průtok je konstantní. S rostoucí vzdáleností dochází

k postupnému růstu koeficientu přenosu tepla, ovšem jeho hodnota je řádově menší, než α_0 (zákon zachování energie musí platit i zde). Po překročení počáteční oblasti potom dochází k exponenciálnímu poklesu rychlosti, koeficient přenosu tepla je v celém proudu plynu konstantní až do doby, kdy rychlost proudění klesne k nule.

V komerčních pájecích zařízeních se využívají celá pole takovýchto trysek. Velkou roli potom v praxi hraje celkové uspořádání sestávající z řady detailů, jako jsou poloha stěn uvnitř zařízení, uspořádání trysek, ale také poloha a velikost nahřívaných součástek procházejících pecí atd.

Pro simulaci proudění je možné zanedbat působení gravitačních sil, neboť síla proudění (změna tlaku) je výrazně převyšuje [16].

3.2.2 Vliv rychlosti proudění

Přenos tepla u vynucené konvekce je vynucen pohybem použitého média, nejčastěji pomocí ventilátorů, ať už radiálních nebo axiálních.

Přenos tepla Q probíhá pomocí elementárních částic použitého média. Je funkcí času t (tedy rychlosti pohybu v pájecím zařízení), ohřivané plochy A , rozdílu teplot mezi výrobkem a jeho okolím ΔT a v neposlední řadě koeficientu přenosu tepla α , což vyjadřuje vztah (3.20) odvozený z rovnice (1.1).

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad (3.20)$$

Protože ohřev je především (mimo již zmíněný koeficient přenosu tepla) funkcí času, závisí na rychlosti pohybu výrobku uvnitř pájecího zařízení dosažená maximální teplota. U kratšího zařízení je tedy třeba zvýšit rychlost a teplotu, aby bylo dosaženo potřebného profilu teplot. Situaci znázorňuje Tab. 3.1. Je tedy patrné, že pro stejný průběh teplotního profilu je třeba odlišné nastavení jednotlivých topných zón.

Tab. 3.1: Závislost teploty na rychlosti transportu v průběžné peci [4]

Rychlost transportu (mm/min)	Teploty potřebné k pájení												
	500	140	150	160	170	180	190	275	280	290	90	30	30
1 000	160	170	180	190	200	210	330	340	345	90	30	30	30

Jedním z důležitých parametrů pájení je jeho čas cyklu, tedy jak často vychází z pájecího zařízení hotový výrobek. Ten lze vypočítat s pomocí jednoduché rovnice:

$$T_c = \frac{L_{DPS} - L_{mezera}}{v_{TR}}, \quad (3.21)$$

kde L vyjadřuje délku pájené desky plošných spojů a délku mezery mezi jednotlivými deskami v mm, v_{TR} je rychlost transportu (mm/min). Mezera musí být nastavena na 8–10 cm, aby vstupní a výstupní čidla mohla správně fungovat. U některých desek spojů jsou vyfrézované otvory, které by mohly spouštět falešné signály o začátku nebo konci desky, proto rozteč mezi deskami musí být větší, než tato mezera.

Významnou roli v přenosu tepla hraje již zmíněný koeficient přenosu tepla. Je to systémová veličina, která popisuje, jak účinný je daný systém pro přenosu tepla. Typické hodnoty pro konvekci leží v rozsahu 25–70 W/m²·K. [4]

Pro přenos tepla kondenzačním procesem jsou koeficienty několikanásobně větší (řádově stonásobně). [4]

Tento koeficient silně závisí na rychlosti proudění použitého média a na vzdálenosti měřeného bodu od zdroje tepla. Čím je proud média silnější a vzdálenost k cílovému bodu menší, tím je α větší.

V praxi dnes slouží pro nejlepší dosažitelný přenos tepla dvě hlavní konstrukční opatření.

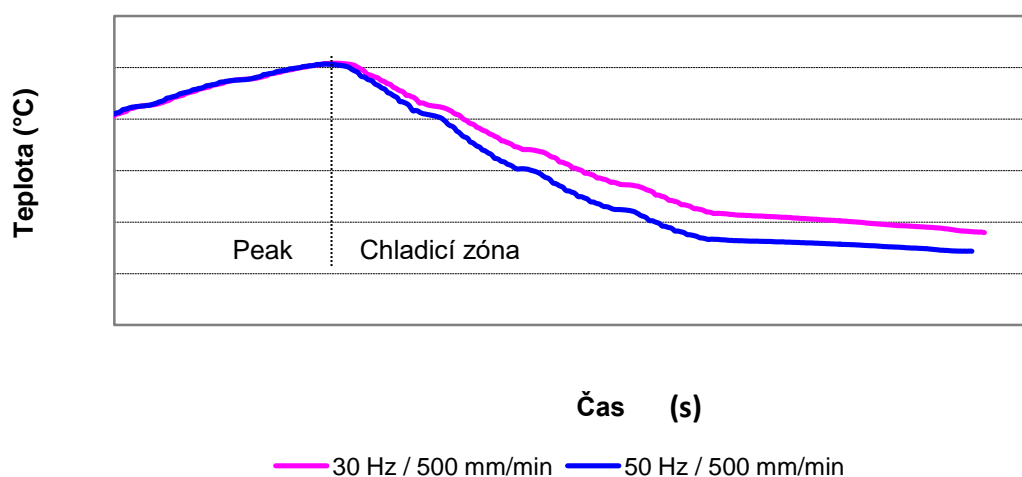
1. Průchodnost zařízením je z horní strany DPS omezena na max. 30 mm (v současnosti je to v podstatě průmyslový standard). Tím je definován minimální odstup zdroje tepla od výrobku.
2. Rychlost proudění plynu, který ohřívá pájený výrobek, musí být omezen na určitou maximální hodnotu, aby nemohlo dojít v důsledku proudícího média ke změně polohy součástky z její pozice. Typická hodnota u současných zařízení by neměla překročit hodnotu 6 m/s.

Rychlost proudění lze řídit tak, že použité střídavé motory jsou připojeny na frekvenční měniče. Ty jsou potom nastaveny tak, aby nemohlo dojít k posunu součástek po DPS. V případě velmi jemných součástek (např. LED diod) a součástek s malými rozměry roztečí vývodů lze potom specificky pro daný výrobek optimalizovat frekvence otáčení (výkon a rychlost proudění). Určitou nevýhodou tohoto řešení je skutečnost, že frekvenční měnič vždy řídí skupinu ventilátorů, nelze tedy nastavit rychlost pro každý ventilátor zvlášť. V poslední době se prosazují stále více do pájecích zařízení tzv. EC motory (electronically controlled), které lze řídit každý samostatně včetně zpětné informace o teplotě motoru, jeho vibracích apod., což zároveň přispívá k dalšímu rozvoji techniky v oblasti zavádění průmyslového standardu Industry 4.0. Motory jsou připojeny na sběrnici RS485 (průmyslová sériová linka), po které řídicí systém určuje, kdy a jakou rychlostí se každý jednotlivý motor bude točit. Změnu nastavení u dusíkových pecí ale nelze měnit zcela libovolně. Je to kvůli zachování ochranné atmosféry, kdy musí být zachováno proudění uvnitř pájecí pece tak, aby vzduch (tzn. kyslík) nemohl být nasáván dovnitř pece.

Otáčkami ventilátorů lze potom (spolu s nastavením teploty dané topné zóny) přímo ovlivňovat teplotu v peci podle typu součástek osazených na DPS, jak naznačuje Tab. 3.2 a jak vyplývá z průběhů teploty uvedených na Obr. 3.3.

Tab. 3.2: Vliv otáček ventilátorů na teplotu součástek po průchodu peci [4]

	Malá součástka [R 0603]	Velká součástka [C, d10mm, h12mm]	Rozdíl teploty
Otáčky	T_p (°C)	T_p (°C)	ΔT_p (°C)
30 Hz	233	218	15
50 Hz	244	233	11



Obr. 3.3: Vliv regulace otáček ventilátorů v chladicí zóně na profil ochlazování [4]

Změna rychlosti proudění se využívá i v chladicí zóně pájecí pece. Tam sice probíhá z pohledu teploty opačný jev (tedy odebrání tepla výrobku proudícím vzduchem nebo dusíkem), z pohledu přenosu tepla je to ovšem stejné. Vhodným nastavením frekvence ventilátorů lze ovlivnit koeficient přenosu tepla, tedy vlastně strmos tteplotního přenosu. Pro daný typ substrátu (jeho složitosti) lze tímto způsobem dosáhnout optimální parametry pájecího procesu.

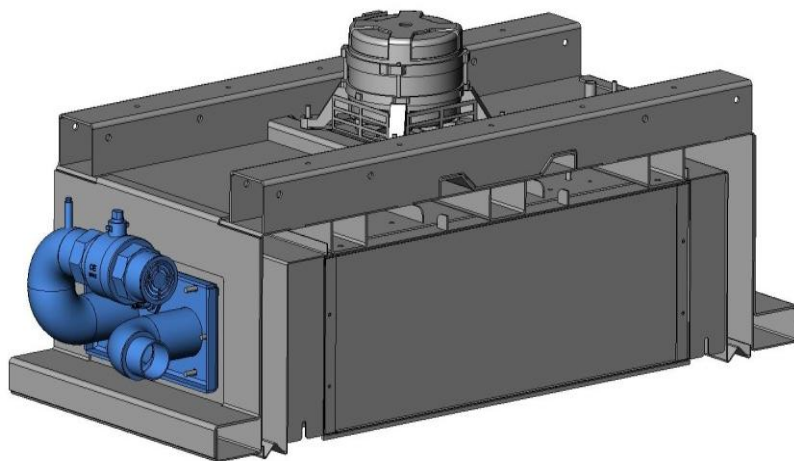
3.2.3 Vliv rozdílové teploty

Rozdílovou teplotou uvažujeme v tomto případě rozdíl teploty mezi výrobkem a teplotou v pájecí zóně. Čím je tento rozdíl větší, tím více tepla může být předáno, přenos tepla stoupá. Lze tak velmi snadno dosáhnout řízení strmosti ohřevu v první zóně např. od 0,8 do 2 K/s.

Důležitou skutečností také je, že dvě sousední zóny jsou vzdáleny od sebe jen několik centimetrů a proto není snadné dosáhnout velkého rozdílu teplot mezi nimi. Samozřejmě existuje technické řešení, které v místě hranice obou zón přebytečné teplo z teplejší zóny odebere a odvede pryč z procesní komory pájecího zařízení tak, aby rozdíl mezi zónami zůstal

zachován. Změřit takovéto rozdíly je možné pouze s termočlánkem, který měří teplotu vzduchu. Ale přitom každá součástka je připojena k substrátu a tím vytváří společně určitou tepelnou hmotu, která způsobuje průměrování hodnot a pomalejší reakci, což lze chápat jako akumulací efekt. Při pájení zpravidla dosahujeme rozdílu teplot přibližně 25 °C.

Ve zvláštních případech je však třeba dosáhnout rozdílu většího, až 80 °C. Zpravidla se jedná o rozdíl mezi posledním přehřevem a první přetavovací (peak) zónou. Toho dosáhneme např. tzv. chlazením posledního přehřevu [17]. To je založeno na principu, že v poslední přehřevové zóně je zabudována trubka, přes jejíž stěnu se odebírá přebytečné teplo (ovládáno ventilem, který je řízen ovládacím softwarem). Dojde ke snížení teploty při zachování ochranné atmosféry. Přebytečné teplo se ze zařízení převede do odsávání. Možné řešení je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 3.4), a průběh teploty na rozhraní zón pak na Obr. 3.5.

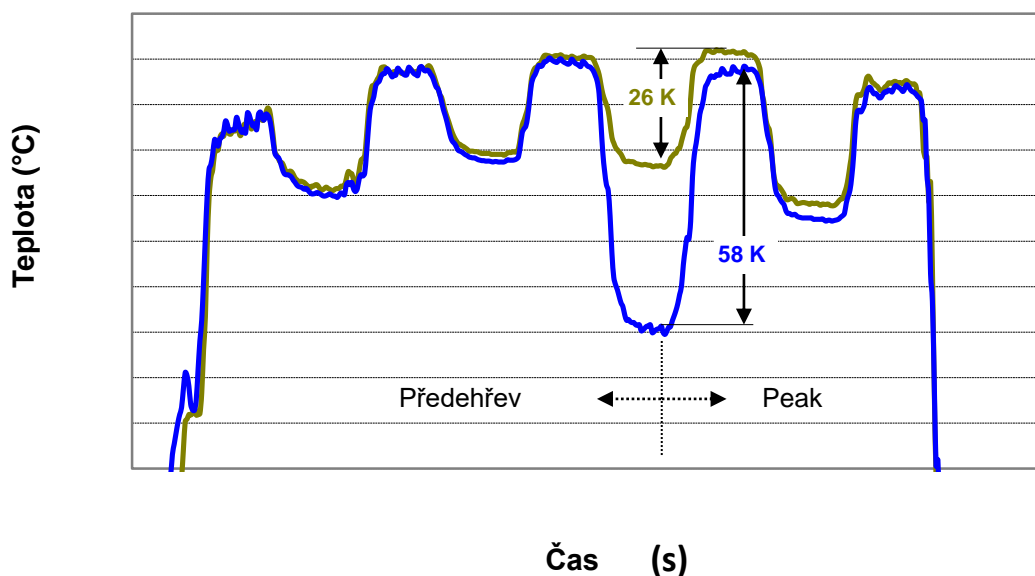


Obr. 3.4: Řešení ochlazování posledního přehřevu v pájecím zařízení [4]

Zobrazené řešení na Obr. 3.4 přispívá k zachování předpokládaného požadovaného teplotního profilu daného zařízení i jeho dalších souvisejících vlastností. Zde máme na mysli především příčný profil, tzn. rovnoměrnost teplot ve směru napříč pohybu transportu v průběžné pájecí peci. K tomu přispívá nemalou měrou také vhodná konstrukce topné zóny. Ventilátor, který prohání horký plyn (nejčastěji vzduch nebo dusík) přes výstupní děrovanou desku směrem k výrobku, musí proudící plyn řádně promíchat. Potom lze optimální konstrukcí dosáhnout velmi homogenní teploty na výstupu zóny. Pokud by rozložení teploty v příčném profilu nebylo rovnoměrné, bylo by tím značně omezené a deformované tzv. procesní okno, tedy soubor parametrů, které je nutno dodržet dle specifikace dané výrobcem pasty a součástek pro pájecí proces.

V praxi existuje více možných nastavení pájecí pece tak, aby byly splněny podmínky pro správný teplotní profil. Především jde o to, nepřehřát malé součástky a naopak ty velké dostatečně prohřát. Dá se toho docílit vhodným nastavením pájecího zařízení, přičemž směrodatný je přitom tzv. „čas přes liquidus“, tzn. čas, po který výrobek dosahuje teploty nad bodem tavení. Tento čas nesmí být ani moc krátký, protože by nedošlo k řádnému prohřátí pájeného bodu (zvláště u velkých součástek), a nebylo by dosaženo potřebné teploty pro

tavení použité pájky. Naopak, pokud by tento čas byl příliš dlouhý, dojde k vyčerpání (přehřátí) tavidla a tím ke zhoršení kvality pájení. Dále by mohlo také dojít k překročení povolené tepelné odolnosti součástek, což opět zase může vést v konečném důsledku ke snížení spolehlivosti pájených sestav. Zpravidla se tento čas pohybuje v rozmezí 30-90 sekund.



Obr. 3.5: Vliv aktivovaného ochlazování posledního předeheřevu na teplotní profil [4]

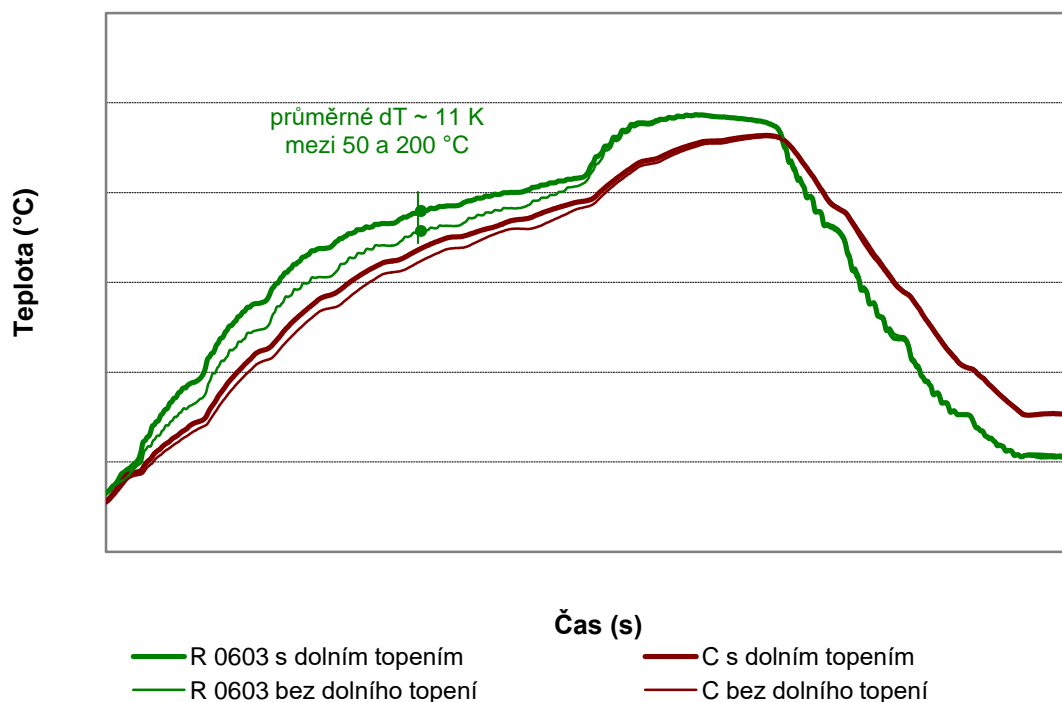
Na základě uvedených skutečností lze konstatovat, že nastavení teplot v pájecím zařízení pro dodržení požadovaného pájecího teplotního profilu je specifickou záležitostí a musí být řešeno pro každý konkrétní typ výrobku a použitou pájecí slitinu, pokud má být zajištěna kvalita a životnost pájených spojů.

3.2.4 Vliv topení zespodu

V minulosti bylo standardem u pájecích pecí, že měly umístěny topné zóny jen shora. Zdola byla umístěna topná tělesa případně jen v oblasti přetavovací zóny. Pro pájení olovnatými pájkami s teplotou liquidu kolem 183 °C to nepředstavovalo žádný problém, avšak přechod na bezolovnaté pájecí slitiny je na změny teploty citlivější.

S příchodem bezolovnaté pájecí technologie (a také stále komplexnějších a složitějších sestav na DPS) je stále aktuálnější situace, kdy je nutné zajistit co nejrovnoměrnější prohřátí DPS s umístěnými součástkami. Toho lze sice dosáhnout i bez spodního topení, ale strmost ohřevu je pak výrazně nižší a tím pádem by celý proces trval mnohem déle, než je požadováno.

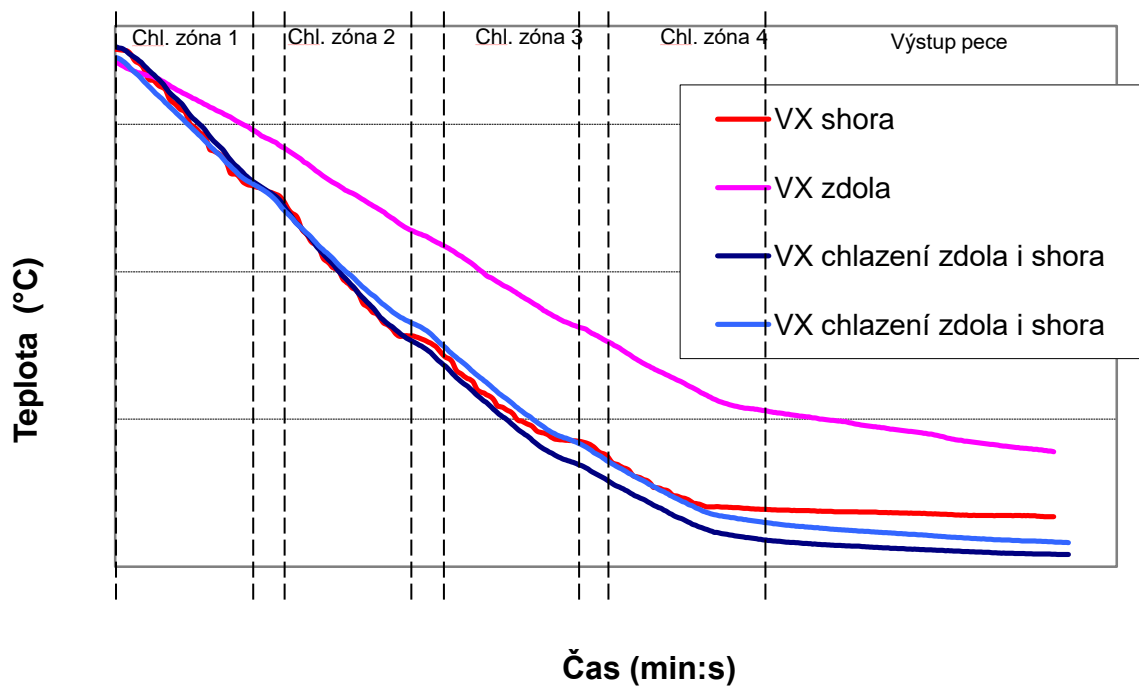
Topení ze spodní strany proto významně přispívá k prohřátí výrobku a podporuje tak výrazně kvalitu celého pájecího procesu a následně i vzniklého spoje. Rozdíl teploty při pájení se zabudovaným dolním ohřevem činí oproti konstrukci bez dolního ohřevu až 11 K, jak ukazuje Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Vliv aktivovaného topení zdola na teplotní profil pájecí pece [4]

Podobný vliv na teplotní profil pájecího procesu má i chlazení v klesající části teplotního profilu, které může působit jak shora, tak zespodu. Zde jde o přenos tepla z výrobku o vyšší teplotě do okolí s nižší teplotou. Principiálně se jedná u obou možností o ten samý proces.

Na Obr. 3.7 jsou znázorněny průběhy pro jednotlivé způsoby chlazení. Chlazení shora je nejen podstatně účinnější (vyšší strmost ochlazování), ale především u komplexních mnohvrstvých DPS přispívá významně k rovnoměrnému a bez stresovému ochlazování právě chlazení zespodu. Kombinací obou způsobů se dosáhne potřebné nastavení strmosti poklesu teploty, jak je patrné z průběhů na Obr. 3.7. Správně nastavená strmost poklesu teploty minimalizuje vnitřní pnutí mezi DPS a součástkami, které může způsobovat porušení homogenity pájených spojů, a tím vyvolat vznik poruch, které mají za následek nefunkčnost výrobku. Tento problém se může projevit až po nějakém čase, což ještě zvyšuje jeho nebezpečnost.



Obr. 3.7: Vliv chlazení shora, zdola a z obou stran [4]

Na závěr této kapitoly lze ještě dodat, že významný přínos dolního ochlazování je zvláště prokazatelný u keramických substrátů, u nichž je citlivost (vnitřní pnutí) na rovnoměrné ochlazování značně zvýšená (především u LTCC technologie).

4 Měření konvekčního proudění v průtahové peci

4.1 Příklady aplikace konvekčního vytápění

V následující části je zaměřena pozornost pouze na používané způsoby vytápění s vynucenou konvekcí, kde proudí nějaký druh plynu (nejčastěji vzduch nebo dusík). Pokud by proudění plynu bylo laminární, byla by jeho analýza mnohem snazší než u jiných toků tekutin nebo plynů, kde tento stav neexistuje. Proto zpočátku budeme uvažovat tuto jednoduchou variantu laminárního proudění. Budeme ji považovat za typickou aplikaci konvekčního vytápění z hlediska proudění plynu. Potom lze prezentovat jednoduché modely proudění plynu, které ukazují, jaký vliv mají měnící se parametry proudění na hodnotu součinitele přenosu tepla. Nejběžnějším a nejpoužívanějším příkladem konvekčního vytápění je vytápění s koncentrovanými proudy plynu. Proudí přes trysky o definovaném průměru (např. d_0) do volného prostoru, kde je umístěn nahřívaný výrobek nebo elektronická sestava. Před hlubší analýzou je vhodné připomenout základy této technologie, která je teorií volného proudění.

4.1.1 Teorie volného proudění

Volný proud je jeden samostatný proud plynu vhnáný tryskou do volného prostoru, jak je znázorněno na Obr. 3.2. Proud nemá v cestě žádné překážky ani blokující předměty. Přitom dochází k interakci vycházejícího volně proudícího plynu se stojícím plynem ve volném prostoru, v místě kudy proudí. Volný proud naráží stále více do stojícího plynu, zatímco poloměr kruhu, kde je rychlost proudění stále v_0 , se zužuje v důsledku brzděného účinku stojícího plynu.

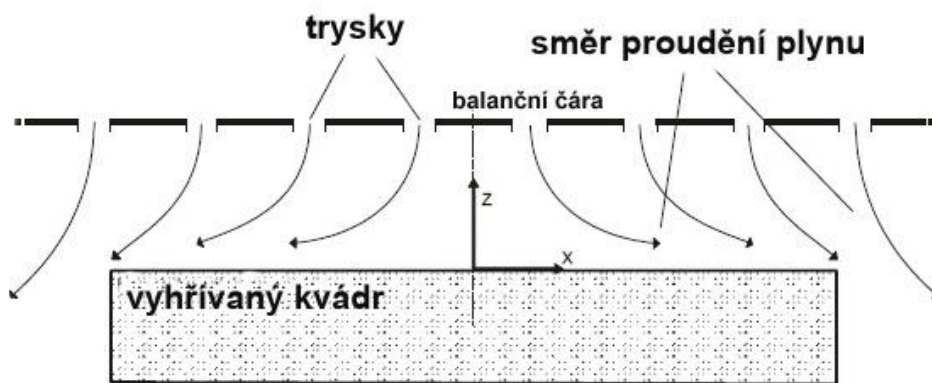
Rychlost zúžení je úměrná vzdálenosti od trysky. Přibližně ve vzdálenosti $z \cong 5d_0$ je rychlost proudu rovna v_0 pouze v ose proudění. Do vzdálenosti $z \cong 5d_0$ mluvíme o počáteční fázi volného proudění, pokud je $z > 5d_0$, je proud již ve fázi zpomalování. V ostatních částech proudění se součinitel prostupu tepla zvyšuje směrem od výtoku, ale v počáteční fázi je menší alespoň o jeden řád než α_0 . Ve fázi zpomalování hmotnostního průtoku klesá exponenciálně pod tryskou spolu s koeficientem přenosu tepla a je téměř vyrovnán v celém volném proudu až do okamžiku, než se rychlost proudění plynu stane nulovou. [10]

4.1.2 Vytápění prouděním plynu

Pro úvahu o vytápění prostoru proudícím plynem lze provést následující případovou studii [9]. Budeme ohřívat kvádrové těleso proudem plynu z tryskové matrice, jak je názorně naznačeno na Obr. 4.1.

Předpokládáme, že vyhřívaný kvádr (těleso) je v dostatečné blízkosti k tryskám, z nichž proudí ohřevové médium. Velikost matrice s tryskami je větší než vyhřívaný kvádr a kolem i pod vytápěným tělesem je vymezen také určitý volný prostor. Trysková matrice tak generuje vertikální proudy plynu, jež jsou považovány za laminární, což představuje výchozí stav.

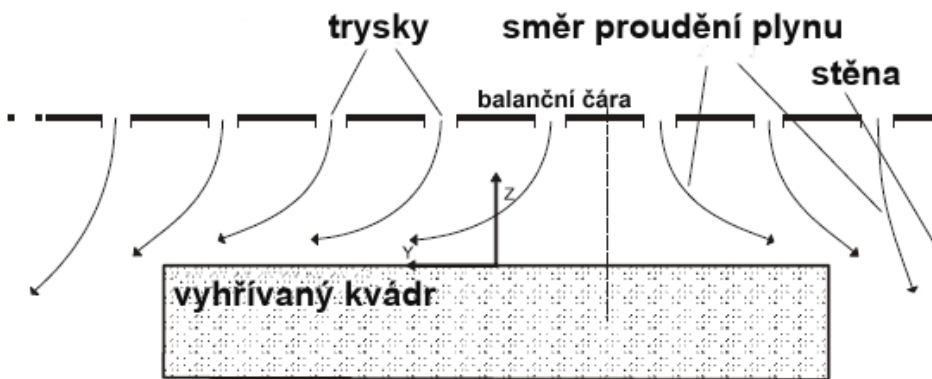
Průměr trysek je mnohem menší než horizontální (půdorysná) velikost vyhřívaného tělesa (kvádr). Toto těleso představující vyhřívaný kvádrový tvar zároveň působí na proudy plynu jako blokovací prvek. Proto lze předpokládat proudění plynu na základě následujících kritérií: vertikální proudy plynu z matrice trysek se stáčíjí a spojují do kontinuálního radiálního toku (výstupní stav) nad kvádrovým tvarem. V daném bodě na povrchu kvádrů je směr proudění radiální vrstvy určen tzv. „balanční čarou“. Balanční čára označuje místo, kde se mění hlavní směr proudění. Proudění plynu se tak stáčí ze směru osy Z do směru osy X. Nulový bod (počátek) souřadnicového systému je umístěn na geometrický střed vyhřívaného tělesa, jak je patrné na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Plyn proudí nad vytápěnou konstrukcí (kvádrem), příčný řez v ose X [14]

Je zřejmé, že směr proudu plynu z dané trysky závisí na poloze vyhřívané struktury (kvádrů) pod maticí trysek. Pokud je systém symetrický podle osy X, můžeme předpokládat, že transportovaná energie je jak ve směru $-X$, tak ve směru $+X$, téměř stejná. Pokud však systém není symetrický, rovnovážná čára se posune do asymetrické pozice.

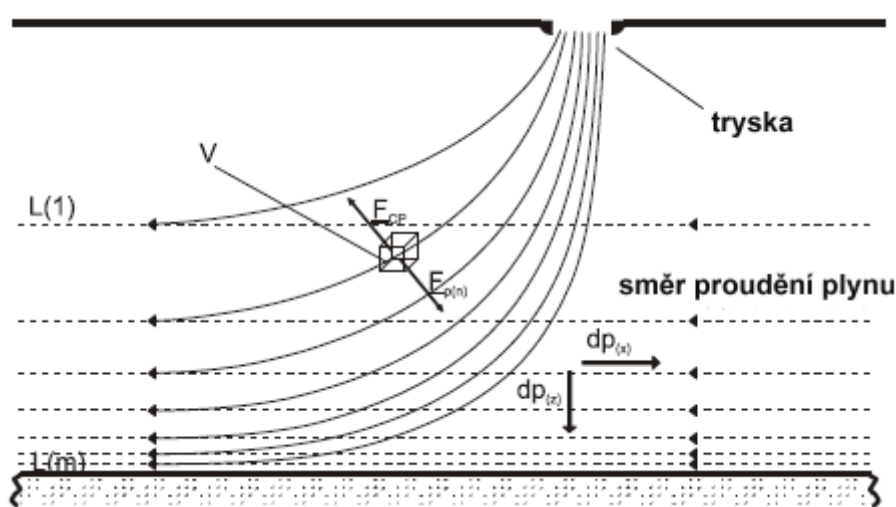
Na Obr. 4.2 je uveden příklad, kde je v blízkosti vytápěné konstrukce umístěna stěna kolmá k ose Y. V tomto případě kvůli blokujícímu účinku boční stěny musí být přenášená hmota a energie menší ve směru $-Y$, než ve směru $+Y$.



Obr. 4.2: Plyn proudí nad vytápěnou konstrukcí (kvádrem), průřez ve směru osy Y [14]

Pro přiblížení reálného stavu v průtahové přetavovací peci budeme studovat vertikálně-radiální transformaci proudění (vytváření vrstvy radiálního proudění) jediného proudu plynu, zkoumat, jak transformace ovlivňuje směr proudění plynu. Model vstupního vertikálního proudu plynu je znázorněn na Obr. 4.3. Změny průtokových parametrů proudění plynu jsou přitom mnohem rychlejší než změny teploty plynu.

Na základě úvah lze model tvorby radiální vrstvy proudění plynu považovat za izotermický a stacionární. Vrstva radiálního toku je rozdělena na další vrstvy od $L(1)$ do $L(m)$. V těchto jednotlivých L vrstvách jsou rychlost proudění, tlak a hustota plynu považovány za konstantní.



Obr. 4.3: Tvorba radiální vrstvy (průřez ve směru osy X) [14]

Na Obr. 4.3 představují přerušované čáry hranice jednotlivých L proudových vrstev. Zkoumáme pohyb elementárního množství plynu v konstantním objemu V . Hodnota m_g je hmotnost v objemu V , která přechází do radiální vrstvy po oblouku. Během toho dostředivá síla F_{cp} (N) a síla $F_{p(n)}$ (N) ze změny tlaku (normální k pohybové dráze) působí na hmotnost m_g o objemu V . Síla vznikající změnou tlaku je definována v normálním souřadnicovém systému pomocí zjednodušené Eulerovy rovnice: [12]

$$F_{p(n)} = m_g \cdot \frac{|v|^2}{R_a} = m_g \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dn} \quad (4.1)$$

Účinek "odlupování" vrstvy vstupního proudu plynu začíná směrem k radiálnímu směru průtokové vrstvy. Poloměry oblouků se zmenšují z $L(1)$ na $L(m)$. Toto platí pro $dp_n(1) < dp_n(2) < \dots < dp_n(m)$. Hustota plynu roste směrem k ohřátému kvádru (způsobená izotermickým stavem).

Soustava rovnic hybnosti ve stacionárním modelu je popsána následující rovnicí:

$$v \cdot \frac{\partial v}{\partial \underline{r}} = \frac{1}{\rho} \cdot \underline{\Phi} \cdot \underline{\nabla} \quad (4.2)$$

V případě proudění plynu lze gravitační sílu zanedbat. Z fyziky je známo, že tenzor napětí $\underline{\Phi}$ (Pa) obsahuje tahová σ a smyková τ napětí [18]. V modelu proudění plynu jsou tahová napětí $s_{xx} = s_{yy} = s_{zz} = -p$, smyková napětí jsou způsobena třením. Značné tření se vyskytuje pouze mezi vrstvou $L(m)$ a povrchem vyhříváné konstrukce. Proto jsou uvažovány pouze dvě následující složky:

$$s_{zx} = \mu \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad a \quad s_{zy} = \mu \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \quad (4.3)$$

(v obou případech lze zanedbat změny složky v_z podél os X a Y).

Tak můžeme tenzor napětí redukovat, a ten poté obsahuje pouze následující prvky:

$$\underline{\Phi} = \begin{bmatrix} -p & 0 & \mu \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ 0 & -p & \mu \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Podle redukovaného tenzoru napětí (4.4) lze některé členy levé strany rovnice hybnosti zredukovat následovně:

$$v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \cdot \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial y \partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4.5)$$

$$v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial z \partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

$$v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (4.7)$$

Rovnice (4.5) až (4.7) ukazují, že především změna tlaku ∂p má velký vliv na rychlost proudění (kromě vrstvy L_m , kde je značné tření). Ukazuje se, že tlak v L proudových vrstvách se při přibližování k vyhříváné konstrukci zvyšuje (viz obr. 4.3). To má za následek skutečnost, že v_z klesá ve směru z směrem ke kvádru a způsobuje pokles součinitele přenosu tepla vstupních proudů plynu ve směru z při přiblížení k vyhříváné konstrukci. Součinitel přenosu tepla radiální proudové vrstvy se musí při přibližování k vyhřívánému kvádru (konstrukci) zvětšovat, a přitom i složky rychlosti v_x a v_y a hustota se také zvyšují. Větší hustota a rychlost vytváří větší hmotnostní tok, viz rovnice (3.17), a zvyšuje součinitel přenosu tepla α v dolní radiální vrstvě. Následkem toho se koeficient přenosu tepla při

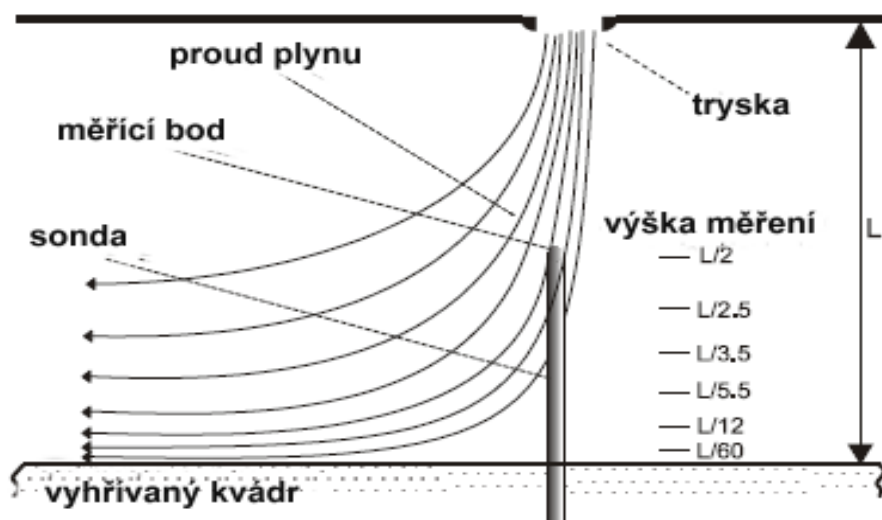
vertikálně-radiální transformaci proudění změni následujícím způsobem: α parametr vstupních proudů plynu z rovnice (3.18) se musí snížit směrem k vyhřívané konstrukci v důsledku přetočení vektoru rychlosti. Naopak α parametr radiální proudové vrstvy se musí zvyšovat směrem k vyhřívané struktuře v důsledku zvyšující se rychlosti a hustotě.

4.2 Měření součinitele přenosu tepla

Jak bylo popsáno v kapitole 2, ve většině případů lze určit přesnou hodnotu součinitele přenosu tepla jen měřením. Proto jsou představeny dva způsoby měření a jsou uvedeny metody výpočtu. S jejich pomocí můžeme určit hodnotu součinitele přenosu tepla α pro dříve ukázané případy (viz kapitola 3.2).

4.2.1 Metody měření [9]

Parametr α je možné přímo vypočítat z rovnice (3.19), pokud lze změřit změny teploty během konvekčního ohřevu. První případ je zaměřen na metodu měření koeficientu přenosu tepla vstupních proudů plynu v závislosti na výšce nad ohříváním prvkem (kvádrem). Změny teploty musí být měřeny tak, aby nedocházelo k narušení proudu proudícího plynu. Proto je nutné pro tento účel použít co nejmenší, bodové, sondy. Tato sonda musí být zároveň velmi rychlá, aby dokázala zachytit i malé změny teploty. Jako vhodný se jeví termočlánek typu K (stíněné provedení), jehož průměr je 1 mm. Uspořádání pro měření je názorně vyobrazeno na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Měřicí zařízení (vstupní proudy plynu, pohled v řezu) [14]

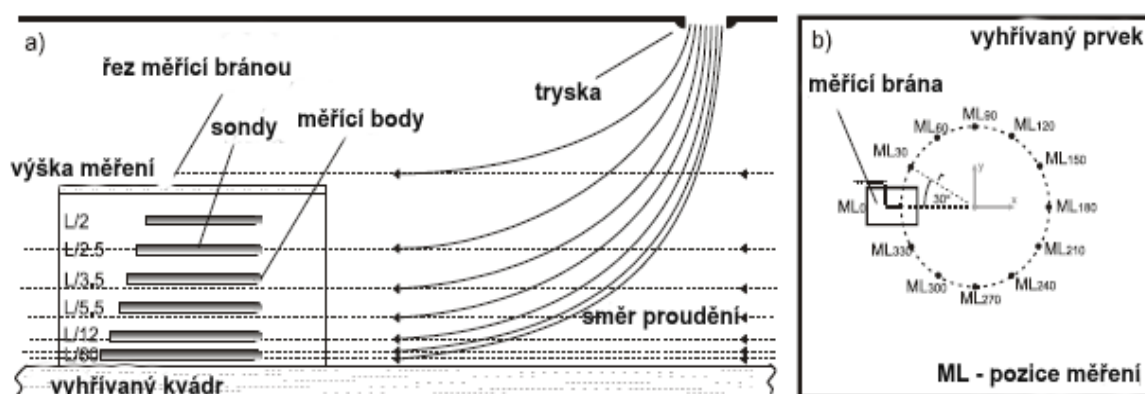
Mechanické uchycení termočláneku musí umožnit, aby měřicí bod byl udržován během měření ve vhodné pozici. Termočlánek se prostrčí připraveným otvorem ve vyhřívaném kvádru a měření musí být provedeno pod tryskami směřujícími k počátečnímu proudu plynu.

Pro studium změn parametrů α proudu plynu nad vyhřívanou konstrukcí je nutné provádět měření v různých výškách. Počáteční měření začíná ve výšce, kde začínají změny rychlosti vstupních proudů plynu. Pravidlem je, že tento bod je blízko $L/2$ (kde L je vzdálenost mezi maticí trysek a vyhřívaným prvkem).

V této případové studii bylo zvoleno šest měřících výšek vyhřívané konstrukce: $L/60$, $L/12$, $L/5,5$, $L/3,5$, $L/2,5$ a $L/2$. Opakovaným měřením na různých místech pod maticí trysek, lze určit rozložení součinitele přenosu na základě funkce výšky nad vyhřívanou konstrukcí. Tento způsob měření umožňuje také zkoumání nehomogenity topného systému (matrice trysek).

Pro studium součinitele přenosu tepla ve vrstvě radiálního proudění je možné použít měřící systém podle Obr. 4.5a. Sondy jsou upevněny v měřící bráně (měřící krabici), která je fixuje v požadované pozici. Přední a zadní konec brány je otevřen tak, aby jím mohl procházet radiální tok, ale horní část brány chrání sondy před rušivým účinkem proudů plynu, které vystupují z matrice trysek. Sondy lze zasunout do brány skrz otvory na bočních stranách. Brána může být vyrobena z jakéhokoli tepelně izolačního materiálu.

Velikost brány závisí na průměru trysek a vzdálenosti mezi maticí trysek a vyhřívanou konstrukcí. Vhodná brána musí být dostatečně úzká, aby zajistila přesné odběry vzorků a zároveň dostatečně široká, aby nezpůsobovala turbulence ve vrstvě radiálního proudění. Musí být a dostatečně dlouhá, aby chránila sondy od rušivého účinku vstupních proudů plynu. Výška je určena výškami měření.



Obr. 4.5: Měřící systém a) měřící zařízení (radiální proudová vrstva, pohled v řezu); b) měření umístění (ML) na vyhřívané konstrukci (pohled shora) [9]

Výhodou tohoto uspořádání je skutečnost, že sondy brání průtoku pouze v místě měřícího bodu, protože byly rovnoběžné s vrstvou radiálního proudu. Měřící body se překrývají a narušení radiální vrstvy je tak minimální. Při měření je vhodné použít stejné měřící výšky jako v případě vertikální měření. U této metody tak lze určit koeficient přenosu tepla ve vrstvě radiálního proudění v závislosti na výšce nad vyhřívanou konstrukcí.

Průběh a chování vrstvy radiálního proudění může způsobit, že koeficient přenosu tepla nezávisí jen na výšce, ale také na směru proudění (jak je to znázorněno v případě blokování na Obr. 4.3). Proto měření α parametru ve vrstvě radiálního proudění musí být provedeno jako nějaký druh měření směrových charakteristik. Změny teploty musí být měřeny na různých místech ve vrstvě radiálního proudění. Měřící místa (ML) jsou tak proto rovnoměrně rozmístěna kolem kruhu, jehož střed je zarovnán na střed vyhřívané konstrukce (Obr. 4.5b). Poloměr kruhu je přibližně čtvrtina menšího půdorysného rozměru vytápěné konstrukce. Pro znázorněný případ bylo zvoleno 12 měřících bodů.

4.2.2 Metoda výpočtu

Parametry α lze vypočítat pomocí tepelné rovnice zkoumaného termického systému:

$$Q_a = Q_c - Q_k, \quad (4.8)$$

kde Q_a je absorbovaná tepelná energie (J),

Q_c je tepelná energie konvekce (J),

Q_k je parazitní vedení tepelné energie (J) způsobené měřicím systémem.

Během měření je systém datalogeru obvykle chladnější než měřicí sondy, proto část konvekčního tepla proudí přes termočlánky směrem k datalogeru. Ve většině případů lze vyloučit z měření podíl přenosu tepla zářením, protože je vzhledem k ostatním hodnotám velmi malé. Naměřené křivky (teplotní změny) vykazovaly exponenciální saturaci. Analytické křivky musí být přizpůsobeny naměřeným křivkám pro výpočet parametru α .

Teplotní změny jsou modelovány exponenciální rovnicí:

$$T(t) = (T_h - T_{(t_0)}) \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4.9)$$

kde T_h je teplota ohřevu (plynu),

$T_{(t_0)}$ je počáteční teplota sondy,

t je čas,

τ je časový koeficient ohřevu.

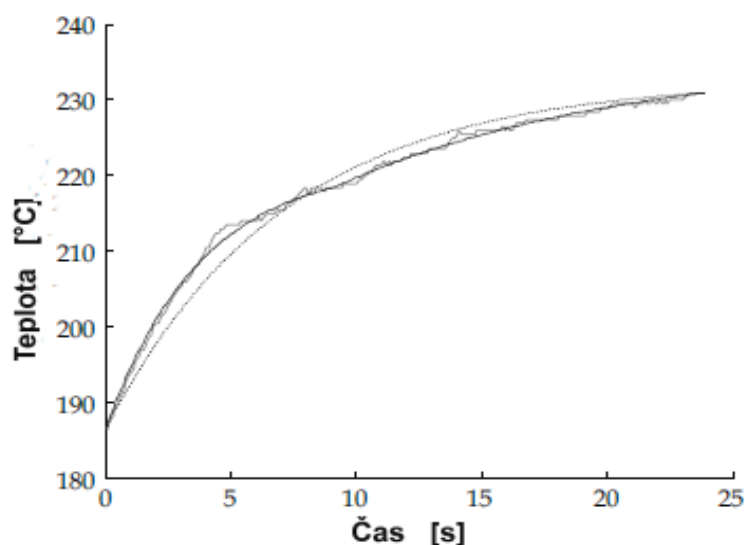
Časový koeficient ohřevu lze vypočítat ze vztahu:

$$\tau = \frac{t / \ln(1 - (T(t_r) - T_{(t_0)}) / (T_h - T_{(t_0)}))}{T_h - T_{(t_0)}}, \quad (4.10)$$

kde $T(t_r)$ je maximální teplota dosažená na konci ohřevu.

Známe sice nastavené hodnoty teploty při ohřevu, ale ty se nerovnjí T_h protože ve většině případů má měřicí zařízení chladicí účinek na topný systém. Tento účinek závisí na velikosti (tepelné kapacitě) a teplotních rozdílech mezi měřicím systémem a ohřevem plynu. Kromě toho se ohřívací systém často snaží udržet nastavené teploty pomocí nějakého systému regulace teploty. Proto přesné hodnoty T_h naměřených křivek nejsou známy a je nutné je vypočítat.

Výpočet hodnot T_h může být prováděn iterační metodou. T_h se odvíjí od hodnoty $T(t_r)$ pomocí teplotních kroků po 0,01 °C [10]. V každém kroku iterace modelové křivky se tak přizpůsobí naměřené křivce. Iterace se zastaví, pokud odchylka dosáhne nastavené minimální hodnoty. Při bližším pohledu je zřejmé, že hodnota teploty ohřevu média T_h se během měření mění.



Obr. 4.6: Proložení analytické křivky pro výpočet hodnot T_h [10]

Použijí-li se dvě hodnoty T_h (dvě prokládací křivky), potom je párování mnohem plynulejší, jak je patrné na Obr. 4.6 (souvislá čára). V případě potřeby lze také použít více než dvě hodnoty T_h , potom se dosáhne ještě dokonalejší shody analytické křivky. To je typické pro případy, kdy ohřev trvá dlouho, nebo naopak spád vytápění je vysoký a tepelná kapacita vytápěné konstrukce je velká.

Rovnici (4.9) je možné upravit do tvaru

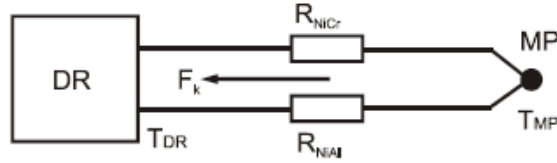
$$T(t) = (T_h - T_{(t_0)}) \cdot (1 - e^{-t/\tau(t)}), \quad (4.11)$$

potom konvekční teplo se vypočítá integrací do časového intervalu topení t_0, t_r :

$$Q_c = \int_{t_0}^{t_r} F_c(t) dt = \int_{t_0}^{t_r} h \cdot A \cdot (T_h(t) - T(t)). \quad (4.12)$$

Absolutní nepřesnost měření termočlánků je sice $\pm 0,5$ °C, ale očekávaná hodnota chyby měření konverguje k nule v důsledku integrace rovnice (4.12). Důkladné izolování tepelných párů od ocelového pláště je nutné, aby bylo co nejvíce sníženo konduktivní vedení tepla z prostředí do měřícího termopáru. Je ale nutné brát do úvahy také vliv parazitní tepelné vodivosti vodičů mezi dataloggerem (DR) a měřícím bodem (MP).

Schéma měřícího systému je vidět na Obr. 4.7. Termočlánky jsou typu K, jejichž materiály jsou NiCr (90:10) a NiAl (95:5).



Obr. 4.7: Model vedení tepla termočláнку měřicího systému

Měřicí bod (MP) je modelován jako koule a jeho vodivostní chování je zanedbané kvůli malému rozměru. Rozdíl teplotního potenciálu mezi DR a MP vytváří parazitní tepelný tok vedení F_k na R_{NiCr} a R_{NiAl} , který je vyjádřen rovnicí (4.13).

$$\frac{dQ_k}{dt} = F_k = \frac{T_{MP} - T_{DR}}{R_{NiCr}} + \frac{T_{MP} - T_{DR}}{R_{NiAl}} \quad (4.13)$$

Parazitní tepelná vodivost Q_k se vypočítá integrací rovnice (4.13) pro dobu intervalu ohřevu t_0, t_r :

$$Q_k = \int_{t_0}^{t_r} F_k(t) = \int_{t_0}^{t_r} \frac{T(t) - T_{DR}(t)}{R_{NiCr}} + \frac{T(t) - T_{DR}(t)}{R_{NiAl}} \quad (4.14)$$

$T_{DR}(t)$ lze aproximovat pomocí lineární křivky, jejíž gradient závisí na okolnostech spojených se způsobem ohřevu (změna teploty datového záznamníku - datalogeru) během měření:

$$T_{DR} = T_0 + (T_0 - T_{DR}(t_r)) \cdot \frac{t}{t_r}, \quad (4.15)$$

kde T_0 je počáteční teplota datalogeru.

Předpokládá se, že teplotní kapacita datalogeru je nekonečná ve srovnání s tepelnou kapacitou MP. Potom se vypočítá množství absorbované tepelné energie s pomocí vztahu:

$$Q_a = C \cdot m \cdot (T(t_r) - (T(t_0))) \quad (4.16)$$

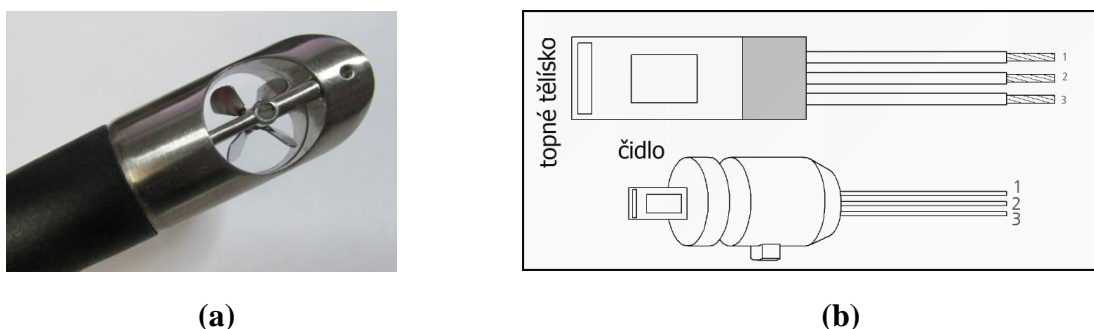
kde C je tepelná kapacita ($J/kg \cdot K$) a m je hmotnost měřicího bodu (kg).

Hodnota koeficientu přenosu tepla α ($W/m^2 \cdot K$) se potom vypočítá s pomocí čtyř rovnic (4.11), (4.12), (4.14) a (4.16) na základě následujícího vztahu:

$$\alpha = (Q_a + Q_k) / \int_{t_0}^{t_r} A \cdot (T_h(t) - T(t)) \quad (4.17)$$

5 Experimentální část

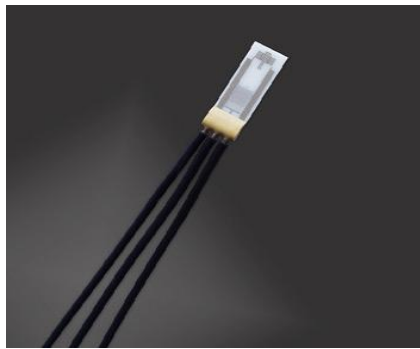
Z dosavadních úvah lze usoudit, že měření proudění je dnes z obecného pohledu na první pohled relativně jednoduchá záležitost. Ovšem pouze tehdy, pokud teploty měřeného média nepřesahují 200 °C. Pro vyšší teploty není možné stávající, dosud známé, zařízení běžně použít. Jedním z jednodušších způsobů měření je použití malé měřicí vrtulky, která v definovaném kanálku měří rychlost proudění, kterou lze potom přepočítat na objemy proudícího plynu (Obr. 5.1a). Tento způsob však lze využít pouze do teploty kolem 200 °C. Z obecného pohledu lze použít pro měření elektrická čidla. Schematický pohled na elektrické sensorové čidlo je znázorněn na Obr. 5.1b.



Obr. 5.1: Příklad mechanického (a) a elektrického (b) čidla pro měření proudění plynů [19]

5.1 Sensor FS7.4W [20]

Existuje celá řada aplikací, kde je třeba řídit nebo měřit teplotu proudícího média, jako jsou například vysoce citlivé průtokové spínače, detektory bublin v kapalinách nebo teplotní snímače hladiny kapalin, a také přetavovací průtahové pece pro pájení. Firma IST AG vyvinula řadu senzorů FS7, které jsou realizovány tenkovrstvou technologií s využitím platiny jako aktivní části senzoru, a jejich funkce je založena na principu sdílení přenosu tepla jako signálu pro určení rychlosti proudění. Základním principem je skutečnost, že s rostoucím průtokem roste i množství přenášeného tepla a průtok lze potom určit z velikosti kompenzace napětí potřebného k udržení konstantního teplotního rozdílu. Jsou nabízeny dvě standardní verze teplotního čidla FS7 pro měření hmotnostního průtoku, FS7.0 bez pouzdra (Obr. 5.2a) a FS7.A s pouzdrům pro snadnou montáž (Obr. 5.2b). Oba typy mají provozní rozsah měření od 0 do 100 m/s a mohou pracovat v rozsahu teplot od -20 do +150 °C.



FS7.0



FS7.A

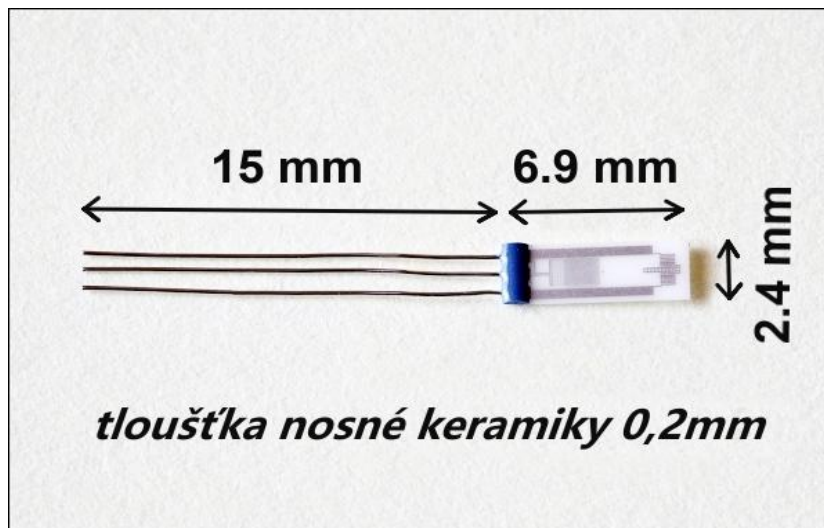
Obr. 5.2: Pohled na sensor FS7 bez pouzdra (FS7.0) a s pouzdrém (FS7.A) [20]

Pro okolní teploty do +400 °C byl vyvinut nový snímač průtoku plynu FS7.4W se symetrickým designem vyhřívání, což zaručuje zvýšenou citlivost. Tento snímač průtoku FS7.4W je použitelný v plynech a nabízí vynikající dlouhodobou stabilitu, přičemž malá tepelná hmotnost snímače FS7.4W poskytuje rychlou dobu odezvy (max. 0,5 s). Mezi další výhody patří jednoduché zpracování signálu, rychlá doba odezvy, vynikající reprodukovatelnost a především miniaturní provedení a také cenová nenáročnost. Výhodou je i snadná adaptace v různých pouzdrech, což nabízí optimální řešení pro měření průtoku plynu v různých aplikacích. Čidlo pracuje na principu anemometru s konstantní teplotou (CTA - constant temperature anemometer). Tento způsob měření je popsán Kingovým zákonem, který je vyjádřen rovnicí [20]:

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H = (A + B \cdot \vartheta^n) \cdot \Delta T, \quad n = 0,3 \dots 0,5 \quad (W) \quad (5.1)$$

kde P_H je potřebný výkon topného tělesa čidla, I_H je proud topného tělesa čidla, R_H je odpor topného tělesa čidla, A a B jsou konstanty, ϑ je rychlost proudění měřeného média, exponent n se volí podle typu měřeného média, v případě vzduchu se používá hodnota 0,5.

Vlastní měření spočívá v kalorimetrickém principu, kdy se měřící můstkový zesilovač snaží udržet konstantní teplotu čidla 30 °C nad teplotou jeho okolí (ΔT). Kingův zákon (5.1) ukazuje, že rychlost proudění přímo souvisí s dodávaným příkonem. Měřicí sensor je vyroben z platiny na keramickém substrátu a je vyobrazen na Obr. 5.3. Má teplotní odolnost až do 400 °C.



Obr. 5.3: Pohled na použitý měřicí sensor FS7.4W

Toto čidlo tedy vyhoví plně pro experimentální měření teploty za reálných teplot v pájecím zařízení, a proto bylo také zvoleno pro realizaci experimentální části této práce. Navíc tato nová měřicí metoda potom v budoucnu umožní provádět pravidelná měření, nebo měření ke zjištění aktuálního stavu v příslušném zařízení. Dalším využitím je možnost přímého porovnání různých typů pájecích pecí různých výrobců například při benchmarkingu, kdy si zákazník vybírá nové zařízení do své výrobní linky. Může si tak vybrat patřičné technologické zařízení s ohledem na specifické potřeby pro daný projekt.

Současně s měřením proudění je na patřičném místě umožněno i měření teploty na simulovaném měřicím bodu, který představuje tepelnou kapacitu desky plošných spojů. Takto vytvořený měřicí bod vykazuje určitou tepelnou setrvačnost a mnohem více se tak měření blíží reálným podmínkám na desce plošných spojů. Takto získaná data poslouží k vizualizaci vztahu mezi prouděním a průběhem teplotního profilu v dané peci. Umožní případnou optimalizaci reálného zařízení ve výrobním procesu. Analýza proudění bude probíhat ve dvou nezávislých rovinách, experimentálním měření a simulace.

Simulaci lze provést v open source programech pro CFD simulaci, např. OpenFoam, Ansys apod..

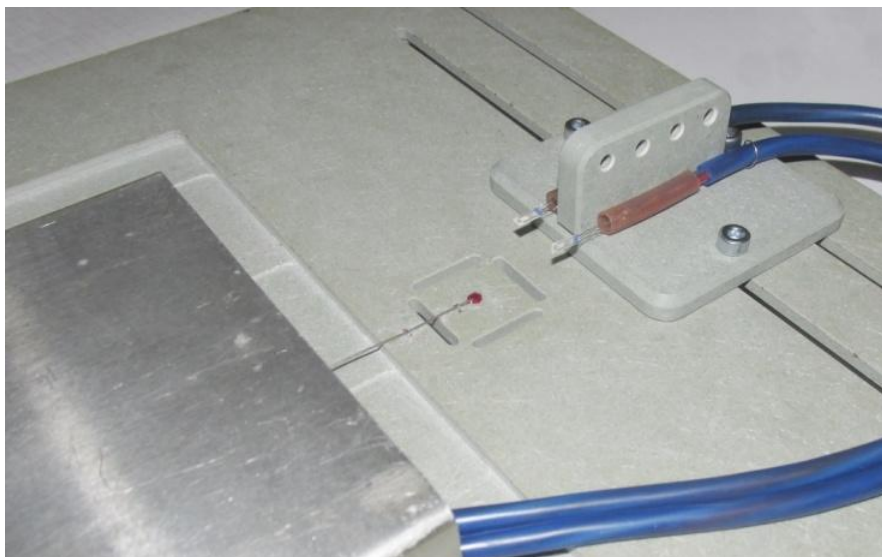
5.2 Návrh a sestavení měřicího pracoviště

Jedním ze základních a důležitých kroků je návrh měřicí desky, která bude schopná měřit teplotu v hlavních osách, tedy Y a Z. Měřicí čidla proto musí být umístěna na měřicí hlavě, která toto měření v těchto osách umožní. Tak bude možné experimentálně ověřit, jaký vliv na měření má způsob a přesné umístění měřicí hlavy. Proto bude muset být měřicí hlava oddělena od datového záznamníku (dataloggeru), aby ovlivnění bylo co nejmenší a tím měření co nejpřesnější. [40]

Měřicí hlava musí být polohovatelná, aby bylo možné měřit proudění uvnitř zařízení v různých šířkách, podobně jako měření příčného teplotního profilu průtahové pece.

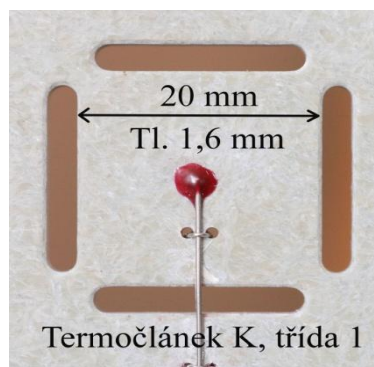
Jak je patrné z Obr. 5.3, zvolené čidlo má relativně malé rozměry, takže jeho ovlivnění prouděním bude velmi malé. Jednotlivá čidla musí být odstíněna od okolí pomocí tenké trubičky, aby docházelo, pokud možno, k měření pouze v daném směru. Velmi důležitá je otázka připojení čidla, které má poměrně krátké vývody, k měřicímu zařízení. Vzhledem k vysoké teplotě bylo zvoleno upevnění v první řadě mechanické za pomoci tenké trubičky, používané jako návlečka na vodič. Teprve po mechanickém zamáčknutí spoje byla použita pájka pro stabilní kontakt. Za teplot nad bodem tavení použité slitiny tato z tenké trubičky nevyteče, kapilární síly ji i v tekutém stavu udrží uvnitř. Rovněž je nutné vyřešit otázku teplotní ochrany vlastního měřicího zařízení, které je vystaveno po relativně dlouhou dobu velmi vysokým teplotám uvnitř pece.

Vlastní měřicí deska (viz Obr. 5.4) je vyrobena z teplotně odolného materiálu, který se používá např. k výrobě pájecích masek pro pájení vlnou a který bez problémů snáší teploty do 300°C. Základním materiálem tohoto kompozitu je směs skla (70 %) a pryskyřice, podobně jako u desek plošných spojů z materiálu FR4 (ovšem s vyšší teplotní odolností).



Obr. 5.4: Pohled na měřicí desku před ověřením funkce

Měřicí deska je opatřena jedním měřicím bodem pro měření teploty (Obr. 5.5). Tento bod má velikost 20×20 mm a jeho tloušťka je upravena na 1,6 mm. Měřicí termočlánek je umístěn v jeho geometrickém středu. To umožní simulovat nejčastěji používaný materiál DPS, kterým je FR4. Poměr tepelné kapacity této plochy a eventuálně malých SMD součástek (0603, 0402, 0201) je velmi vysoký (ve prospěch měřicí plochy) a proto lze předpokládat, že měřicí bod se bude chovat stejně se součástkami jako bez nich. Materiál měřicí plochy je, jak již bylo zmíněno, velmi podobný FR4, takže i z tohoto hlediska lze předpokládat, že naměřené hodnoty budou odpovídat skutečné desce plošných spojů.



Obr. 5.5: Měřicí bod na navržené měřicí desce

Měření teploty se provádí termočlánekem typu K, třída 1 (přesnost $\pm 1,5$ °C), který je v průmyslové praxi používán velmi často. Pro zpracování termoelektrického napětí z termočláнку je použit standardně vyráběný převodník, který zároveň obsahuje interní kompenzaci okolní teploty pro přesnější měření. Tento převodník provede zesílení signálu, jeho převod na digitální hodnotu a na požadavek řídicího procesoru tato data odešle k zápisu do paměti. Rozlišení použitého převodníku s označením MAX6675 je 0,25 °C. Výsledná hodnota z převodníku tedy musí být vydělena 4, abychom dostali správnou hodnotu. Dataloggery, používané k měření teplotních profilů, běžně měří dvakrát za sekundu a mají rozlišení 0,5 °C. Pro tento účel zvolený převodník zvládá 4 měření za sekundu, je tedy pro náš případ dostatečně rychlý a plně vyhovuje zavedené praxi.

5.3 Princip měřicího systému

Jak již bylo uvedeno, vlastní měřicí hlava je vybavena senzorem FS7.4W. Sensor je napájen z měřicího můstkového zesilovače, který udržuje teplotu čidla na úrovni 30 °C nad teplotou okolí. Tato teplota je doporučena výrobcem použitého čidla pro měření rychlosti proudění plynů [20]. Lze uvažovat, že tato hodnota představuje konstantní část výše popsaného Kingova zákona pro měřicí princip anemometru s konstantní teplotou (CTA). Naměřený signál je následně převeden A/D (analog to digital converter) převodníkem na jeho digitální hodnotu a prostřednictvím řídicího procesoru zapsán do paměti měřicího systému.

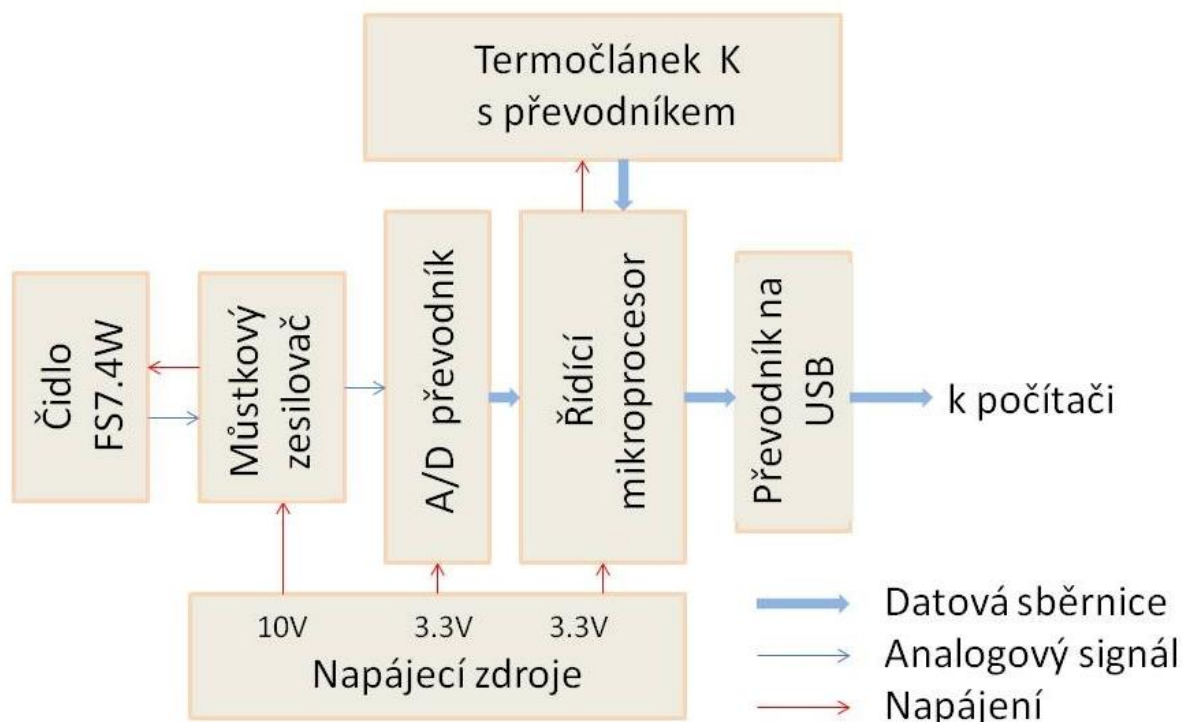
Naměřené hodnoty rychlosti proudění jsou přivedeny na vstup A/D převodníku MCP3913A1, který má 24 bitové rozlišení. Tento převodník byl zvolen z důvodu vyšší přesnosti (jemnější převod do digitálního tvaru). Zároveň to umožní filtraci resp. oddělení užitečného analogového signálu od šumu měřicího systému. Použitý převodník, který je vybaven šesti nezávislými vstupy, je schopen posílat data rychlostí 10 hodnot za sekundu, avšak první měření ukázalo, že další část měřicího systému, převodník pro termočlánek typu K, zvládne měření maximálně 4 měření za sekundu. Proto bylo nutno nastavit čtení hodnot pro celý měřicí systém na uvedenou nižší hodnotu.

Blokové schéma měřicí desky je na Obr. 5.6. Zde jsou patrné jednotlivé funkční bloky umístěné na měřicí desce.

Pro řízení celého měřicího systému a ukládání dat je použit mikroprocesor Atmel, Atmega 328. Data se ukládají každou sekundu po blocích obsahujících 4 měření do

paměťového modulu W25Q64, který má kapacitu 64 Mbit. Vzhledem ke kapacitě paměti a velikosti datového bloku vystačí uvedená paměť na 8 hodin záznamů.

Po ukončení měření se zaznamenaná data stáhnou do počítače pomocí speciálně pro tento účel upraveného terminálového programu, který naměřené hodnoty uloží do souboru ve formátu.csv (comma-separated values). Takto zapsaná data se dají jednoduše načíst např. do programu Excel a graficky vyhodnotit. Terminálový program umožňuje i zobrazení dat v reálném čase, což je velmi vhodné pro odlaďování měřicího systému nebo pro náhled na měřená data v reálném čase.



Obr. 5.6: Blokové schéma měřicího systému

Celý měřicí systém je napájen z baterie, složené ze 4 ks Li-Ion baterií. U bateriového napájení je riziko přidaného rušení nebo šumu v napájecí cestě minimalizováno, ve srovnání např. s měničem. Použité stabilizátory jsou vybrané především z hlediska nízkého šumu. Vlastní měřicí systém je napájen (3,3 V) z jedné poloviny baterie (kvůli snížení tepelného vyzařování stabilizátoru), vlastní měřicí systém (měřicí zesilovač) je napájen z celé sestavy, protože potřebuje vyšší napájecí napětí. K čistotě signálové cesty přispívá i důsledné oddělení napájení digitální a analogové části měřicího systému.

Kalibrace a linearizace systému je aktuálně prováděna porovnáním s kalibrovaným systémem používajícím měřicí vrtulku, vše při teplotě 100 °C.

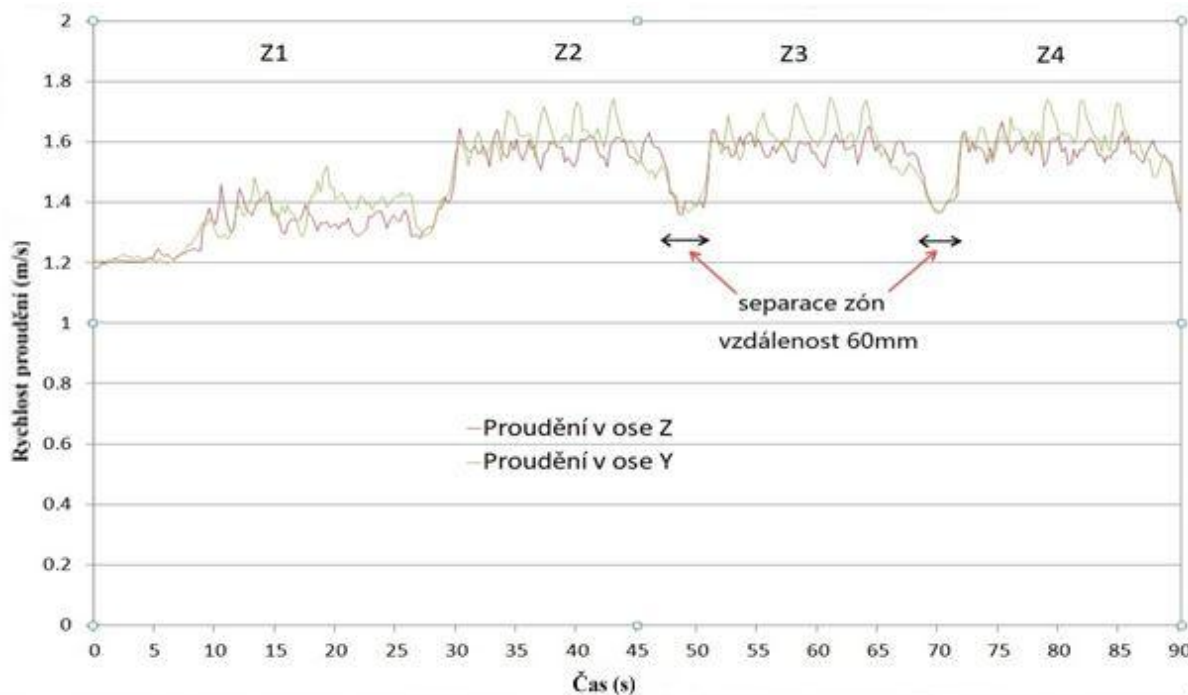
5.4 Experimentální měření rychlosti proudění v peci

5.4.1 Ověření funkčnosti měřícího systému

Sensor FS7.4W je schopen měřit rychlost proudění s rozlišením 0,01 m/s. [20]. To umožňuje velmi přesné měření i pro případy zkoumání vlivu rychlosti proudění na případný posun součástek umístěných na desce plošných spojů. Pro pájecí profil platí obecně platné základní pravidlo, že musí splňovat zadání výrobců použité pájecí pasty.

Jedním z velmi důležitých parametrů při pájení přetavením je strmost ohřevu (v technické praxi je často poněkud nepřesně nazývána teplotním gradientem). Pro dříve používané pájení s použitím slitin cínu a olova byl předepsaný limit strmosti ohřevu 5 K/s, zatímco u nově používaných bezolovnatých slitin deklarovaných legislativou RoHS v roce 2006 je tento limit omezen na 3 K/s [21]. Někteří přední výrobci elektroniky (Bosch apod.) mají své interní, ještě přísnější předpisy pro nastavení tohoto limitu. Proto musí toto omezení řešit také výrobci pájecích zařízení. Nejpoužívanějšími způsoby je úprava mechanické stavby trysek (nozzle fields) v první zóně, nebo samostatná regulace ventilátorů v uvedené zóně, případně kombinace obou způsobů.

Na Obr. 5.7 je dobře patrný tento nárůst v grafickém zobrazení. Každá zóna, tedy i první, kde dochází k prvotnímu nárůstu teploty, má fyzickou délku 290 mm a mezera mezi zónami má rozměr 60 mm. Elektronické čidlo na bázi anemometru přesně svým měřením ukazuje průběhy odpovídající mechanické konstrukci pece. Na první pohled je patrné mírně nerovnoměrné proudění v první zóně, které je způsobeno mechanickým uspořádáním vnitřního prostoru daného stroje. Překážky uvnitř jako např. mechanika pro nastavení polohy transportu, vliv odrazů od měřicí desky (nastává stejně, jako u skutečného výrobku) apod.



Obr. 5.7: Detailní pohled na průběh proudění a teploty v prvních zónách průtahové pece

Z uvedených skutečností lze usuzovat, že podobné měření pomůže při zkoumání problémů, kdy dochází na osazené desce plošných spojů k posunutí součástek, přičemž umožní identifikaci problémového místa v pájecím zařízení. Je namístě uvést, že první zóna vykazuje podstatně nižší rychlosti proudění oproti dalším zónám.

Měření bylo provedeno na peci firmy Rehm, konfigurace 944. Měřená pájecí pec má 9 zón předehřevu, 4 přetavovací zóny a 4 chladicí zóny. Senzor byl umístěn 8 mm nad povrchem měřicí desky, aby měřil proudění v bezprostřední blízkosti součástek. Osový systém byl zvolen následovně:

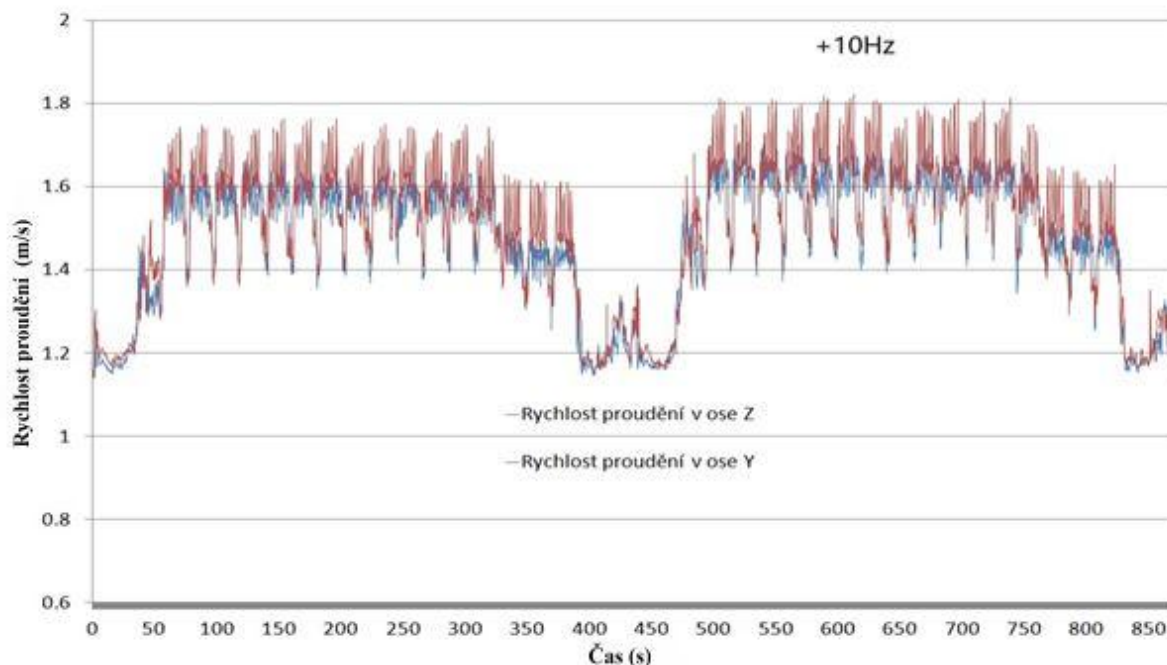
osa X - směřuje ve směru pohybu dopravníku měřené pece,

osa Y - směr kolmý na osu X ve vodorovné rovině,

osa Z - svislá osa, kolmá na X a Y.

Měřicí hlava může být posouvána ve směru osy Y pro podrobnější mapování rychlosti proudění v oblasti šířky měřicí desky, která je široká 300 mm. Tento rozměr byl zvolen s ohledem na nejčastěji se vyskytující šířku přířezů desek plošných spojů po konzultaci s několika výrobcí elektroniky.

Následující obrázek (Obr. 5.8) zobrazuje vliv změny frekvence ventilátorů umístěných v průtahové peci. Frekvence byla změněna o 10 Hz a na měřených datech se tato změna frekvence naprosto přesně projevila zvýšenou rychlostí proudění.



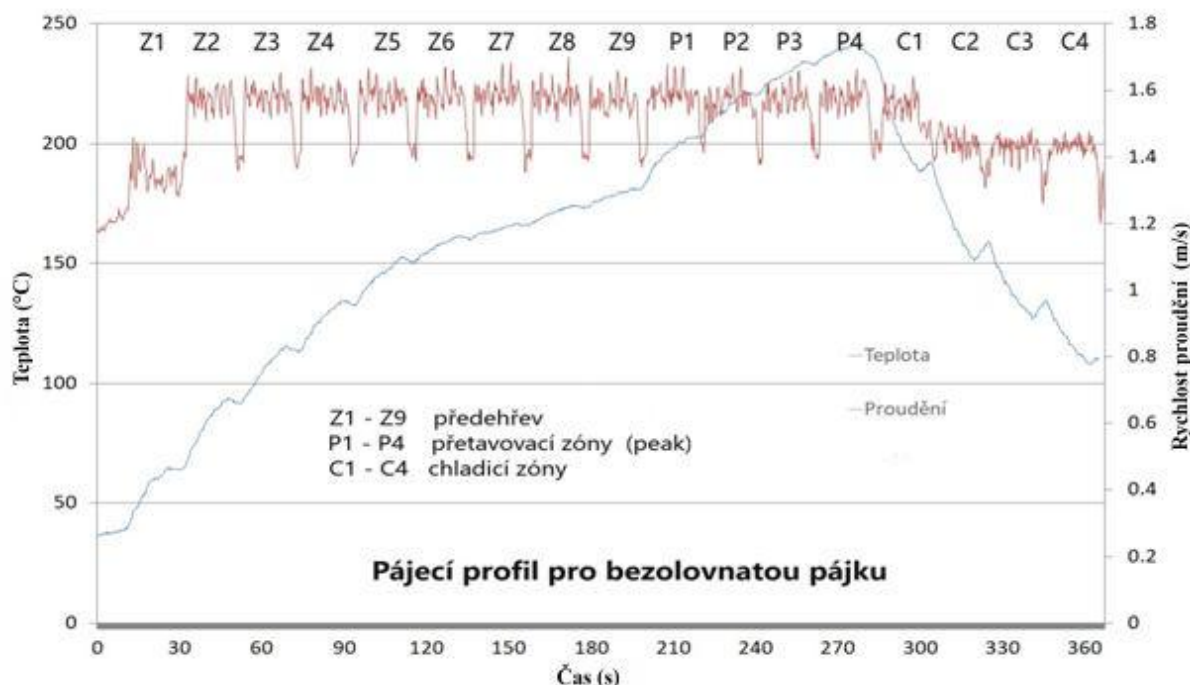
Obr. 5.8: Znázornění vlivu změny frekvence ventilátorů

Dosažené výsledky měření jsou porovnatelné s výsledky získanými na jiném pracovišti, kde byl prováděn výzkum zaměřený na podobnou tematiku. Tento systém byl aplikován v minulých letech na Ústavu elektronických technologií Fakulty elektroniky a informatiky Budapešťské univerzity technologie a ekonomie [10]. Tam prováděli podobná měření metodou založenou na principu mikrotlakových čidel. Rychlost proudění a z toho vyplývající laterální síly jsou u tohoto způsobu měřeny na základě změny tlaku uvnitř pájecího zařízení, což je však technicky velmi komplikované a složité. Samotné měření je omezeno na teploty v řádu desítek stupňů, použitá čidla tedy nevydrží ve vysokých teplotách reálného pájecího profilu. Z tohoto důvodu jsou diskutabilní i získané hodnoty měření. Systém navržený a použitý v této disertační práci je mnohem jednodušší a transparentnější. Oproti měřicímu systému založenému na principu mikrotlakových čidel je snadno realizovatelný i v praxi, což je významný faktor hovořící pro možné využití v praxi.

5.4.2 Měření standardního profilu průtahové pájecí pece

Pro ověření správnosti a reprodukovatelnosti výsledků dosažených navrženou měřicí metodou využívající sensor FS7.4W, bylo opakovaně provedeno měření na standardní průtahové peci Rehm VXP+. Jedná se o pec, která je v běžném provozu. Tato pec je v současnosti jedna z nejrozšířenějších a patří mezi běžně používané zařízení v sériových výrobních firmách.

Obr. 5.9 ukazuje průběh měření rychlosti proudění spolu s měřením teploty při nastavení pájecí pece na standardní profil (je znázorněn modře). Tento standardní profil je běžně používaný zákazníkem pro bezolovnatou pájecí slitinu.



Obr. 5.9: Průběh teploty a proudění standardní průtahové pájecí pece

5.5 Praktické měření rychlosti proudění v peci [45]

Pro provedení měření za reálných podmínek odpovídajících skutečnému pájecímu profilu je třeba především vyřešit tepelnou ochranu vlastního měřicího zařízení, které prochází pecí. Protože toto zařízení je napájené přímo z Li-on článků, je třeba důsledně dbát také na nepřekročení jejich povolené teploty, která je udávána v rozsahu 70–80°C.

Stínící krabice měřicího systému je vyrobena z nerezového plechu, přičemž na jeho vnitřní straně se nachází vlastní tepelná izolace. Při průchodu pecí se mohou na obal měřicího systému dostat zbytky tavidla, což v případě kovového obalu lze snadno očistit. Protože systém při průchodu pájecí pecí musí být odolný i při teplotách až 250 °C, je třeba konstrukci, včetně tepelné izolace, pro takovou teplotu patřičně dimenzovat. Jako nejjednodušší řešení se nakonec ukázalo použití korkové desky tloušťky 3 mm. Byly použity tři vrstvy, které byly natěsno nalepené na sebe. V rozích bylo zvoleno postupné překrytí kvůli zvýšení izolačního odporu, jak je patrné z Obr. 5.10.



Obr. 5.10: Řešení izolace měřicího boxu

Opracování korku je velmi jednoduché, vysoká tepelná odolnost je dána přirozenými vlastnostmi tohoto materiálu. Vzhledem k tomu, že výroba takovéto desky probíhá lisováním při teplotách 300–400 °C, je její použití při teplotách kolem 250 °C bezproblémové. Navíc jde o tepelné namáhání v relativně krátkém čase, řádově do 7 minut. Velmi nízká tepelná vodivost, standardně 0,058 W/m·K, zaručuje vynikající izolaci, která se potvrdila v průběhu praktického měření. Ani po průchodu pecí s teplotou 250 °C nebyla uvnitř měřicího systému překročena teplota 65 °C. Toto bylo předem odzkoušeno experimentálním měřením teploty v ochranném boxu bez vložené měřicí elektroniky. Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab 5.1.

Tab. 5.1: Ověření izolačních schopností ochranného krytu měřicího systému

Měření	bod M1 (°C)	bod M2 (°C)	bod M3 (°C)	průměr (°C)
Měření č. 1	62,3	63,2	63,7	63,1
Měření č. 2	63,1	63,5	65,1	63,9
Měření č. 3	63,6	64,2	64,7	64,2

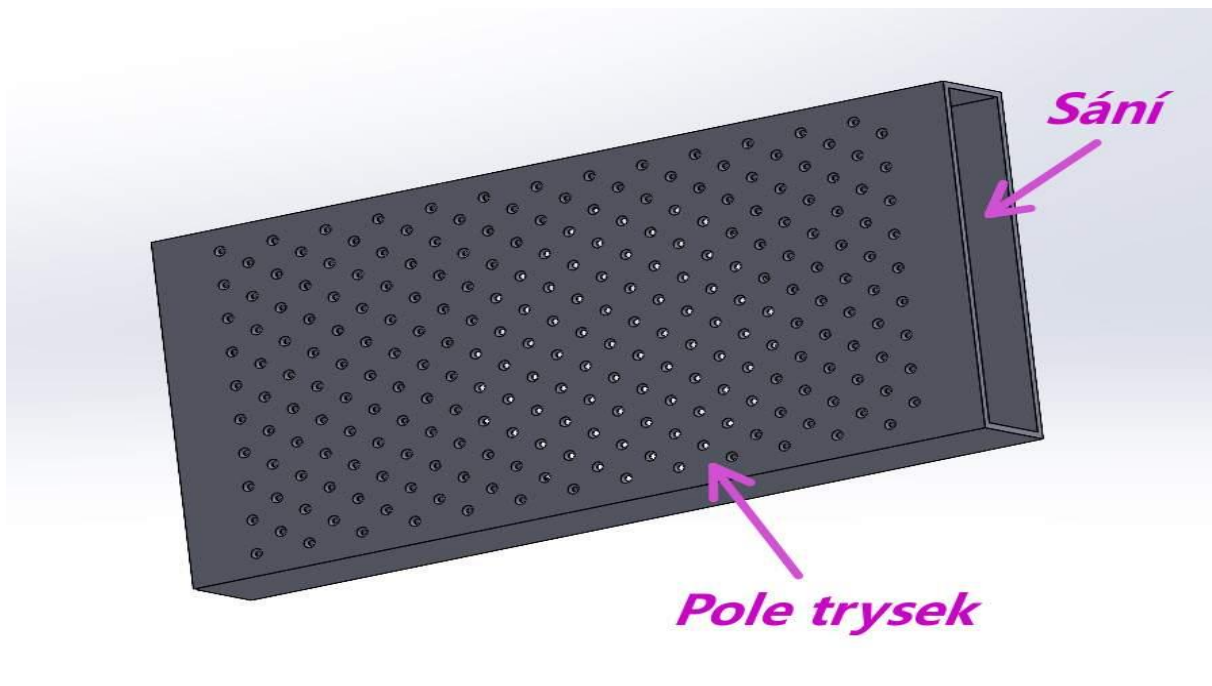
Velmi důležitým faktorem pro provedení experimentů bylo zajištění, pokud možno, co nejvíce stejných podmínek, co se měřených profilů týká. Podařilo se po dohodě s výrobní firmou dohodnout měření na třech konstrukčně rozdílných pecích, které mají přibližně stejnou délku topné zóny.

Pece byly zvoleny tak, aby výsledky byly co možná nejlépe porovnatelné a přitom bylo možné identifikovat rozdíly vzniklé různými řešeními sestav tryskových desek, přes které proudí horký plyn směrem k výrobku. Všechny tři pece měly topnou délku 4,5 m a i délka chladicí zóny je v toleranci 10 cm, což při daných délkách je pro srovnávání velmi dobrá hodnota.

5.5.1 Pec č. 1 (R)

První popsaná pec je výrobkem přední světové firmy v daném oboru, u ní je k dispozici podrobný popis, včetně naměřených hodnot objemu vhaněného plynu v jednotlivých zónách, které lze použít jako referenční k dalším výpočtům, měřením a následně k simulaci.

Měření bylo provedeno na peci v konfiguraci 9–4–4, tzn. 9 zón předeřevu, 4 přetavovací (peak) zóny a 4 chladicí zóny. Pro čištění procesních plynů od zbytků fluxu a výparů z desek plošných spojů je použitý systém pyrolýzy. Ohřev výrobku probíhá prostřednictvím pole trysek (děrované desky), která má rozměry 600×289 mm a obsahuje 247 otvorů, kterými proudí horký plyn směrem k výrobku (Obr. 5.11).



Obr. 5.11: Schematické znázornění soustavy trysek topné zóny pece č. 1

Topná zóna u tohoto typu pece pracuje následujícím způsobem. Plyn (vzduch) nasáván ze strany, a následně prochází přes topné těleso, které ho ohřívá na požadovanou teplotu. Poté je ventilátorem za pomoci vhodně umístěných přepážek uvnitř topné kazety promíchaný a hnáný přes uvedenou děrovanou desku do prostoru topné zóny, kde nastává přetavení pájky. Z již provedených měření a datového listu ventilátoru vyplývá, že při teplotě cca 210 °C a nastavení frekvence na 45 Hz v každé zóně cirkuluje 210 m³/hod. Tento objem musí projít přes uvedené tryskové pole. V dané peci je možné nastavit různé frekvence ventilátorů, následující tabulka ukazuje vliv na množství plynu, které koluje v dané zóně. Vliv frekvence ventilátorů na množství a rychlost plynu rotujícího v topné zóně je uveden v následující tabulce Tab. 5.2.

Tab. 5.2: Vliv frekvence ventilátorů na množství a rychlost plynu rotujícího v topné zóně [5]

Frekvence ventilátorů (Hz)	Objem plynu proudícího v zóně (m³)	Rychlost proudění na desce trysek (m/s)	Rychlost proudění v oblasti sání zóny (m/s)
20	95	8,50	0,86
25	120	10,74	1,09
30	145	12,98	1,31
35	170	15,21	1,54
40	190	17,00	1,72
45	210	18,79	1,90
50	235	21,03	2,13
55	250	22,37	2,27
60	270	24,16	2,45

Z uvedené tabulky je zřejmé, že vhodnou frekvencí ventilátorů lze velmi účinně ovlivnit rychlost proudění v dané zóně. Tento parametr je součástí tzv. parametru programu, tzn. lze, za určitých okolností, pro každý výrobek nastavit odpovídající proudění. Zvláště u malých součástek, které mají velmi malou plochu, za kterou jsou drženy na desce spojů, (lepivostí pájecí pasty) to může sehrát významnou roli v souvislosti s nebezpečím odfouknutí součástek z jejich pozice.

Zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění lze poznat z Reynoldsova čísla, které se spočítá podle vztahu (3.11).

Reynoldsovo číslo svojí hodnotou udává, zda zkoumané proudění je laminární nebo turbulentní. Jako hranice je považována hodnota 2 320. To platí v uzavřené trubici. Jedná-li se o otevřený kanál, je za hraniční hodnotu brána už hodnota 500. Ve zvláštních případech ovšem může být Reynoldsovo číslo >10 000 a proudění bude přesto laminární. To ale platí jen ve výjimečných případech, kdy k nárůstu rychlosti proudění dochází velmi pomalu a na hladkých plochách. Vzhledem k členitosti povrchů v pájecím zařízení taková situace nemůže nastat, proto budeme za hranici laminárnosti či turbulence považovat výše uvedenou hodnotu.

Pro teplotu okolí 25 °C a nastavení ventilátorů na frekvenci 45 Hz rovnice přejde do následujícího tvaru.

$$Re = \frac{18,79 \cdot 0,004}{15,7 \cdot 10^{-6}} \cong 4\,910 \quad (5.2)$$

Hodnota $Re = 4\,910$ jednoznačně udává, že se jedná o turbulentní proudění.

Tab. 5.3: Vlastnosti suchého vzduchu [31]

P6 VLASTNOSTI SUCHÉHO VZDUCHU

Při tlaku $p = 98,1$ kPa

Teplota	Hustota	Měr. tepel. kapacita	Tepelná vodivost	Teplotní vodivost	Viskozita dynamická	Viskozita kinemat.	Prandtlovo číslo
t	ρ	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^5$	$\eta \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
°C	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
-180	3,685	1,047	0,756	0,196	6,672	1,76	0,900
-150	2,817	1,038	1,163	0,403	8,728	3,10	0,770
-100	1,984	1,021	1,616	0,800	11,77	5,94	0,742
-50	1,534	1,013	2,035	1,314	14,61	9,54	0,726
-20	1,365	1,009	2,256	1,650	16,18	11,93	0,724
0	1,252	1,009	2,372	1,875	17,16	13,70	0,723
10	1,206	1,009	2,454	2,011	17,75	14,70	0,722
20	1,164	1,013	2,524	2,128	18,24	15,70	0,722
30	1,127	1,013	2,582	2,261	18,73	16,61	0,722
40	1,092	1,013	2,652	2,403	19,22	17,60	0,722
50	1,056	1,017	2,721	2,539	19,61	18,60	0,722
60	1,025	1,017	2,803	2,680	20,10	19,60	0,722
70	0,996	1,017	2,861	2,828	20,40	20,45	0,722
80	0,968	1,021	2,931	2,958	20,99	21,70	0,722
90	0,942	1,021	3,000	3,125	21,57	22,90	0,722
100	0,916	1,021	3,070	3,278	21,77	23,78	0,722
120	0,870	1,026	3,198	3,583	22,75	26,20	0,722
140	0,827	1,026	3,326	3,917	23,53	28,45	0,722
160	0,789	1,030	3,442	4,236	24,12	30,60	0,722
180	0,755	1,034	3,570	4,583	25,01	33,17	0,722
200	0,723	1,034	3,698	4,944	25,89	35,82	0,722
250	0,653	1,042	3,977	5,889	27,95	42,80	0,722
300	0,596	1,047	4,291	6,889	29,71	49,90	0,722
350	0,549	1,055	4,570	7,889	31,48	57,50	0,722
400	0,508	1,059	4,849	9,000	32,95	64,90	0,722

Pro 200 °C je kinematická viskozita vzduchu $35,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, Reynoldsovo číslo tedy po vložení nových hodnot bude:

$$\text{Re} = \frac{18,79 \cdot 0,004}{35,82 \cdot 10^{-6}} \cong 2\,130, \quad (5.3)$$

což ukazuje změnu v síle turbulentního proudění. Hodnota leží na rozhraní turbulentního a laminárního proudění. Vzhledem k členitosti vnitřního prostoru pájecí pece lze předpokládat, že charakter proudění je turbulentní.

Proudění při zahřátí pece vlivem snížení vnitřního tření vzduchu uvnitř pájecí komory vlivem vysoké teploty se stane méně turbulentní. Znamená to snížení nebezpečí vzniku laterálních sil, které mohou způsobit až posun součástky na desce plošných spojů, pokud by došlo k překonání adheze pájecí pasty.

Jiný případ je v oblasti pyrolytického čištění procesních plynů. Z fyzikálního principu pyrolýzy vyplývá, že k tepelnému rozkladu, pyrolýze, je třeba zahřát čištěný plyn na teplotu minimálně 450 °C. V dané peci se, po započtení tolerance, používá teplota 480 ± 20 °C. Teploty vyšší než 500 °C nemají žádný vliv na účinnost pyrolýzy, stoupá jen spotřeba energie. Systém pyrolýzy nasává znečištěný plyn v každé zóně předehřevu a pomocí vysoké teploty se rozloží organické sloučeniny uvolněné z pájecí pasty a desek plošných spojů. Zbytky jsou uloženy v chemicky neutrálním granulátu. Pyrolýza má průtok $70 \text{ m}^3/\text{h}$, vzhledem k mechanické stavbě (průměru potrubí) dosahuje rychlost proudění v pyrolýze $48,35 \text{ m/s}$. Pokud pro tyto vstupní hodnoty spočítáme Reynoldsovo číslo, dojdeme k výsledku:

$$\text{Re} = \frac{48,35 \cdot 0,05}{35,82 \cdot 10^{-6}} \cong 68\,640, \quad (5.4)$$

což jednoznačně ukazuje na velmi silné turbulence ve vstupním potrubí.

Ve výstupním potrubí potom Reynoldsovo číslo klesá, protože kinematická viskozita vzduchu vzroste. Proudění v pyrolýze funguje na principu Venturiho trysky, kdy dochází k mísení studeného proudu dusíku (vzduchu) se vzduchem (plynem) z uvedené trysky. Tím se výsledná teplota dostává na hodnoty kolem 350 °C. Potom dosazením příslušných hodnot se Reynoldsovo číslo změní následovně:

$$\text{Re} = \frac{48,35 \cdot 0,05}{57,50 \cdot 10^{-6}} \cong 42\,040, \quad (5.5)$$

což je stále vysoko v oblasti turbulentního proudění, stejně jako na vstupu uvedeného systému.

Vzhledem k tomu, že za hranici turbulentního proudění je považována hodnota 2 320 a vyšší, je proudění uvnitř procesní komory pece zcela jednoznačně v oblasti turbulentního proudění.

Tab. 5.4: Parametry pole trysek

Rozměry topné zóny	Délka (m)	Šířka (m)	Hloubka (m)	Plocha (m²)
činný povrch	0,289	0,600	---	0,173
sání	0,289	---	0,106	0,031
boční část	---	0,600	0,106	0,064
Tryska	∅ [m]	Plocha otvoru (m²)	Celá deska (m²)	Počet
	0,004	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	247

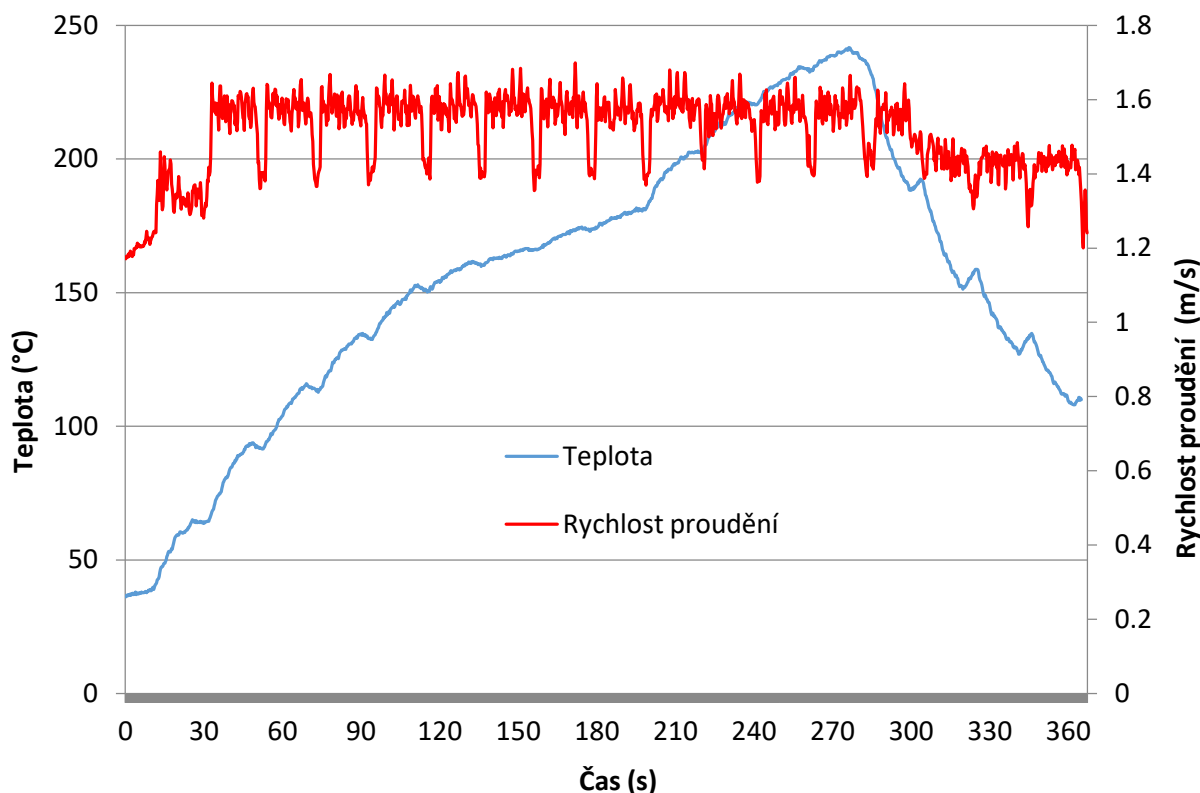
Prvotní měření probíhalo s čidlem proudění umístěným před měřicí deskou a snímalo se tedy proudění v dané peci bez ohledu na směr, ze kterého proud horkého plynu přichází. Toto měření sloužilo pro základní ověření navrženého měřicího systému v reálných podmínkách pájecí pece. Posléze bylo měřicí zařízení upraveno, oba dva senzory byly opatřeny tepelně odolnou clonkou z kaptonu. Z uvedeného materiálu byla vyrobena trubička, která byla nasazena na měřicí čidlo a zajištěna kapkou vhodného lepidla. To umožnilo separovat dva hlavní směry proudění uvnitř každé z tepelných zón. Proudění shora nebo zdola z děrované desky tryskového pole budeme brát jako proudění v ose Z, příčné proudění bude v ose Y a proudění ve směru pohybu výrobku pájecí pece nazveme prouděním v ose X. V peci je zdroj tepla ve směru osy Z, a další významnou roli hraje skutečnost, že proudění v dané topné zóně probíhá příčně, tedy v ose Y. To je nutné pro snížení ovlivnění zón mezi sebou.

Měření bylo provedeno pro dva různě nastavené teplotní profily. Jeden byl nastaven na teplotu 150 °C ve všech zónách. Další měření bylo potom provedeno s nastavením, které představuje standardní pájecí profil, používaný pro bezolovnaté pájení.

U všech tří pecí byla zvolena stejná rychlost pohybu transportu, a to 1 000 mm/min. Pro každé měření bylo zaznamenáno cca 1 800–2 000 měřících bodů pro každou proměnnou (měření probíhala v dávkách po 8-10 průjezdech pecí).

Měření proudění ve dvou směrech a průběh teploty probíhal za následujících podmínek. Vzhledem k pevnému nastavení měřicího intervalu (4x za sekundu) je možné označit osu X časovým údajem. Vzhledem k tomu, že běžně používané měřicí systémy používají takt měření 0,5 nebo 1 sekundu, je tato četnost měření naprosto vyhovující. Během pájení je teplota plynu (vzduchu) rozdílná v jednotlivých zónách, tím pádem se mění v určitém rozsahu i hustota foukaného vzduchu. Při nastavení ventilátorů na 35 Hz je v pohybu objem vzduchu v každé zóně cca 170 m³/hod. Při zvýšení frekvence ventilátoru na 45 Hz (standardní nastavení) už je objem foukaného vzduchu cca 210 m³/hod. Při ohřátí plynu (vzduchu) v peci se změní i hustota, se stoupající teplotou klesá. Vzduch (obsahující cca 80 % dusíku) změní svoji hustotu z 1,149 kg/m³ na hodnotu 0,722 kg/m³ při teplotě 220°C. To znamená, že objemově musí pec "přefoukat" mnohem větší objem za vyšších teplot, jednoduchým výpočtem se dá dokázat změna o cca 26 až 33 m³/hod při teplotách 100 °C resp. 210 °C.

Jak již bylo uvedeno v minulých kapitolách, nedá se matematicky odvodit přesný vzorec pro výpočet koeficientu přenosu tepla. Do celého systému vstupuje velké množství proměnných, které znemožňují vytvoření matematicky přesného modelu. Mnoho parametrů tedy lze pouze změřit, matematickou cestou lze pouze dojít k přibližným hodnotám.

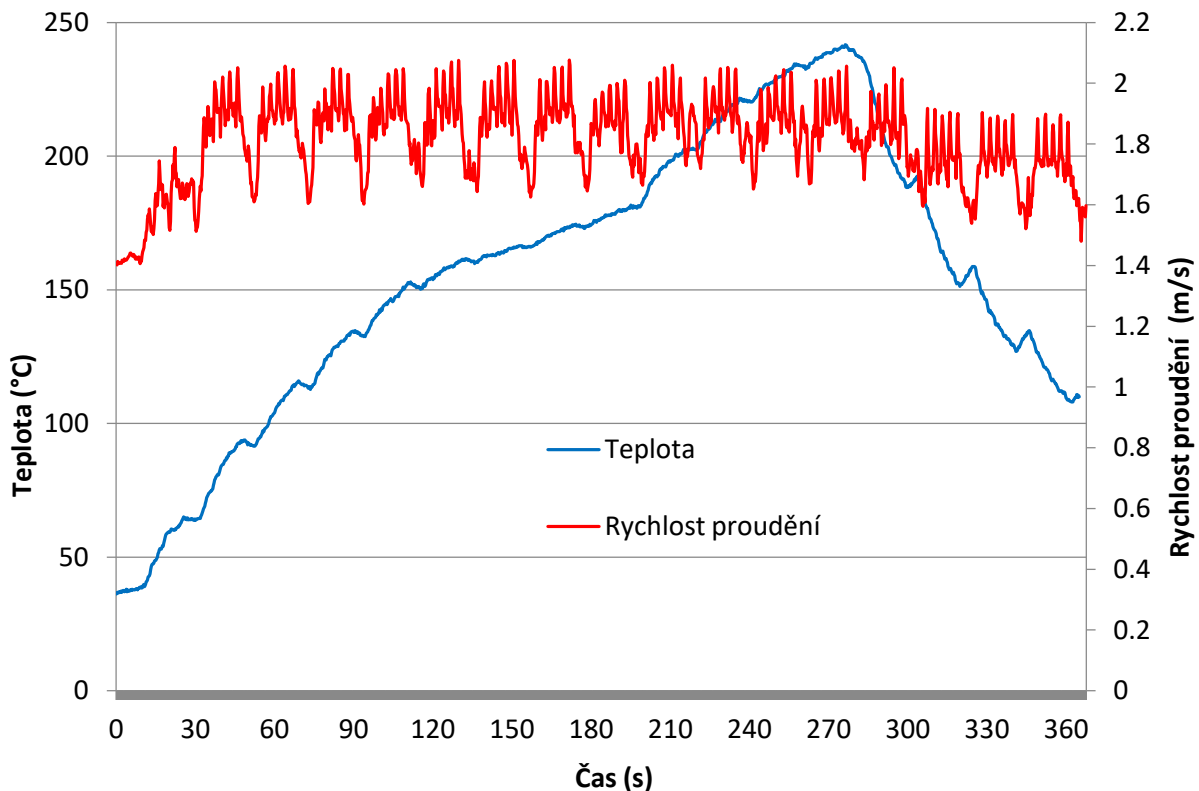


Obr. 5.12: Průběh rychlosti proudění a teploty v peci 1 ve směru osy Z

U tohoto měření (Obr. 5.12) je jednoznačně vidět velmi výrazná separace jednotlivých zón, především v oblasti předehřevu a chladicí zóny. Ta na straně jedné umožní dosáhnout větší rozdíly mezi zónami, na straně druhé je tato skutečnost poněkud kontraproduktivní. Automatizované měřicí a kontrolní systémy si s podobným průběhem teplot neumí poradit, teplota mezi zónami se propadne o poměrně velkou hodnotu a to je potom vyhodnoceno jako hranice změny. Vede to k falešným výsledkům, například při výpočtu času předehřevu, času nad liquidus apod. U systému, např. KIC (viz poznámka v dalším textu), bylo nutné upravit měřicí software, aby nevykazoval nesprávné hodnoty.

Z uvedeného grafu je zřejmá změna nastavení první zóny ohřevu na nižší rychlost proudění. To souvisí s přechodem na bezolovnaté pájení po roce 2006. Při pájení olovnatými slitinami byl dovolený limit strmosti ohřevu do 5 K/s, u bezolovnatých slitin je strmost ohřevu omezena na max. 3 K/s. U měřené pece je vzdálenost mezi výstupem horkého plynu z tryskového pole a výrobkem 45 mm, proto je na jedné straně výborný přenos tepla, na straně druhé strmost ohřevu mírně překračuje doporučenou hodnotu. Některé firmy mají interními předpisy stanoven limit na menší hodnotu, např. 2,5 K/s. Uvedená pec dosahovala strmosti 2,61 K/s, což bylo pro zákazníka nepřijatelné. Proto výrobce provedl úpravu na separátní

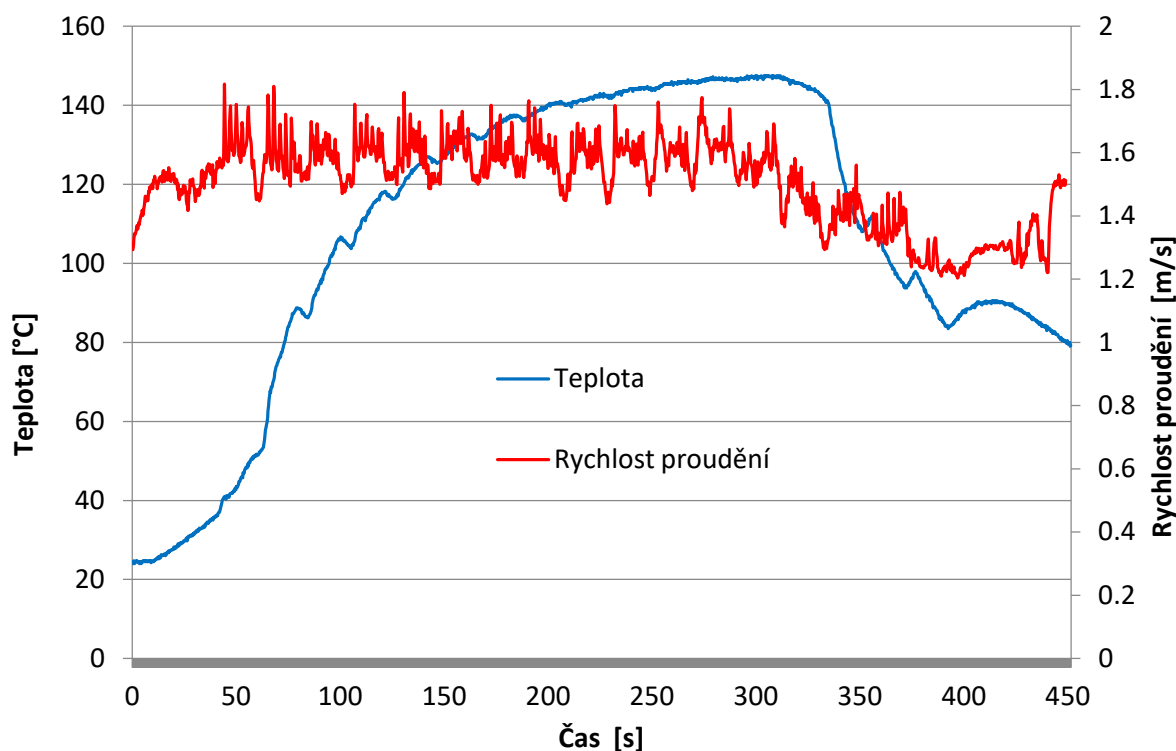
řízení ventilátorů první zóny (nahore i dole). To umožní pokles rychlosti proudění a tím pádem menší přenos tepla a snížení strmosti ohřevu.



Obr. 5.13: Rychlost proudění pro pec č. 1 v ose Y

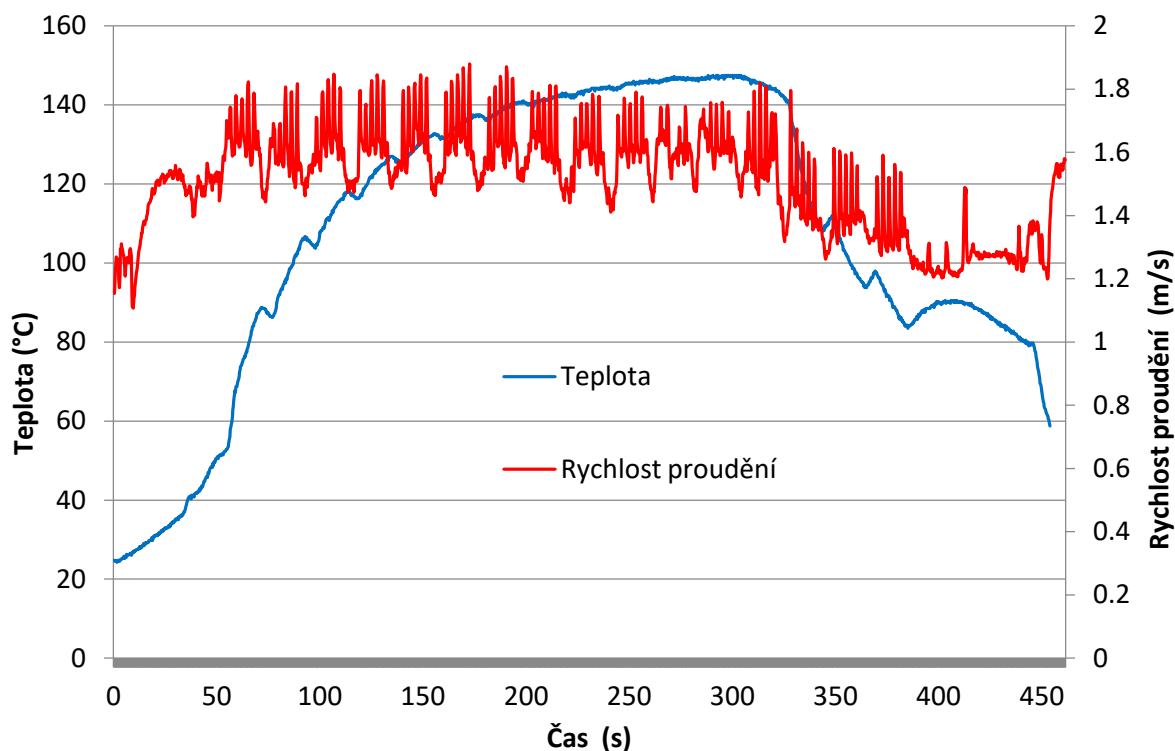
Obr. 5.13 ukazuje stav rychlosti proudění v ose Y. V souladu s pozdějšími zjištěními za pomoci simulace je rychlost proudění v ose Y vyšší ve srovnání s prouděním v ose Z. Proudění probíhá tak, že v ose Z proudí horký plyn směrem k výrobku. Z prostoru pájecí komory je potom příčně (tedy ve směru osy Y) odsáván a znovu přes topný systém vháněn na výrobek. Dochází tak m.j. k tomu, že uprostřed transportní dráhy dochází vlivem sníženého proudění i ke změnám ve velikosti koeficientu přenosu tepla, který se rychlostí proudění přímo souvisí. K dalšímu vysvětlení této problematiky potom přispívá i provedená zjednodušená simulace proudění. Jak bylo popsáno v předešlých kapitolách, pro měření teploty je použita simulace velké součástky, tedy prvku s nezanedbatelnou termickou masou. Přesto měření ukazuje poměrně značné propady mezi zónami. Uvedený odstup mezi zónami je dán mechanickou stavbou dané pece. V prostoru mezi zónami se nachází mechanika, která zajišťuje nastavení šířky transportní dráhy a polohy podpěry. Celé tryskové pole je tvořeno hliníkovou deskou s maticí otvorů, ze strany procesní komory jsou tyto otvory opatřeny zahlobením. To přispívá k rovnoměrnému rozložení teplot uvnitř pájecí pece, na odstranění rozdílů mezi zónami ale má poměrně malý vliv. Na horší rovnoměrnost má vliv i geometrie rozložení děr v desce trysek. V praxi tato skutečnost ale nemá nijak zásadní vliv na pájecí proces, tepelná setrvačnost desky spojů se projevuje kladně na výsledném průběhu teplotního profilu.

Další měření bylo provedeno s nastavením teploty ve všech zónách na 150 °C. Průběh měřené křivky ukazuje, že i tady se vliv mezer mezi jednotlivými topnými zónami projevuje, ale v grafickém zobrazení není tolik výrazné, jako při profilu pájecím. Při tomto měření už separace jednotlivých zón není tak výrazná. (Obr. 5.14)



Obr. 5.14: Průběh teploty a rychlosti proudění pro pec č. 1, osa Z

Průběh nastavení jednotlivých zón je dán m.j. skutečností, že daná pec pájí s ochrannou dusíkovou atmosférou. To vyžaduje nastavení proudění tak, aby uprostřed pece byl mírný přetlak, který klesá směrem ke vstupu a výstupu. Tím se zajistí, že na vstupu a výstupu pece je proudění směrem ven z pece a tím je, spolu s mechanickými zábranami, zabráněno vnikání vzduchu (kyslíku) do pece. Celé nastavení je velmi citlivé a může být měněno jen v malém rozsahu. Pokud výrobek obsahuje velmi malé součástky, které mají pod sebou jen velmi malou vrstvu pájecí pasty, a tím pádem jsou velmi citlivé na odfouknutí z jejich pozice, je třeba přestavit celou pec na nové podmínky. Tato změna je realizovatelná pomocí nastavení frekvence ventilátorů jednotlivých zón. Dnes se zpravidla již používají tzv. EC (elektronicky řízené) motory a celé nastavení je pak možné uložit k nastavenému teplotnímu profilu jako parametr daného výrobku. Proudění v jednotlivých topných zónách je vedeno hlavně ve směru os Z a Y, tedy napříč vůči směru pohybu desek plošných spojů skrze pec. Tím je zajištěna i lepší separace zón mezi sebou. Proto v celém pájecím procesu hraje dominantní roli proudění v osách Z a Y. Proudění v celé délce procesní komory je vyvážené, přídavek 23 m³ dusíku je potom využitý pro uvedené ovlivnění proudění směrem ke vstupu a výstupu pece a zabránění vnikání vzdušného kyslíku dovnitř pece a tím narušení ochranné funkce dusíkové atmosféry.



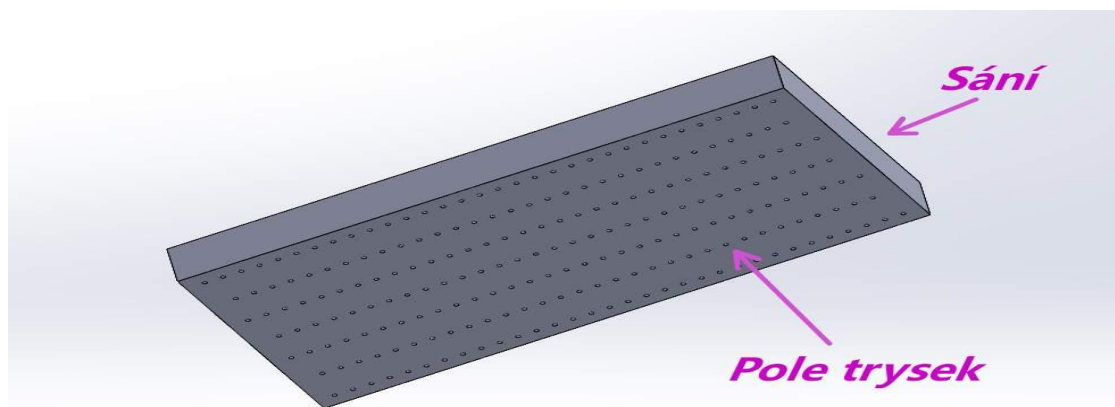
Obr. 5.15: Průběh rychlosti proudění pro pec č. 1 v ose Y

Obr. 5.15 ukazuje rychlost proudění v ose Y. Při pájení bez ochranné atmosféry není otázka proudění tak citlivá, přesto musí být nastaveno tak, aby proud horkého vzduchu spolu s odpařenými zbytky tavidla nebo s výpary z DPS směřoval do systému fluxmanagementu, který čistí procesní plyny. Dnešní pájecí pasty mají značný podíl chemie, jejíž nespotřebované zbytky je třeba odvést z prostoru procesní komory a zachovat tím čistotu vnitřního prostoru pece. Pokud by tomu tak nebylo, je nebezpečí, že zbytky z pájecího procesu by se mohly usazovat v peci a následně kapat na vyráběné desky spojů, což by byl velký kvalitativní problém. Dalším důsledkem může být mechanické zablokování vnitřních mechanismů pecí vlivem ztvrdlých zbytků fluxu apod. Systém fluxmanagementu tak plní velmi důležitou úlohu. Popis systémů fluxmanagementu nesouvisí přímo s touto prací, proto nebude dále rozebírán a vysvětlován, i když se jedná o velmi zajímavou záležitost.

5.5.2 Pec č. 2 (V)

Druhá pec byla podrobena měření podobným způsobem jako ta první. Také se jedná o výrobce, který je v nemalé míře zastoupen v procesu pájení na světovém trhu. Jak bylo již uvedeno, byla zvolena i tato pec s délkou topné zóny cca 4,5 m, aby výsledky měření byly i po této stránce dobře porovnatelné. Bylo provedeno několik měření a výsledné hodnoty byly zprůměrovány.

Schematické rozložení trysek v topné zóně je patrné na Obr. 5.16. Jedná se o pravidelné uspořádání otvorů bez jakéhokoliv ohranění výstupního průměru. Z hlediska výroby velmi jednoduché řešení, tedy i levné. Celá deska obsahuje 221 otvorů o průměru 4,2 mm. Celková plocha, přes kterou proudí horký plyn směrem k výrobku, je tedy srovnatelná s první pecí. Jiné geometrické rozmístění ale má velký vliv na rozložení proudění i jeho rychlost, jak bude ukázáno v dalším textu a grafice. Otvory, umístěné na kraji topné desky, jsou v pravidelných rozestupech, což zajišťuje rovnoměrné vyhřívání i prostorů mezi zónami, nedochází ke vzniku tzv. mrtvé zóny mezi topnými kazetami. Na jedné straně to má pozitivní vliv na hladkou křivku průběhu teplot, na druhé straně neumožní zvětšený rozdíl teplot mezi zónami.



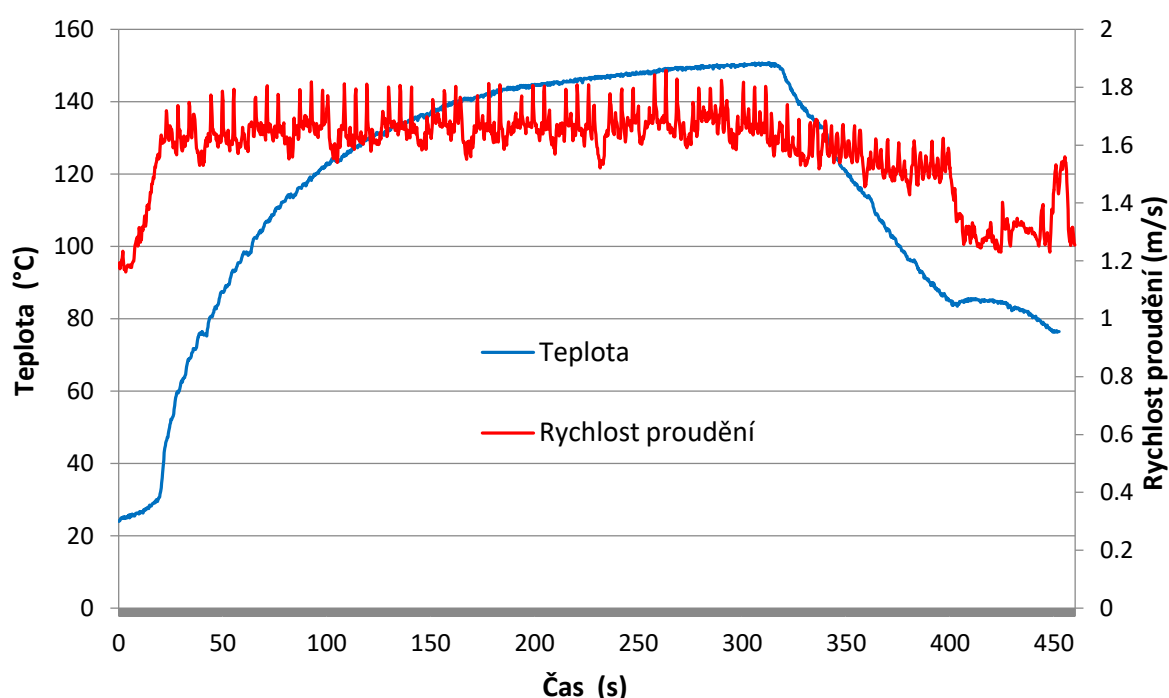
Obr. 5.16: Schematické znázornění topné zóny v peci č. 2

Rozlišení jednotlivých zón je v grafu patrné, ale není tak výrazné, jako je tomu u pece č. 1. Pec č. 2 vykazuje znatelně rovnoměrnější průběh teplot a hladkou křivku teplotního profilu. Rychlost proudění je poněkud vyšší, než u pece č. 1, rozdíl činí průměrně 0,2 m/s. Na vlastní průběh teplotního profilu tento rozdíl ale nemá signifikantní vliv. Vzhledem k tomu, že vnitřní stavba této pece je mechanicky velmi podobná jako u pece č. 1, dá se předpokládat, i když nejsou známy konkrétní hodnoty objemu plynu v jednotlivých zónách, že proudění uvnitř bude stejně turbulentní jak v prvním případě.

Jak již bylo uvedeno, má turbulentní proudění dvojí účinek. Na jedné straně se teplo lépe dostává i k malým součástkám, na straně druhé je nebezpečí zmíněného posunu součástek. Vždy je třeba nastavením najít vhodný kompromis, aby průběh teploty odpovídal specifikaci pájecí pasty a veškeré negativní projevy turbulentního proudění byly v přijatelných mezích.

První měření proběhlo na profilu s nastavením teplot ve všech zónách na stejnou hodnotu 150 °C (Obr. 5.17). V průmyslové praxi se používají dva hlavní teplotní profily - vytvrzení lepidla a pájecí profil. Vytvrzení lepidla probíhá při teplotách 130 až 160 °C. I proto bylo zvoleno jedno z měření při této teplotě.

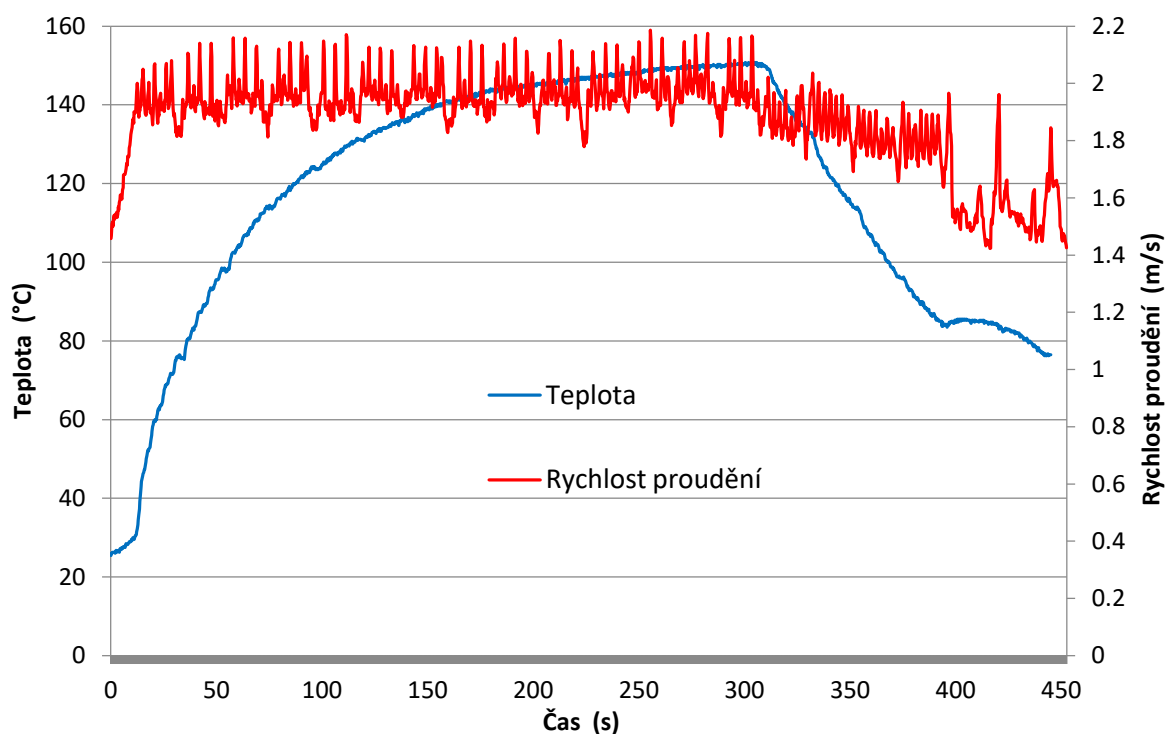
Pájecí profily se mohou lišit podle konkrétního výrobku (vícevrstvá deska spojů, poměr velkých a malých součástek apod.), ale v principu se budou lišit jen v nastavení teploty některých zón. Vlastní rychlost proudění nebude téměř vůbec ovlivněna, nebo jen ve velmi specifickém případě (např. velké součástky s malou styčnou plochou, velmi malé lehké součástky atd.). Proto byly k měření použity jen dva základní profily.



Obr. 5.17: Průběh teploty a rychlosti proudění u pece č. 2, osa Z

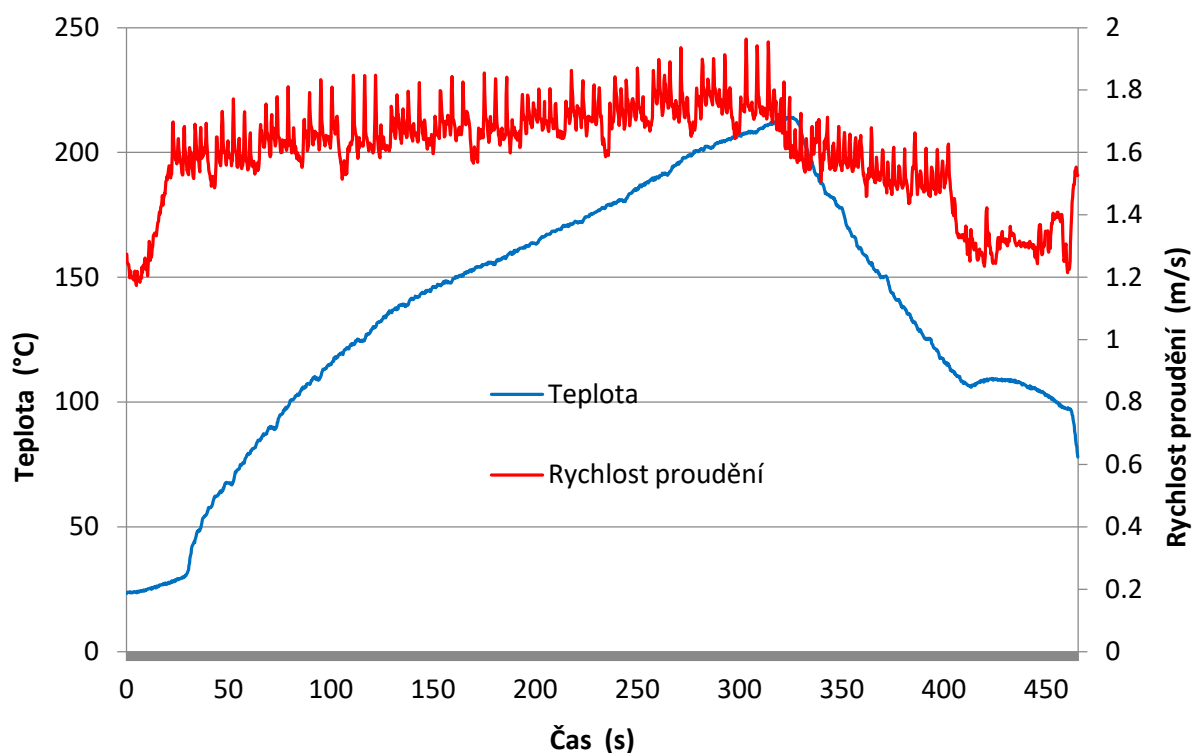
Na Obr. 5.17 vidíme průběh rychlosti proudění. Křivka je velmi podobná průběhu u první pece, ale separace jednotlivých zón není tak výrazná. Tento stav je způsoben tím, že otvory, kterými proudí horký plyn, jsou umístěny až k samému okraji desky trysek, proto "mrtvá oblast" mezi topnými zónami není tak výrazná, jako u první pece. To má pozitivní vliv na hladkou křivku teplotního průběhu, může však znamenat problém s nastavením vyšších rozdílů mezi jednotlivými zónami a tím ztíží nastavení specifického průběhu teplot, který u některých typů výrobků může (a je) požadován. Ve většině případů ale toto chování pece vyhoví a není třeba provádět žádná speciální opatření. Graf ukazuje, že vlastní proudění vykazuje poměrně ostré náběhy rychlosti, které jsou způsobeny použitím relativně malých otvorů v desce trysek, kterými proudí horký plyn na výrobek. Vytváří se tak jakýsi "topný hřeben", který svými poměrně ostrými maximy působí na výrobek a ohřívá ho. Na druhou stranu relativně ostré proudy horkého plynu mají vyšší schopnost proniknout i mezi vysokými součástkami až na základ desky spojů, kde se nacházejí miniaturní součástky, typicky

velikosti 0402 nebo 0201. Bohužel mnozí konstruktéři elektroniky vytvoří na desce plošných spojů takový mix součástek (vzhledem k jejich velikosti), že není nic neznámého součástka 0402 bezprostředně vedle velkého relé. Pro konvekční přenos tepla je takové uspořádání velmi náročné na prohřátí a mnohdy je výroba (zapájení) takového výrobku úkolem na hranici možností použité metody.



Obr. 5.18 Průběh teploty a rychlosti proudění u pece č. 2, osa Y

Na Obr. 5.18 je vidět proudění ve směru osy Y. Podobně jako u první pece je vidět oddělení jednotlivých topných zón. I zde je první zóna nastavena na slabší proudění (regulace ventilátorů), protože jinak hrozí překročení doporučených hodnot teplotního strmosti ohřevu, která je pro bezolovnaté slitiny omezen na 3 K/s. Překročení této hodnoty by mohlo mít fatální následky na součástky s vyšší třídou citlivosti na vlhkost (tzv. MSL). Při příliš prudkém nahřátí nestačí vodní páry uniknout ze součástky přirozenými póry a může dojít k tzv. popcorn efektu. Některé velké korporace m.j. i kvůli tomuto nebezpečí omezují interními předpisy d ohřevu na 2,5 K/s. Menší rozdíly mezi jednotlivými zónami jsou způsobeny m.j. i tím, jak jsou rozmístěny trysky, kterými proudí horký plyn směrem k výrobku. U pece č. 1 jsou otvory podél delší strany děrované desky s relativně velkými mezerami, u pece č. 2 je okraj tvořen řadou malých otvorů v pravidelné, rovnoměrné rozteči. Z grafu je také vidět, že i pec č. 2 má geometrii topných zón udělanou tak, že mezi posledním předehřevem a přetavovací zónou je vidět větší oddělení zón. To umožní využít větší rozdíl teplot mezi předehřevem a peak zónou. Tím je umožněn rychlejší přechod přes liquidus.

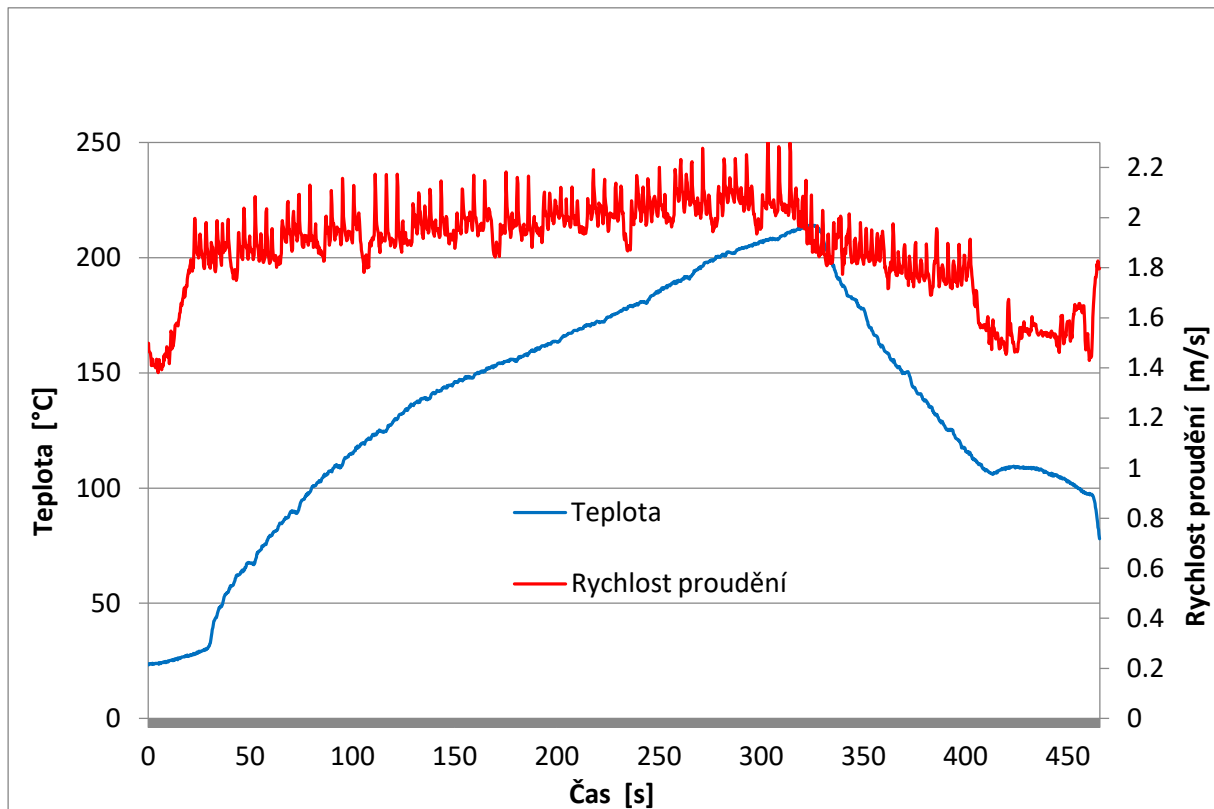


Obr. 5.19: Průběh teploty a rychlosti proudění u pece 2, osa Z

Obr. 5.19 ukazuje průběh proudění za teplot standardního pájecího profilu. Průběh maximálních hodnot už není tak rovnoměrný, jako u nižších teplot. Při vyšších teplotách se mění podmínky uvnitř pece. Horký plyn (vzduch, dusík) zvětší svůj objem vlivem mnohem vyšší teploty a tím pádem i hustota plynu klesá. Z tabulek se dá vyčíst, že hustota vzduchu se v rozsahu 20–200 °C liší až o 8–10 %. Ventilátory s radiálním oběžným kolem ženou nahřátý plyn směrem k výrobku. I při vyšší teplotě je vidět, že termické oddělení topných zón je mnohem méně znatelné, než u první zkoumané pece. Důsledkem je mnohem hladší křivka průběhu teplot, tedy vhodnější stav pro automatizované vyhodnocení profilu, kdy přechody nad a pod liquidus nezpůsobují chyby ve vyhodnocení. Z hlediska pájení podobné přechody nejsou kritické, z pohledu automatizovaného vyhodnocení už situace není úplně jednoduše řešitelná.

Poznámka: K on-line hlídání teplotního profilu se používá např. systém KIC. Tento systém pracuje na principu naučení se chování pájecí pece v interakci s daným výrobkem a poté kontroluje, zda zaznamenaný průběh teplot je stále stejný. Nejčastější rozsah hlídání teplot bývá ± 2 °C, tedy poměrně úzký rozsah. Systém se učí tak, že měří teploty uvnitř pece termočlánky, umístěnými poblíž transportního systému. Když pecí projíždí deska spojů, odebere v dané zóně určité množství tepla, které odpovídá teplotní masě daného výrobku. Měření probíhá s mechanicky velmi malými termočlánky, takže dokážou velmi rychle reagovat na velmi malé změny teploty. Na začátku procesu se zaznamená průchod 50 ks desek spojů. Z naměřených hodnot si systém spočítá střední hodnotu, odchylku atd. a v následné sériové výrobě hlídá, zda naměřené parametry odpovídají tomu, na co byl systém nastaven

(naučen). Protože tento systém může být propojen s řídicím software pájecí pece, dokáže jeho prostřednictvím zastavit výrobu a vyžádat si zásah operátora.

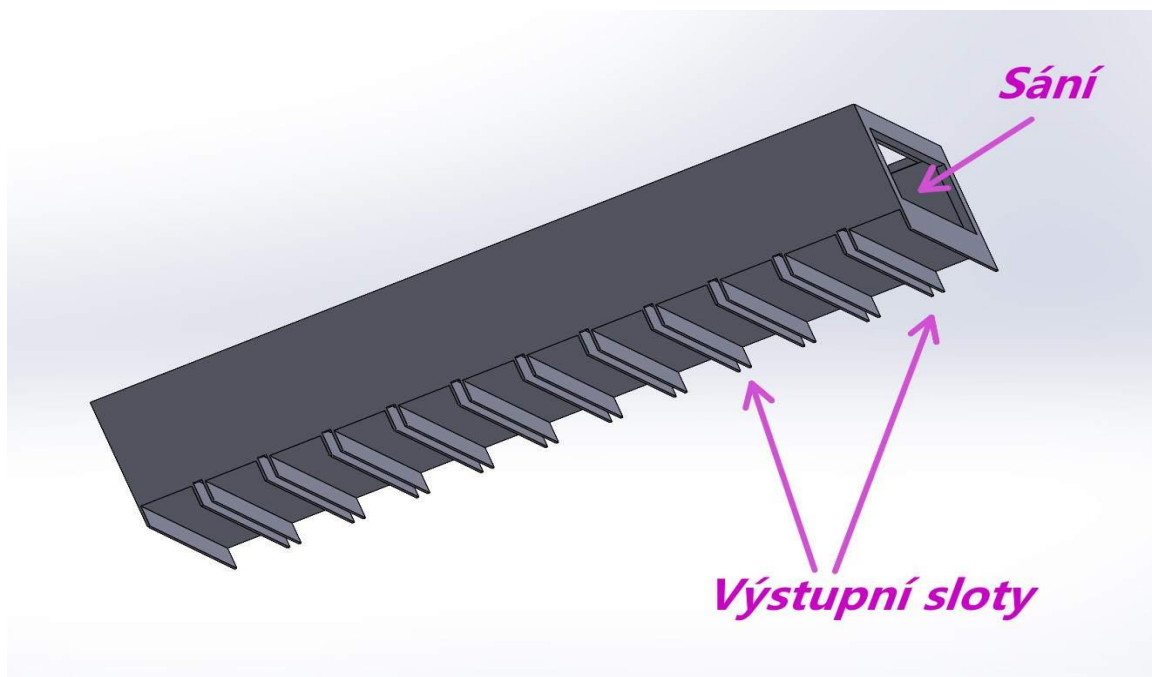


Obr. 5.20: Průběh rychlosti proudění v ose Y při pájecím profilu u pece č. 2

Na Obr. 5.20 vidíme průběh rychlosti proudění při nastaveném pájecím profilu. Z grafu je vidět, že průběh rychlosti proudění je přes celou topnou zónu poměrně rovnoměrný, v chaldicí zóně je vidět výrazně slabší rozkmit rychlosti proudění. Ovisí to s nastavením strmosti ochlazování, který je nutno také udržet v určitém rozsahu hodnot. Vzhledem ke velké komplexnosti současných výrobků se vždy volí kompromis vyhovující co nejvíce dané sestavě. Vyšší strmost ochlazení má vliv na jemnější strukturu pájeného bodu, zároveň však představuje teplotní stres pro součástky a v neposlední řadě pro mnohavrstvé desky plošných spojů. Kdysi se to týkalo základních desek počítačů, dnes, vzhledem k nárůstu počtu funkcí, se čím dál více dotýkají i výrobků v oblasti automotive, která tvoří základ elektrotechnické výroby v ČR. Řídící desky pro automobilní aplikace nezřídka obsahují 12–16 vrstev. Pájení takových sestav je velkou výzvou pro konvektivní přenos tepla, výjimkou nejsou hraniční podmínky. Bohužel kondenzační pájení není v současné době v takovém stavu, aby vyrovnalo masovou výrobu (objem výroby) ve stávajících konvekčních zařízeních. Proto se stále využívá vynucená konvekce.

5.5.3 Pec č. 3 (S)

Tato pec je vnitřní stavbou velmi odlišná od prvních dvou. U této pece jsou použity axiální ventilátory, také stavba pole trysek je značně odlišná. Jak je vidět na nákresu uvedeném na Obr. 5.21, jsou použity obdélníkové sloty místo děrované desky. Je to výrobně náročnější, má větší podíl ruční práce na montáži topné zóny, umožňuje to ale dostat na výrobek mnohem větší proud horkého vzduchu (dusíku) a dosahovat tak velmi dobrých hodnot koeficientu přenosu tepla. Ovšem má to i svá negativa, jak bude ukázáno dále.



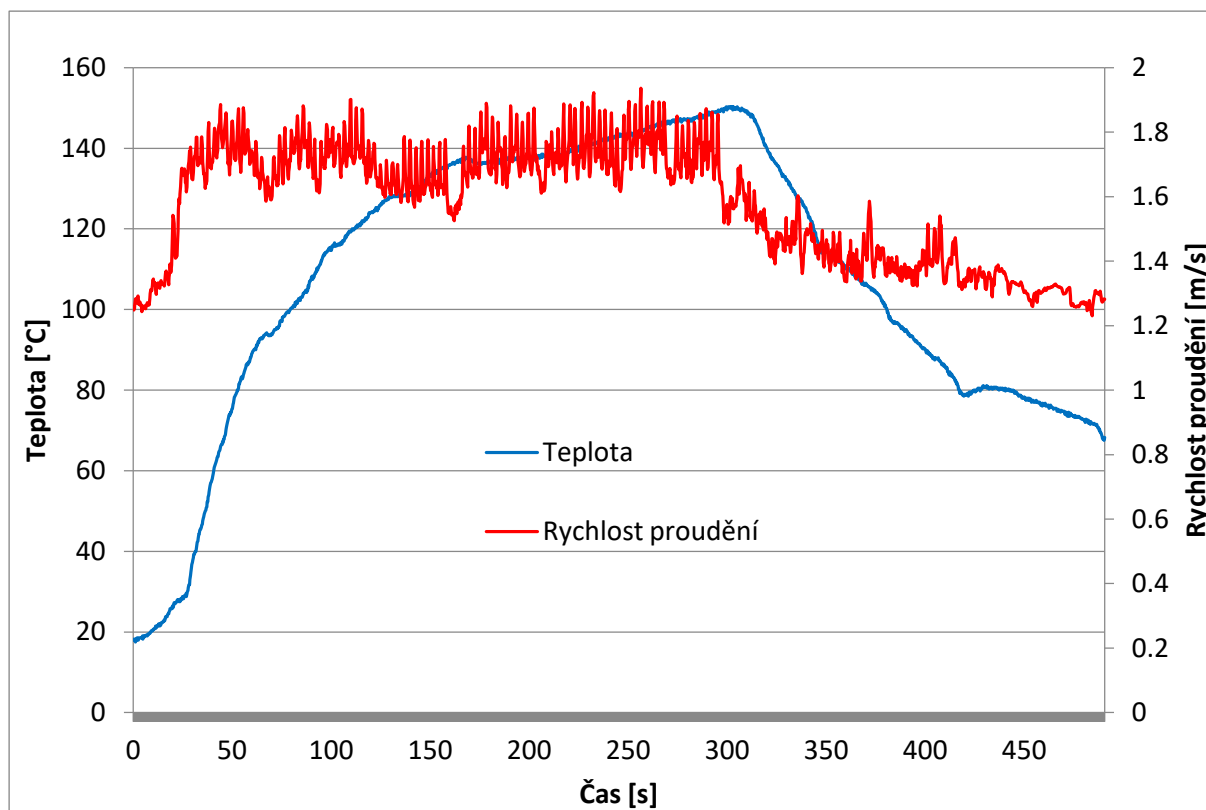
Obr. 5.21: Schematický nákres topné zóny pece č. 3

Při měření se výrazně projevila jiná mechanická stavba. Proudění je mnohem rovnoměrnější a zároveň silnější z hlediska množství vháněného plynu (vzduchu nebo dusíku).

Tab. 5.5: Parametry pole trysek u pece č. 3

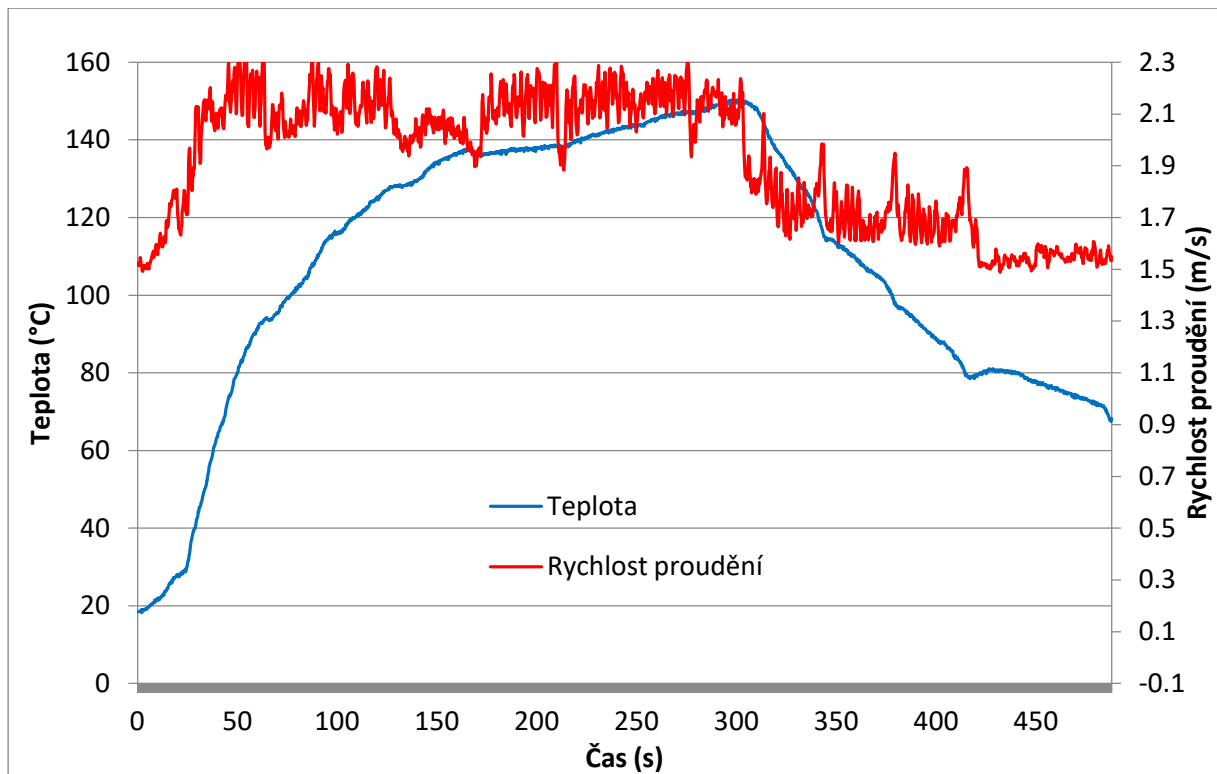
Rozměry topné zóny	Délka (m)	Šířka (m)	Hloubka (m)	Plocha (m ²)
činný povrch	0,60	0,50	---	0,30
sání	0,60	---	0,106	0,031
boční část	---	0,50	0,140	0,070
Tryska	rozměr (m)	Plocha otvoru (m ²)	Celá deska (m ²)	Počet
	0,007·0,50	35·10 ⁻³	0,42	12

Z Tab. 5.5 vyplývá jednoznačný rozdíl v rozměrech pole trysek, které je u pece č. 3 několikanásobně větší a tím pádem umožňuje podstatně vyšší průtok horkého plynu (vzduchu, dusíku) směrem k výrobku. Tento průtok je třeba zohlednit při nastavování teplotního profilu. Přenos tepla bude sice velmi dobrý, lepší než u předchozích dvou pecí, ale vzrůstá nebezpečí posunutí součástek vlivem laterálních sil vznikajících při tak silném proudění.



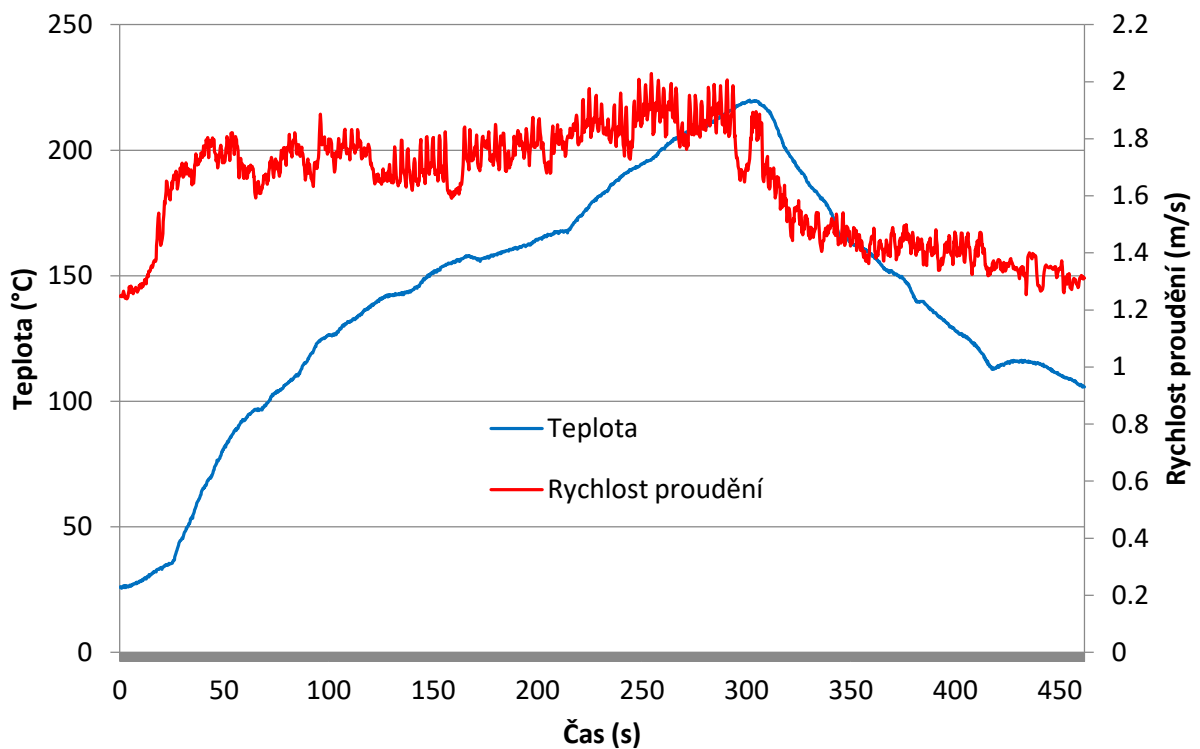
Obr. 5.22: Průběh teploty a rychlosti proudění při 150 °C u pece č. 3, osa Z

Na Obr. 5.22 je zřetelně vidět, že díky jiné stavbě pole trysek je výrazný rozdíl v rychlosti proudění i v jejím rozložení, které je mnohem rovnoměrnější, neprojevují se tolik jednotlivé otvory pole trysek. V grafu je vidět, že množství plynu, hnaného směrem k výrobku, je výrazně větší. U pece č. 3 je rychlost proudění vyšší než u dvou předchozích pecí, což se projevilo i v praktických benchmarkových testech, kdy tato pec vytvářela natolik turbulentní proudění, že způsobovalo posun součástek na testovací skleněné desce. Vhodným nastavením rychlosti otáčení ventilátorů topné zóny se to dá omezit, resp. úplně tomu zabránit. Vyžaduje to ale poněkud jiný přístup než u prvních dvou pecí. V neposlední řadě je výroba takové topné zóny, její přední části, náročnější na čas (větší podíl ruční montáže), než když se hliníková deska nechá automaticky vyvrtat CNC strojem. V dnešní době se podobná řešení moc často nevidí, snaha je vyrobit co nejjednodušším způsobem s minimálními náklady stroj, který se prodá a přinese zisk. Technologická optimalizace, bohužel, mnohdy následuje teprve za tím.



Obr. 5.23: Průběh teploty a rychlosti proudění při 150°C u pece č. 3, osa Y

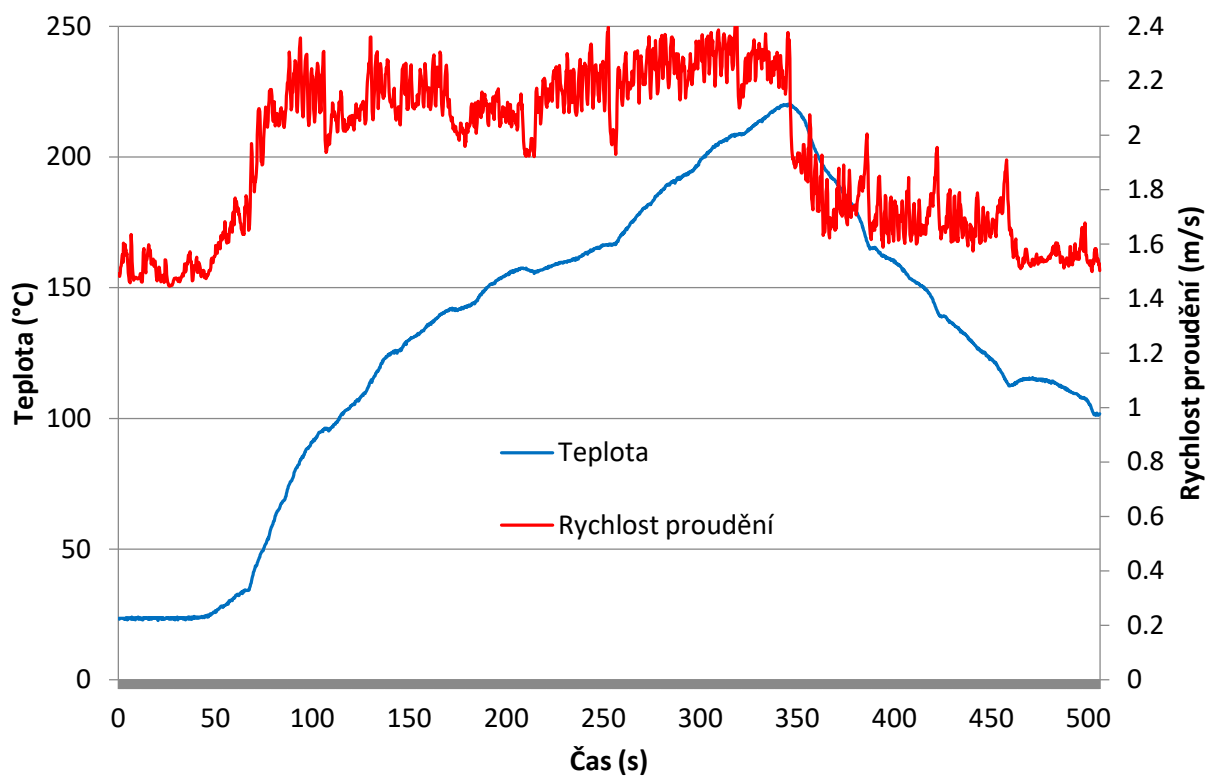
Z Obr. 5.23 je vidět průběh rychlosti proudění v peci č. 3 v ose Y. Horký plyn proudí mnohem většími otvory než u dvou předchozích pecí, je vidět jednoznačný nárůst rychlosti proudění a jiný charakter jeho rozložení.



Obr. 5.24: Průběh teploty a rychlosti proudění při pájení v peci č. 3, osa Z

Z Obr. 5.24 je vidět průběh proudění v ose Z, tedy ve svislém směru. Nerovnoměrnost síly proudění je způsobena mechanickým stavem dané pece, kdy po více než roce byla znovu uvedena do provozu. Přesto se i za těchto podmínek projevila mechanická stavba topných zón. Jednoznačně je vidět, že proudění je vzhledem k mechanické stavbě rovnoměrnější co se rozptylu rychlosti týká. Proud horkého vzduchu tedy proudí ve větší rychlosti i objemu na pájený výrobek.

Obr. 5.25 ukazuje rychlost proudění ve směru osy Y, tedy příčně ke směru pohybu transportu. Vzhledem k principu funkce topné zóny se projevila vyšší rychlost proudění, tedy i s ní související nerovnoměrný koeficient přenosu tepla. Protože nárůst teploty matematicky souvisí s exponenciální funkcí, dochází, při dostatečně dlouhém setrvání výrobku v peci, k vyrovnání tepelných rozdílů a tím pádem se změny koeficientu neprojevují příliš silně na celkovém průběhu teplot.



Obr. 5.25: Průběh teploty a rychlosti proudění při pájení v peci č. 3, osa Z

Naměřené hodnoty potvrzují, že ve směru osy Y je vyšší rychlost proudění, v chladicí zóně jsou charakteristické špičky proudění, které vznikají mezi zónami a jsou důsledkem mechanické stavby.

Poznámka: Zkoumaná pec vyrobila cca 350 milionů desek spojů. Vzhledem k tomu, že většina desek je vícenásobná, lze s jistotou říci, že danou pecí prošla více než miliarda výrobků!

5.6 Srovnání naměřených hodnot

Provedená měření jednoznačně prokázala souvislost mezi mechanickou stavbou dané pájecí pece a průběhem rychlosti proudění v ní. První dvě pece používají podobná řešení s děrovanou deskou, třetí využívá obdélníkové sloty. Praktické experimenty zároveň také prokázaly skutečnost, že jen měřením teploty nelze zjistit detailní stav procesního nastavení pece. Svoji roli hraje tepelná setrvačnost součástek a desek plošných spojů.

U pece č. 1 se projevuje skutečnost, že trysky po delší straně topné desky jsou rozmístěny s většími mezerami, což má za následek výrazné oddělení zón mezi sebou. Příliš výrazné oddělení, může působit problémy s automatickým vyhodnocením pájecího profilu. Toto může být vnímáno jako pozitivní ve smyslu oddělení (nezávislosti) jednotlivých topných zón, na druhé straně nerovnoměrná teplotní křivka může způsobovat problémy v automatizovaném vyhodnocování teplotních profilů. Z naměřených grafů je také vidět, že daná pec má velmi rovnoměrné proudění, prakticky stejné po celé délce procesní komory. To přispívá ke stabilitě vlastního pájecího procesu a to i z dlouhodobého pohledu. Praktická zkušenost je velmi dobrá, ve své praxi jsem se potkal se zařízeními i několik roků starými a výsledky měření kontrolních profilů byly v rozmezí jednotek °C.

V případě pece č. 2 jsou otvory po delší straně topné desky umístěny v podstatně hustším rastru, což má pozitivní vliv na hladký průběh teplotní křivky v rámci celé procesní komory dané pece. Nedochozí k výrazné separaci topných zón v oblasti přehřevu, přísun tepla z topného systému na desku plošných spojů je velmi rovnoměrný. Z grafů vyplývá i skutečnost, že v oblasti mezi posledním přehřevem a přetavovací (peak) zónou je mechanika pece upravena tak, aby bylo možné dosáhnout větší teplotní separace. Ta umožní nastavit větší rozdíl teplot mezi zmíněnými zónami, což má pozitivní vliv na omezení vzniku tombstone efektu (jednou stranou nezapájené dvouvývodové součástky). I tato pec se z dlouhodobého pohledu chová velmi stabilně.

U pece č. 3 se projevila odlišná stavba topné desky na přenosu tepla na výrobek. Zde je patrný jednoznačně velmi silný proud horkého plynu ve stavu silné turbulence. Přenos tepla je tím pádem velmi výrazný, nutno však dbát na správné nastavení režimu pece kvůli možnému posunu lehkých součástek. Výrobce už při návrhu této pece počítal s možností individuálního nastavení teploty i rychlosti otáčení ventilátorů, takže lze podle potřeby (na základě měření na konkrétním výrobku) tyto parametry patřičně nastavit. Z grafů je vidět určitá nerovnoměrnost rychlosti proudění, na měřeném teplotním profilu se to ale nijak výrazně neprojevilo.

Vzhledem k mechanice přenosu tepla se u všech pecí zjištěné nedostatky (které jsou z hlediska konstrukčního principu nutné) neprojevují příliš signifikantně na celkovém průběhu samotného teplotního profilu. Při nastavování průběhu teplotního profilu je ale třeba důsledně dbát na specifika té které pece a výsledné nastavení zkontrolovat proměřením profilu za pomoci vzorku desky spojů daného výrobku osazené termočládky.

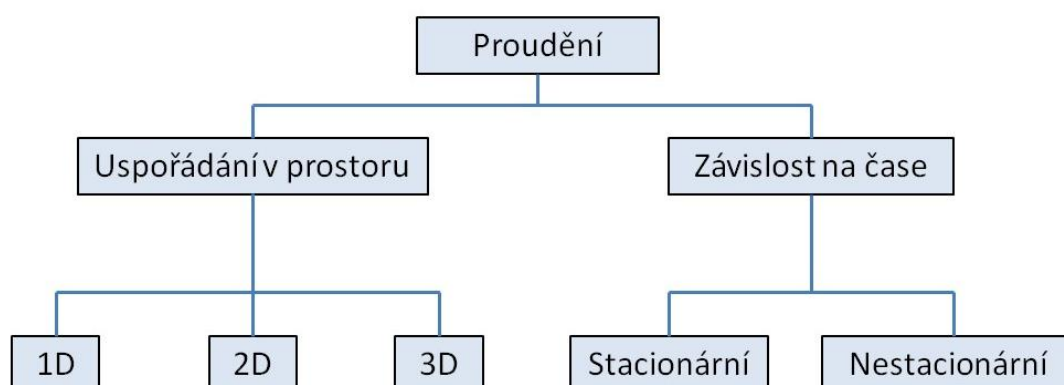
Poznámka: Z praktického hlediska se tato pec č. 3 jevila jako velmi dobrá. Odhlédneme-li od zkoumané oblasti, tedy měření rychlosti proudění, je její mechanickou stavbou unikátem (patentovaným). Zkoumaná pec nemá uvnitř žádné mechanické prvky, které by se mohly zalepit fluxem a komplikovat tak nastavení např. šířky transportu apod. Pec využívá

principu známého spíše z inženýrských staveb, mostů apod.. Celý transportní systém je postaven na tenkých profilech, které svojí termickou masou neovlivňují teplotní chování pece. Oba profily (pevná strana i pohyblivá) jsou zavěšeny na ocelovém lanku, které se pro nastavení šířky dráhy povolí, stroj přestaví šířku. Poté se lanka napnou (sílu odpovídající cca 7 tunám) a celý transport je tak stabilní. Tím, že je mechanika pouze vně pece, odpadají problémy s její kontaminací, která trápí všechny výrobce bez rozdílu. Bohužel nový majitel firmy zastavil další vývoj reflow pecí a orientuje se aktuálně jen na selektivní pájení.

6 K problematice simulace tepelných polí v průtahových pecích

Jednou z možností jak získat představu o fungování a formování tepelných polí v průtahových pecích jsou počítačové simulace. Zde však existují dva hlavní problémy, se kterými je třeba se vypořádat na samotném počátku. Prvním je volba vhodného simulačního nástroje, jež je navíc úzce spjata s pořizovacími náklady, jež mohou být neadekvátně vysoké. Druhým pak je zadání vstupních parametrů, které vyžaduje s ohledem na velké množství proměnných vždy určitý kompromisní předpoklad. Potom vzniká otázka zda vynaložené náklady na získané výsledky jsou adekvátní. Dále je popsána tato problematika včetně jednoho z ekonomicky dostupných postupů.

Při vývoji zařízení se v minulosti používala metoda stavby funkčních vzorků, často s různými variantami některých prvků. Postupně se experimentálně zkoumaly různé kombinace prvků a na základě výsledků se se vybírala optimální varianta. Tento postup je časově i finančně velmi náročný. Metoda CFD (Computational Fluid Dynamics) umožňuje simulovat zkoumané prostředí a jevy v něm. Tak lze získat velmi důležité poznatky o proudění tekutin (plynů), přenosu tepla a hmoty. [24]



Obr. 6.1: Základní možnosti popisu proudění [24]

Z Obr. 6.1 vyplývá, že můžeme posuzovat proudění ve dvou základních oblastech - podle uspořádání v prostoru nebo podle časové závislosti. Pokud se jedná o prostorové spořádání, rozlišuje tři základní skupiny. Použijeme-li 1D uspořádání, jedná se o pohyb po křivce, ve 2D pohyb v rovině a 3D je pro pohyb v prostoru. Rozdíl mezi těmito třemi prostory je i ve způsobu řešení. Jednodimenzionální prostor lze řešit jednou algebraickou rovnicí, proudění je funkcí pohybu po křivce. Dá se tedy pro rychlost proudění napsat vztah [24]:

$$u = u(s), \quad (6.1)$$

kde s představuje křivku, na které proudění zkoumáme.

Pro 2D proudění potom lze popsat základní vztah jako

$$u = u(x,y), \quad (6.2)$$

kde pro výpočty použijeme jednu diferenciální rovnici.

Ve 3D prostoru lze popsat základní vztah ve tvaru (6.3).

$$u = u(x,y,z) \quad (6.3)$$

Stacionární proudění, jak již bylo uvedeno, není závislé na čase, proto platí následující vyjádření (6.4).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (6.4)$$

V technické praxi se nejvíce vyskytuje turbulentní proudění. Toto proudění obsahuje prostorové struktury, které se nazývají "eddies" a představují prostorové víry. Největší vír nemůže svojí velikostí nikdy přesáhnout velikost oblasti, ve které daná kapalina (plyn) proudí. Tuto hodnotu nazýváme délkové makroměřítko víru. Naopak nejmenší víry, tzv. délkové mikroměřítko víru, jsou závislé na fyzikálních vlastnostech dané kapaliny (plynu), resp. její viskozitě. Velké víry se postupně rozpadají a zmenšují tak dlouho, až dosáhnou minimální možné velikosti. Tento proces je ukončen disipací energie nejmenších vírů na teplo. U vírů se dále počítá s jejich rychlostí pohybu, kterou nazýváme rychlostní měřítko. Doba "života" vírů se označuje jako časové měřítko. Každý vír tak lze popsat pomocí těchto parametrů, lze jím modifikovat i Reynoldsovo číslo na tvar

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} = \frac{u \cdot l}{\nu} \cdot \frac{l}{l} = \frac{l^2}{\frac{\nu}{u}} = \frac{t_v}{t_t}, \quad (6.5)$$

kde t_v značí časové měřítko přenosu turbulentních vírů o makroměřítku l a t_t označuje časové měřítko molekulární difúze.

Podle výsledku rozlišujeme tři výsledné stavy

1. $t_v < t_t$, t.j. $Re < 1$, tato hodnota představuje laminární proudění, turbulentní víry zanikají,
2. $t_v > t_t$, t.j. $Re > 1$, tato hodnota představuje turbulentní proudění, převažuje molekulární difúze, turbulentní víry přetrvávají, z tohoto vyjádření zároveň plyne, že většina proudění je turbulentní, protože uvedená nerovnost je splněna už pro poměrně malé hodnoty parametrů proudění
3. $t_v \approx t_t$, t.j. $Re \approx 1$, tato hodnota představuje přechodový stav, laminární stacionární proudění se mění na turbulentní nestacionární, pokud dojde k překročení kritického Reynoldsova čísla. Na počátku této změny (tzv. bifurkace) se začínají v proudění projevovat oscilace. Při zvyšování Reynoldsova čísla narůstají nestability a výsledkem je plně turbulentní proudění.

Numerické simulace vycházejí z fyzikálního popisu pohybu plynu, který je dán základními zákony. Jsou to zákon zachování hmoty, zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti. Tyto zákony lze vyjádřit matematickými rovnicemi jako jsou rovnice kontinuity, rovnice přenosu energie a rovnice přenosu hybnosti, které jsou popsány v kapitole 3. Posledně uvedené rovnice se nazývají Navier–Stokes rovnice. Získáváme tak soustavu tří nelineárních parciálních diferenciálních rovnic (6.6–6.8). [24]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta \left(\frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta \left(\frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \vartheta \left(\frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (6.8)$$

V těchto rovnicích (6.6–6.8) jsou u, v a w složky rychlosti, t je čas, p je tlak, ρ je hustota, ϑ je kinematická viskozita, $f_{x,y,z}$ představuje složky vnější objemové síly. Kinematická viskozita je fyzikální vlastnost dané tekutiny (plynu), která, jak je z rovnic vidět, ovlivňuje hybnost. Pro vzduch jsou hodnoty uvedeny v Tab. 5.3.

Největší význam má turbulence ve značném zvýšení hodnoty toku energie a hmoty v proudovém poli. To je způsobeno difúzí, která transportuje veličiny z objemu tekutiny do ostatních přilehlých objemů. Základní popis této skutečnosti lze vyjádřit konvenčně difuzní rovnicí (6.9).

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (6.9)$$

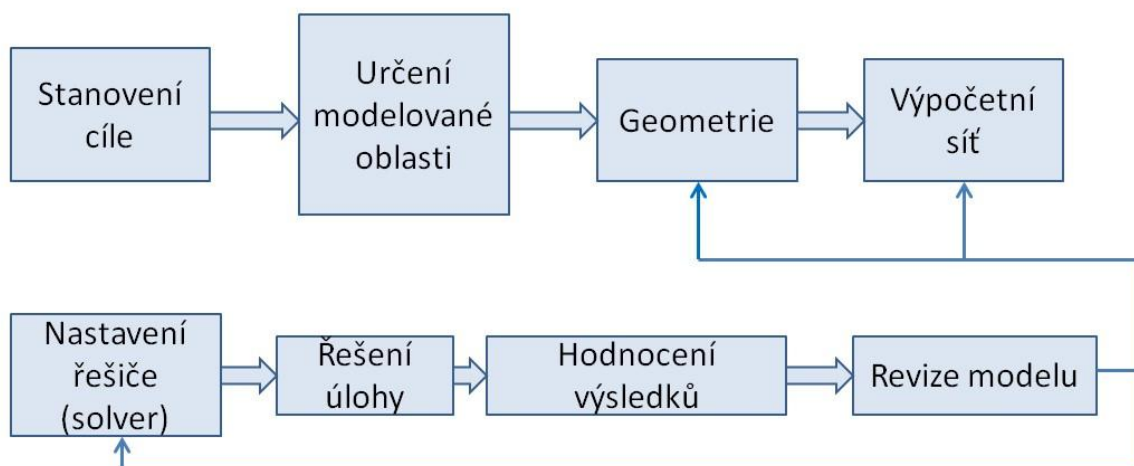
Proměnná C představuje libovolnou veličinu, např. hybnost, vnitřní energii, hmotnostní koncentraci apod. Pokud bychom za C dosadili hodnotu 1 a předpokládali neměnnou hustotu, dostaneme rovnici kontinuity, tedy popis zákona zachování hmoty:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (6.10)$$

kde u, v, w jsou jednotlivé složky rychlosti. Tato rovnice představuje konvektivní změnu toku hmoty. Tato změna musí být nulová (zákon zachování hmoty), protože pokud si vymežíme nějaký objem, musí množství kapaliny, které do daného objemu vteče, v totéž okamžiku vytéct.

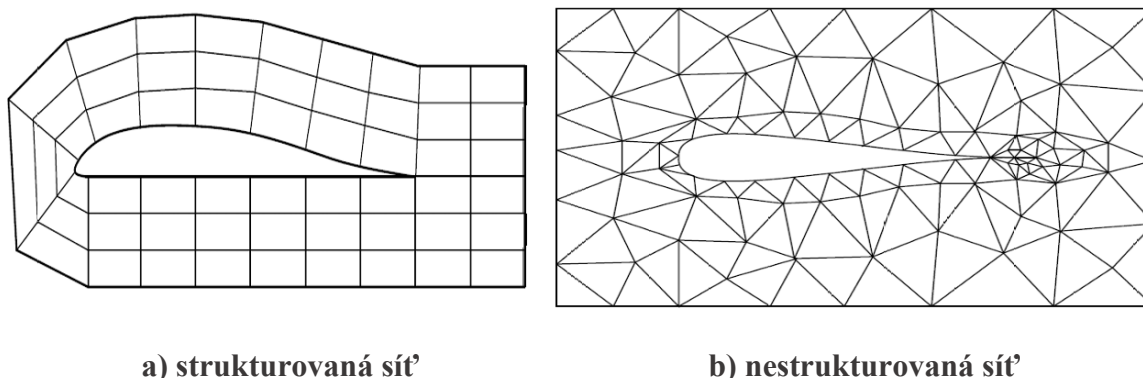
6.1 Základní metody počítačové simulace proudění (CFD)

Základní postup při simulaci proudění popisuje následující schéma - viz Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Postup při simulaci proudění systémem CFD [24]

Nejdříve je třeba si ujasnit, co chceme danou simulací zjistit. Následuje určení modelované oblasti, která bude simulována. Tuto oblast je třeba matematicky popsat tzv. sítí. Při tom se zvolí charakter sítě, zda je strukturovaná nebo nestrukturovaná (Obr. 6.3). Strukturovaná síť používá dělení zkoumaného prvku rovnoměrnou sítí, všechny části sítě jsou stejné. Oproti tomu nestrukturovaná síť využívá nerovnoměrný popis zkoumaného prostoru (předmětu apod.), může být např. hustší síť v místech, kde předpokládáme kritický bod. Tím můžeme dostat přesnější výsledky, nevýhodou je značný nárůst potřeby výpočetního výkonu. Z hlediska použitých elementů máme síť uniformní, která obsahuje pouze elementy stejného typu, síť hybridní používá potom různé elementy pro lepší vyplnění zkoumané geometrie.



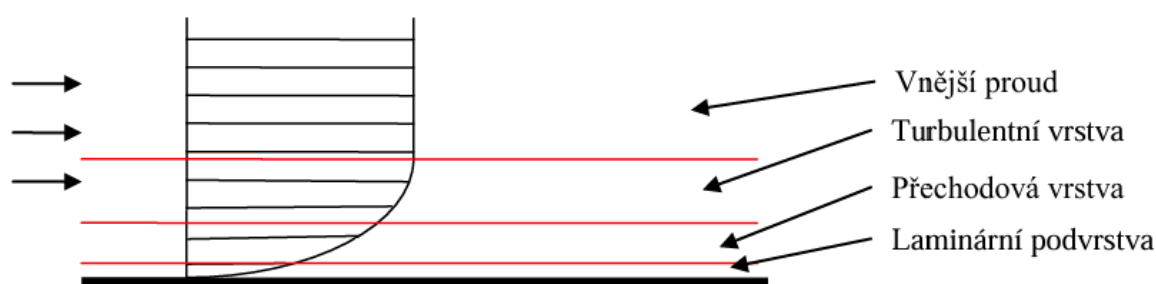
Obr. 6.3: Druhy sítí popisujících simulovaný objekt [24]

Zavádí se pojmy jako mezní vrstva, která představuje oblast poblíž pevné stěny. Poblíž stěny je gradient rychlosti poměrně velký, v této oblasti je vlivem smykových napětí produkována turbulentní kinetická energie. Zde rozeznáváme tři vrstvy - laminární, přechodovou a turbulentní. Tloušťka mezní vrstvy δ (m) závisí na Reynoldsově čísle a je možné ji vyjádřit rovnicí (6.11). [24]

$$\delta = 4,9 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot x}{u \cdot \rho}} \quad (6.11)$$

Vzdálenost od náběhové hrany odpovídá x , η je dynamická viskozita, ρ je hustota a u rychlost kapaliny ve volném proudu (tedy v dostatečné vzdálenosti od stěny).

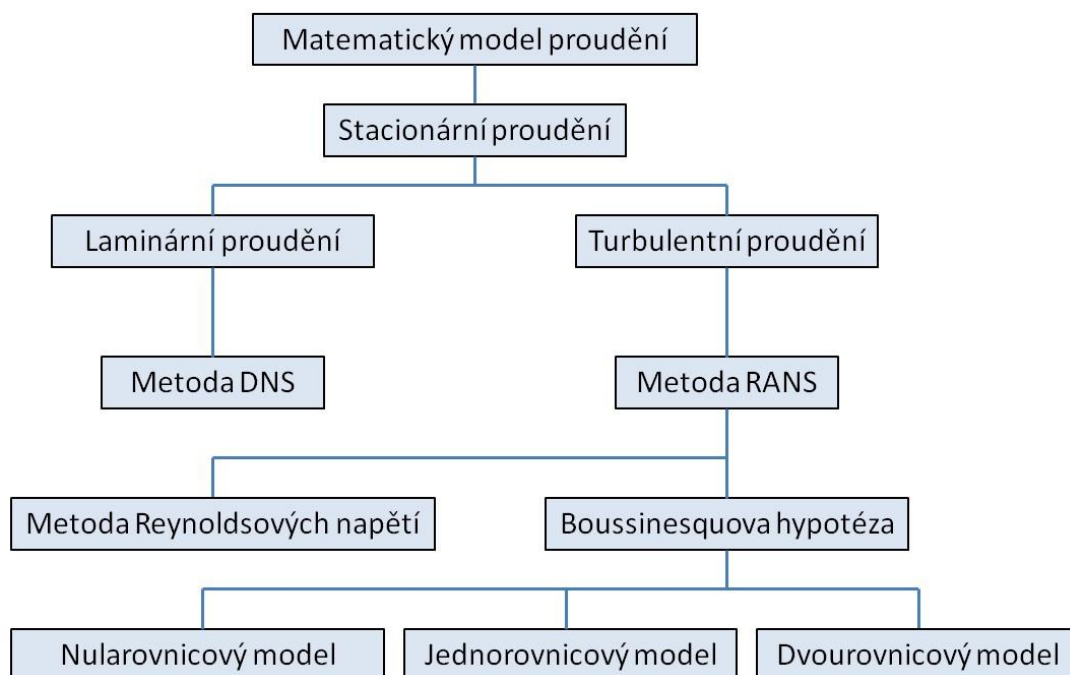
Grafické znázornění je na následujícím Obr. 6.4.



Obr. 6.4: Znázornění mezní vrstvy [24]

Simulace na běžném PC je časově velmi náročná činnost. Podle složitosti použité výpočetní sítě stoupá požadavek na výpočty. V profesionální sféře (konstrukce letadel, konstrukce automobilů apod.) se proto používají speciální multiprocessorové platformy, které jsou velmi drahé. Proto je uplatnění simulací vhodné především v oblastech, kde se zaplatí úsporou nákladů na vývojové vzorky např. v již zmíněné letecké nebo automobilní technice, kde by to bylo neúměrně drahé a časově náročné.

Modelace turbulentního proudění se neustále vyvíjí v souvislosti s neustálým nárůstem výpočetního výkonu současných počítačů. Samotná turbulence ale stále ještě není v současnosti plně prozkoumaná a vyřešená, proto se k simulacím používají zjednodušené modely. Těch je několik různých typů, každý se dá použít jen pro specifickou úlohu. V použitých rovnicích jsou používány empirické koeficienty, zjištěné pokusy a měřeními.



Obr. 6.5: Postup při řešení stacionárního proudění [24]

Hlavní způsoby řešení simulací stacionárního proudění [24] jsou (Obr. 6.5):

a) DNS (Direct numerical Simulation) - výpočetně velmi náročný postup, závislý na výkonu použitého počítače. Počet bodů simulační sítě se dá odhadnout z mikroměřítká turbulence. Velikost výpočetního lementu musí být srovnatelná s nejmenší velikostí vírů před jejich disipací na teplo. Z toho vyplývá velká náročnost na operační paměť a výpočetní výkon počítače, m.j. proto, že se používá soustava rovnic bez jakéhokoliv zjednodušení. S rostoucím Reynoldsovým číslem jsou výsledky velmi přibližné a s praktickým měřením se dá porovnat pouze statistickými metodami.

b) LES (Large Eddy Simulation) - tato metoda je založena na modelování velkých vírů, které lze zachytit výpočetní sítí. Tyto víry jsou závislé na výpočetní oblasti. Jejich velikost a poloha v čase jsou závislé na řešeném problému. Tyto velké víry jsou v podstatě řešeny metodou přímého výpočtu (DNS). malé víry lze považovat za izotropní a podílejí se málo na transportních jevech. jejich prostřednictvím ale dochází k disipaci energie jako důsledku vnitřní viskozity. Ty malé víry lze parametrizovat tzv. subgridními modely a z výpočtů je odstraníme filtrací turbulentního pole. Je třeba zvolit vhodnou šířku pásma, zpravidla odpovídající rozměru výpočetního elementu sítě. Tím se dá dosáhnout takový počet buněk sítě, které lze řešit stávající výpočetní technikou.

c) RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes Equations) - tato metoda je založena na metodě časového Reynoldsova středování veličin turbulentního proudění a následně na časovém středování základních rovnic. Využívá zvláštního fenoménu (objeveného Reynoldsem), že průměrná hodnota proudění je vždy stejná, nezávisle na tom, jak často a jak dlouhé časové úseky byly změřeny. RANS metodu lze považovat za praktické využití

statistických metod pro řešení proudění. V takovém případě se jednotlivé prvky, pro zjednodušení, popisují dvěma složkami - střední hodnotou a okamžitou flukтуаční složkou. Hrubým odhadem se dá flukтуаční složka vyjádřit jako o řád menší hodnota ve srovnání se střední hodnotou. Vychází se z rovnice (6.6), počítá se se střední hodnotou a započítanou flukтуаční složkou. Rovnice (6.12) potom dostane nový tvar:

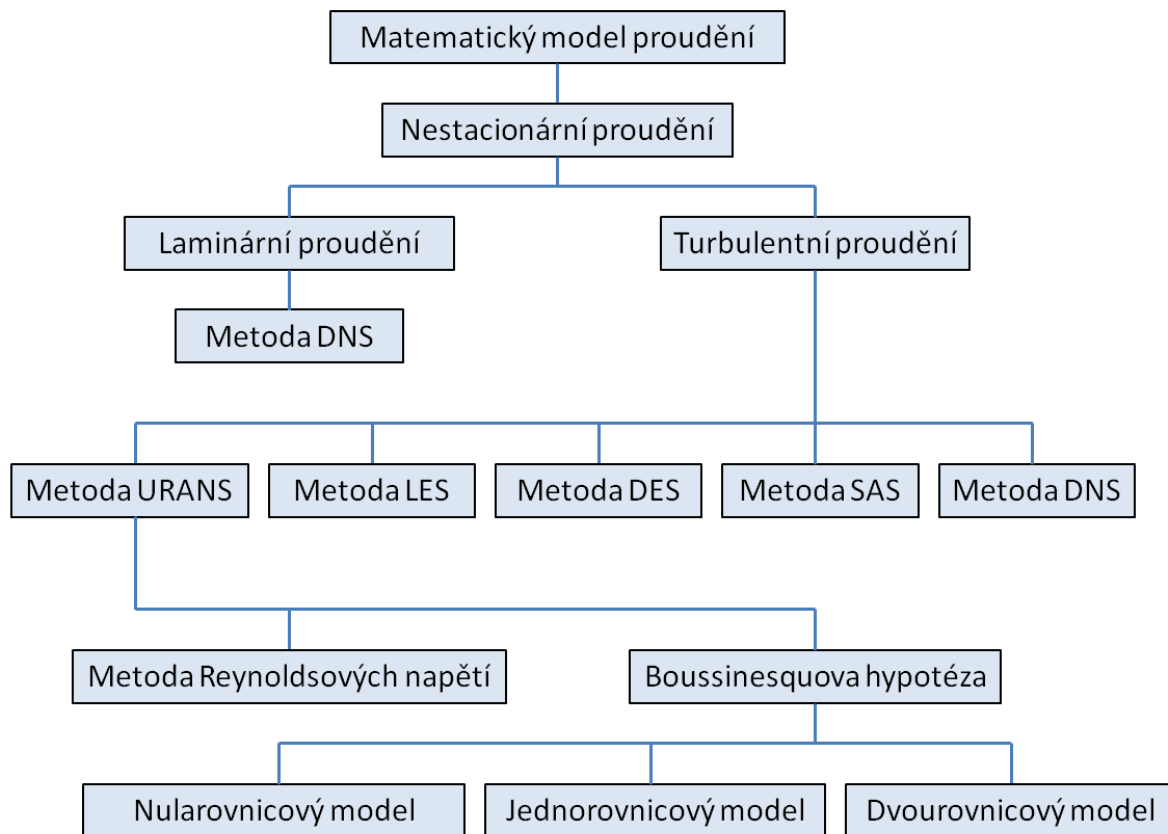
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i \cdot u_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial(\overline{u_i^l \cdot u_j^l})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial(\overline{p})}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2(\overline{u_i})}{\partial x_j^2} + \overline{f_i}, \quad (6.12)$$

který obsahuje nový člen $\overline{u_i^l \cdot u_j^l}$. Ten se po vynásobení hustotou změní na tzv. tensor Reynoldsova napětí, který lze napsat ve formě matice:

$$\tau_{ij} = \rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u^l \cdot u^l} & \overline{u^l \cdot v^l} & \overline{u^l \cdot w^l} \\ \overline{v^l \cdot u^l} & \overline{v^l \cdot v^l} & \overline{v^l \cdot w^l} \\ \overline{w^l \cdot u^l} & \overline{w^l \cdot v^l} & \overline{w^l \cdot w^l} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Jak vidíme z rovnice (6.13), matice je symetrická vůči hlavní diagonále. Tento tensor způsobuje dodatečné deformace kapaliny, které se vyskytují pouze u turbulentního proudění. Uvedené rovnice potom nazýváme RANS (Reynolds–Average Navier–Stokes rovnice). Hlavní princip této metody je ve volbě metody výpočtu uvedeného tensoru Reynoldsova napětí.

Problematika turbulentního proudění, jak už bylo napsáno, je velmi složitá a pro praktické výpočty se využívá celá řada zjednodušení. Ne vždy je ale proudění stacionární, je např. třeba zahrnout do výpočtů periodické děje, malé flukтуаční pohyby apod. Potom je nutné použít nestacionární modely turbulence. Jejich základní rozdělení popisuje následující Obr. 6.6.



Obr. 6.6: Metody výpočtu nestacionárního proudění [24]

Vzhledem k tomu, že výše uvedený problém je poměrně složitý, následuje krátký popis jednotlivých základních metod výpočtů [24]:

a) URANS (Unsteady Reynolds Average Navier Stokes) - je založen na časově závislém řešení klasického modelu RANS, dochází pouze k rozšíření o další proměnnou, kterou je čas. Výpočet řeší nestacionární proudění jak sled stabilních stavů. V modelu je nutno definovat časový úsek, ve kterém lze považovat proudění za neměnné a je tedy možné je považovat za stacionární. tato metoda se používá především pro hrubý odhad periodických jevů při obtékání těles a v případech, kdy stacionární simulace nevede k výsledku.

b) LES (Large Eddy Simulation) - metoda založená na jiném typu zjednodušení Navierových-Stokesových rovnic. Na rovnice je aplikován prostorový filtr, který z proudového pole odstraňuje malé víry. Tyto malé víry jsou nezávislé na zkoumané oblasti, jsou vždy stejné bez ohledu na čas a prostor, můžeme je tedy nazvat izotropními. naopak velké víry, které jsou závislé na prostoru a času jsou řešeny metodou DNS v časově závislé formě. Malé víry se řeší v časově nezávislé formě. Tato metoda je velmi náročná na výpočetní výkon a tím pádem i doba řešení je podstatně delší, než u jednodušších metod. Tato metoda je výborně použitelná např. pro výpočty proudění s výskytem cyklonů, silně anizotropní turbulence, mikrosměšování, chemické reakce, aerodynamický hluk, speciální případy v letecké konstrukci (rozkmit křídla) a pod.

c) DES (Detached Eddy Simulation) - metoda založená na kombinaci klasického RANS modelu s modelem LES. Velmi náročné jsou hlavně výpočty poblíž stěn, proto je celá úloha

rozdělena na dvě - jedna počítá proudění poblíž stěny jako stacionární, dál od stěny je potom použita metoda výpočtu nestacionárního proudění. Metoda je velmi vhodná na simulace v oblasti překážek (obtékání válce, krychle apod.), proudění okolo velkých vozidel se separačními zónami (nákladní auta, autobusy apod.), výpočet hluku kolem překážek (podvozek letadla, vnější zpětná zrcátka aut apod.), proudění kolem křídel s periodicky se odtrhávajícími se víry.

d) SAS (Scale-Adapt Simulation) - metoda představující vylepšený nestacionární model RANS, který sám rozhoduje o tom, zda bude v dané oblasti řešit proudění stacionárně nebo nestacionárně. Model SAS je založen na von Karmánově rovnici pro délkové měřítko turbulence. Na základě této rovnice se dá určit, zda se v daném místě jedná o stacionární nebo nestacionární proudění. SAS model dynamicky rozhoduje o tom, zda v dané oblasti bude řešit proudění pomocí URANS nebo prostřednictvím stacionárního modelu RANS ve stabilních oblastech. tato metoda je nejlépe použitelná v případech s velkou globální nestabilitou, např. odtrhávající se víry za válcem apod.

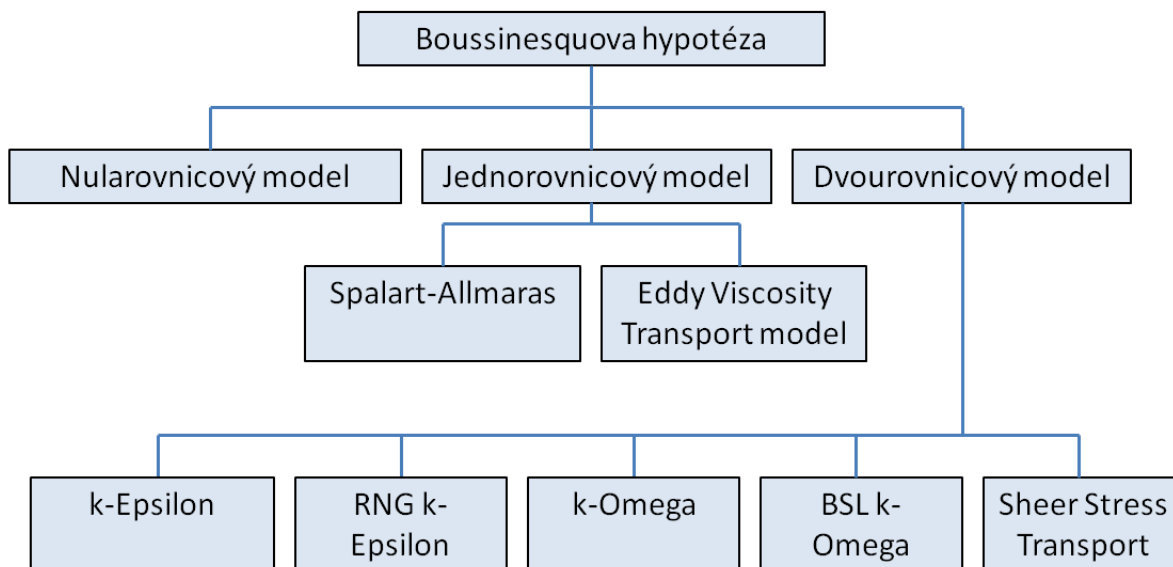
Boussinesquova hypotéza

Velmi často se k simulaci používají postupy Boussinesquovy hypotézy [22]. Ta předpokládá, že i v turbulentním prostředí, stejně jako v laminárním, platí Newtonův vztah

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}, \quad (6.14)$$

kde τ je smykové napětí a η je dynamická viskozita. Tato hypotéza předpokládá, že lze zaměnit tenzor smykových napětí newtonovým vztahem (6.14). Matice devíti hodnot je tak nahrazena jen jednou veličinou, kterou nazýváme turbulentní viskozita, která nezávisí na proudící látce, ale je vlastností režimu proudění. Jak už z názvu vyplývá, má nenulovou hodnotu jen pro turbulentní proudění, pro laminární je rovna nule. Pro proudící kapalinu potom počítá tzv. efektivní viskozitu, která je součtem molekulární a turbulentní viskozity. Jak vyplývá z Obr. 6.6, lze řešit simulaci pomocí režimu "nularovnicového", kde jak již bylo dříve uvedeno, se počítá jen s jednou algebraickou rovnicí. Model "jednorovnicový" počítá s jednou diferenciální rovnicí a "dvourovnicový" model počítá se dvěma diferenciálními rovnicemi.

Všechny metody postavené na využití Boussinesquovy hypotézy ukazuje Obr. 6.7. Výčet těchto metod bude jen velmi informativní, zaměříme se hlavně na metodu k-epsilon, která byla použita pro zjednodušenou simulaci proudění v pájecí peci.



Obr. 6.7: Metody řešení Boussinesquovy hypotézy [24]

Metoda k-epsilon [24] patří, jak je vidět z Obr. 6.7, k dvourovnicovým modelům. Proto tato metoda řeší mimo diferenciální rovnici pro turbulentní kinetickou energii k ještě druhou diferenciální rovnici pro délkové měřítko l . Jak již bylo uvedeno dříve, u turbulentního proudění dochází k postupnému zmenšování vírů a posléze k jejich přeměně (disipaci) na tepelnou energii. Právě druhá diferenciální rovnice řeší rychlost disipace ε [m^2/s^3], proto se tato metoda nazývá modelem k - ε . Rovnicový popis rychlosti disipace používá tři empirické konstanty σ_ε , $c_{1\varepsilon}$ a $c_{2\varepsilon}$, viz rovnice (6.15).

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \cdot \nu_t \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \cdot \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6.15)$$

Z výčtu simulačních metod je zřetelně vidět, že pro konkrétní případ simulace je třeba použít konkrétní metody nebo jejich kombinaci. Důvod je v tom, že celá oblast turbulentního proudění je velmi složitá pro matematický popis a veškerá simulace je v podstatě větší nebo menší přiblížení ke skutečnému stavu. Konkrétní metoda je zvolena podle předpokládaných atributů proudění, v některých případech je nutné změnit metodu i během výpočtu simulace. Stupeň přiblížení je velmi závislý na volbě hustoty výpočetní sítě, zároveň se složitostí modelu značně nelineárně stoupá doba řešení simulace.

I přesto metody simulace vedou ke značným úsporám času i prostředků při návrhu nových zařízení nebo při řešení problémů stávajících zařízení. Dokáží zrychleně nalézt kritická místa a tím značně urychlí vývoj zařízení.

Pro vlastní simulaci lze použít celou řadu programů:

• **komerční programy:** ANSYS FLUENT/CFX, Star-CD, CFDRC, Solid Works

• **open source programy:** OpenFOAM, SU²

• **specializované programy:**

FLACS (FLame ACcelerator Simulator) simulace výbuchů

FDS (Fire Dynamics Simulator) - simulace požárů

• **podpůdné programy:**

Gridgen, Salome – tvorba sítě

Tecplot, FieldView – vizualizace toku

Komerční programy pro výpočet proudění jsou velmi sofistikované, ale zároveň velmi drahé, proto se často využívají open-source programy. Jejich určitou nevýhodou je, že jsou psány často pro prostředí operačního systému Linux a nelze je spustit pod nejrozšířenější verzí operačního systému, tedy Windows. Existuje ale možnost, jak i pod systémem Windows spustit linuxové programy. Nainstaluje se podpora pro Linux, tzv. WSL2 prostředí, a poté je v tomto terminálu možné spustit i linuxové aplikace. Touto cestou byly prováděny další simulace i v tomto případě.

Mezi základní oblasti použití počítačové simulace patří

- konstrukce letadel (řešení odporu vzduchu, vztlkové síly, konstrukce prvků letadla apod.)
- konstrukce turbín
- automobilový průmysl (odporu vzduchu, optimalizace sání, aerodynamický hluk apod.)
- biomedicína
- stavba lodí (optimalizace pohonu, kritická místa (kavitace) apod.)
- elektronika (přenos tepla, chlazení výkonových prvků)
- hydraulické systémy
- topné potrubní systémy

Používají se tři základní metody výpočtů [22]:

- metoda konečných prvků (FEM)
- metoda konečných objemů (FDM)
- metoda konečných rozdílů (FVM)

Pro účely výpočtu proudění našla největší uplatnění metoda konečných objemů. Uvádí se, že tato metoda je obsažena v 80 % všech softwarových nástrojů, které se k výpočtům proudění používají. Zkoumaný prostor se rozdělí na určitý počet samostatných prvků. Každý prvek je představován nějakým prostorovým tělesem - krychle, jehlan, tetraedr apod. S nimi potom specializovaný program počítá. Počet prvků zásadně ovlivňuje složitost a délku výpočtů, proto je třeba i několika průchodů simulačním programem od jednoduššího nastavení po složitě tak, aby výsledek vyhovoval požadovanému účelu.

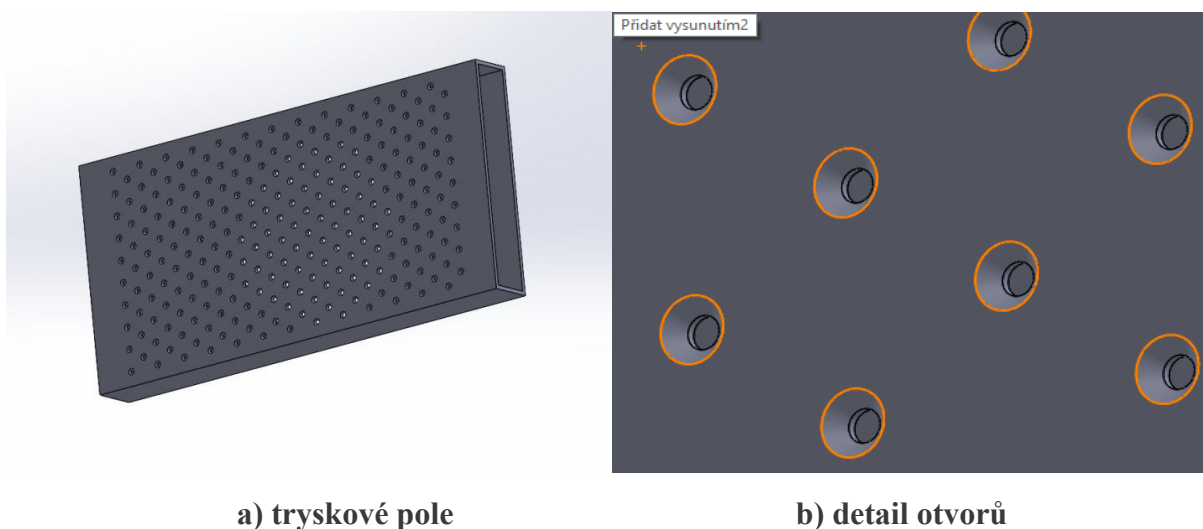
6.2 Simulace desetizónové pece

K simulaci byl použit volně šiřitelný program OpenFoam, který lze zdarma stáhnout ze stránek výrobce. Jedná se o software napsaný v jazyce C++. Návrh výpočetní sítě byl provedený programem Salome, který umožňuje použití již existujících STEP souborů z 3D kreslicích programů, bylo tedy možné urychlit zadávání. To zjednoduší práci s návrhem sítě. Pro vizualizaci výsledků byl použit program ParaView, který je taktéž k volnému použití. Programy psané pro prostředí Linuxu (verze Ubuntu) jsou spuštěny ve virtuálním terminálu WSL2, který je součástí Windows (defaultně není aktivován, je třeba ho prostřednictvím příkazového řádku nainstalovat). Trochu zvláštností je, že grafické výsledky z programu ParaView lze uložit jen jako kopie obrazovky (bez možnosti exportu do nějakého grafického formátu). To je určitá daň za open source program.

Vytvoření geometrie zkoumaného objektu

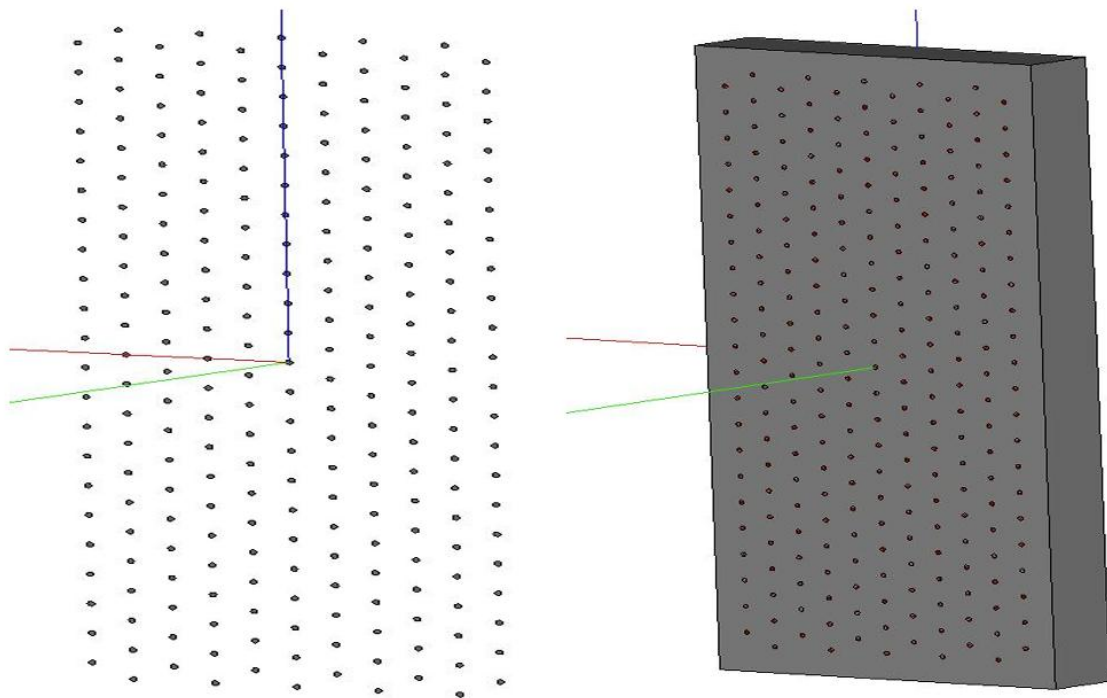
Jak již bylo uvedeno, byla provedena zjednodušená simulace desetizónové pece s teplotami všech zón 20 °C. Výpočet s reálnými teplotami (rozdílnými v každé zóně) by byl časově velmi náročný.

Protože návrh geometrie simulovaného objektu není v případě pájecí pece jednoduchý, byl použit samostatný program, který umí pracovat se STEP soubory, vytvořenými ve 3D kreslicím programu.



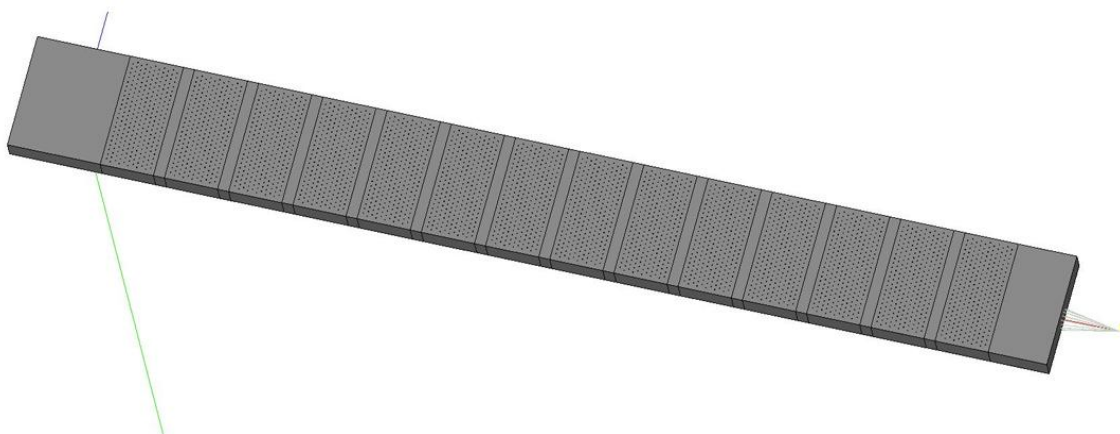
Obr. 6.8: Nákres jedné zóny pájecí pece

Děrovaná hliníková deska je stejná ve všech zónách a má rozměry 600×290 mm (Obr. 6.8 a Obr. 6.9). Aby bylo možné definovat jednotlivé díry, jsou vyjmuty z výkresu a zpracovány jako "faces". V desce je 247 děr. Jednotlivé otvory jsou shrnuty do bloku, který je umístěn uvnitř pece ve výšce 106 mm (dané konstrukcí pece). Protože pec má trysková pole shora i zdola, musíme dolní pole vytvořit posunem z horní strany.



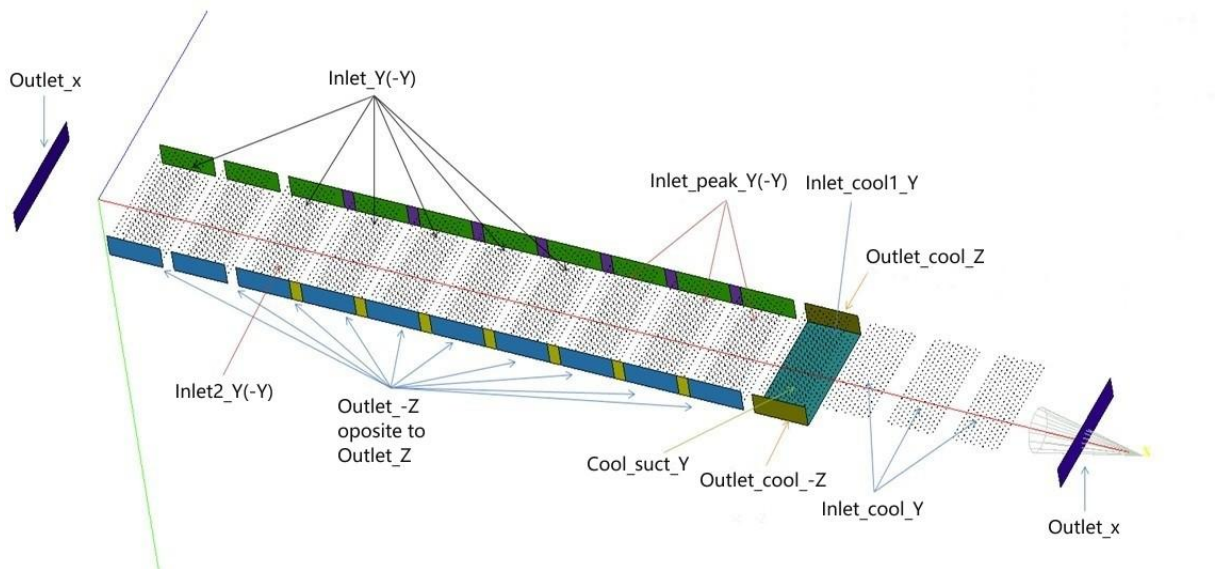
Obr. 6.9: Vytvoření fluidní zóny ze 3D výkresu

Následně musí být tato zóna rozšířena na celou délku (konfiguraci) dané pece. Pro zjednodušení byla vzata do úvahy pec konfigurace 7–3–4, tedy 7 zón předehřevu, 3 zóny přetavovací a 4 chladicí zóny. Pec má pyrolytické čištění procesních plynů. Mezi zónami je mezerka 60 mm (viditelná zřetelně i v kapitole 5.4. na měřeném průběhu proudění), i to musí být zahrnuto do návrhu. Samozřejmě je nutné zahrnout do modelu i vstup a výstup pece, který, především u dusíkových pecí, má za úkol vytvořit "zklidňovací" zónu. Celá složená geometrie musí být poté sloučena do jednoho bloku, aby nebyly počítány zóny jednotlivě, ale jako na sebe navazující celek.



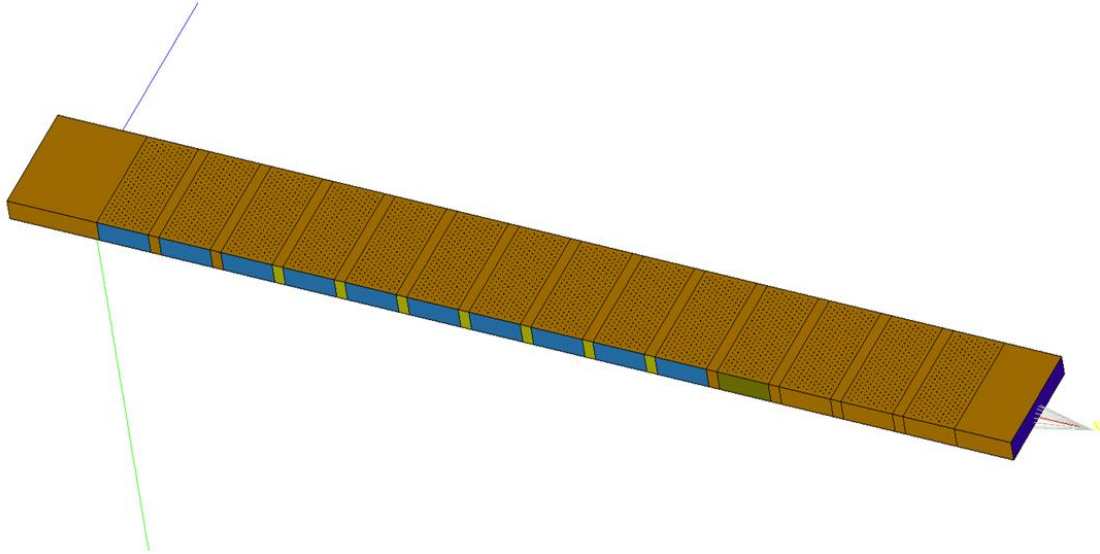
Obr. 6.10: Fluidní geometrie jedné strany pájecí pece

Než bude sestrojena výpočetní síť, je třeba definovat jednotlivé oblasti (regiony) podle jejich polohy a účelu v peci. Situaci ukazují následující Obr. 6.10, Obr. 6.11 a Obr. 6.12.



Obr. 6.11: Definice regionů pro simulaci

Pec má na vstupu i výstupu tzv. klidovou zónu, která slouží ke zlepšení stability pece při pájení pod dusíkem. Po vstupu následují zóny předehřevu, v daném případě 7x. Po nich následují tři púřtevovací zóny a chlazení. Chlazení je rozděleno na dvě sekce. První chladicí zóna je samostatná, protože v ní dochází jak k vřánění plynu do systému fluxmanagementu, tak i žene plyn vůči desce plošných spojů. Přitom je její teplota nastavena na ustálenou pro daný výrobek. Pokud se výroba zastaví, první chladicí zóna dohřívá na svoji typickou teplotu pro daný výrobek tak, aby další deska procházela pecí za naprosto stejných podmínek jako z vycházela ta poslední. Je to jeden ze základních pilířů opakovatelné výroby. Poslední tři chladicí zóny jsou už jen pro ochlazování, ke kterému se využívá plyn vyčištěný systémem fluxmanagementu.



Obr. 6.12: Výsledný pohled na přiřazené regiony

Popis jednotlivých regionů

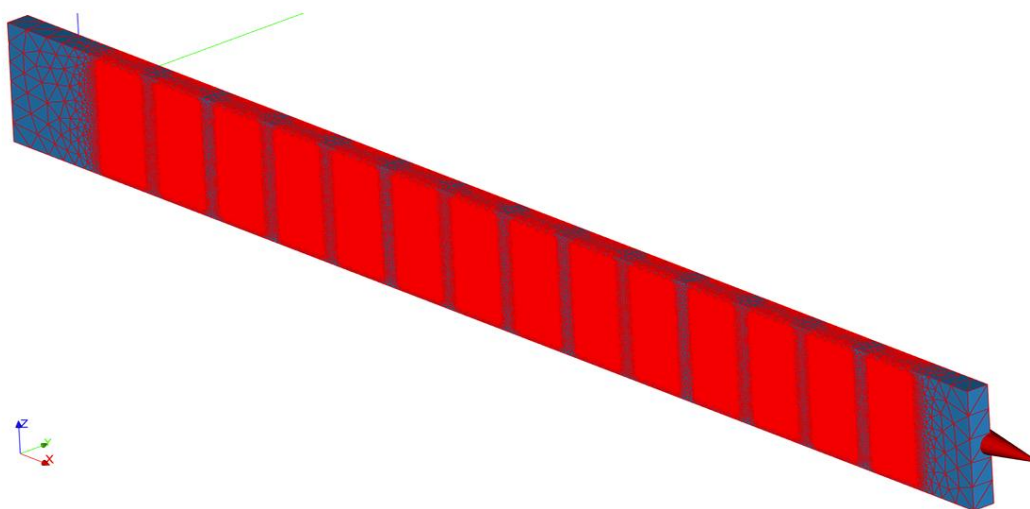
- **Outlet_x** popisuje vstup a výstup konvekční pece. Při provozu s dusíkem se uvnitř pece utváří mírný přetlak, který přes vstup a výstup uniká ven z pece. Tím je zabráněno vnikání vzduchu (kyslíku) do pece a udržení ochranné atmosféry.
- **Inlet_Y(-Y)** představuje oblasti, kde proudí horký vzduch v oblasti předehřevu
- **Outlet_Z(-Z)** je zjednodušeným zobrazením sací strany topných zón
- **Inlet_peak** ukazuje místo, kde proudí horký vzduch do přetavovací (peak) zóny
- **Inlet_cool1_Y** popisuje chladicí zónu č.1, která má vlastní separátní řízení (přechodová zóna)
- **Inlet_cool_Y** popisuje zbývající tři chladicí zóny, které foukají vzduch nasávaný v zóně 11
- **Outlet_cool_Z(-Z)** – nasávací prostor první chladicí zóny
- **Cool_suct_Y** – nasávání plynu (vzduchu) z poslední peak zóny
- **Inlet2_Y(-Y)** – zpětné vhánění vzduchu odsávaného v 1. chladicí zóně
- **Wall** – mezery mezi tryskovými deskami jsou pro výpočet definovány jako wall

Vytvoření výpočetní sítě

Síť byla vytvořena programem SALOME, který umí použít 3D výkresy ve formátu STEP, zjednoduší se tak vytváření sítě, protože lze použít existující výkresy. Pro síť navrhl program tři různé varianty - hrubou, střední a jemnou síť (Tab. 6.1). Liší se počtem elementů a tedy v důsledku i dobou výpočtů. Počet elementů zobrazuje následující Obr. 6.13. Z obrázku je také patrné, že použitá síť byla nestrukturovaná, tedy jednotlivé prvky nejsou stejné velikosti (Obr. 6.13).

Tab. 6.1: Konfigurace výpočetních sítí

	hrubá síť	střední síť	jemná síť
1D edges	32 151	33 566	36 253
2D faces	565 763	663 435	843 636
3D volumes	3 184 220	7 454 850	16 518 240



Obr. 6.13: Návrh výpočetní sítě

Pro síť byly použity čtyřstěny (tetraedry). Ty jsou velmi často použity právě u volně šířených programů pro simulaci. Jako lepší by byla varianta šestiúhelníkové sítě. Ta však v dané volné verzi programu nebyla k dispozici. Nevýhoda čtyřstěnu je v tom, že je potřeba více elementů než u jiných tvarů a zároveň poněkud hůře vyplňují daný prostor.

Solver a okrajové podmínky

Před započítím simulace je třeba vybrat patřičný solver (česky nazývaný řešič). Z Obr. 6.13 je vidět rozdělení zkoumaného prostoru do jednotlivých částí, regionů. Tyto regiony musí být následně definovány podle parametrů jako je rychlost proudění nebo tlakové poměry. Hrubý návrh obsahuje v podstatě tři základní typy oblastí - vstupy, výstupy a stěny (wall = mezera mezi zónami). Jejich název sám o sobě říká, co se na tom či kterém místě děje. Je potřeba vyjádřit rychlosti proudění v jednotlivých zónách. Prvním krokem je výpočet plochy otvorů, kudy plyn (vzduch, dusík) v peci (musí) proudit. Vycházíme z hodnot v Tab. 3.1. Následuje určení průtoku a rychlosti v sání zóny a na jejím výstupu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6.2.

Tab. 6.2: Objem a rychlost proudění v jednotlivých zónách pece [5]

Frekvence ventilátorů (Hz)	Objem plynu proudícího v zóně (m ³)	Rychlost proudění na desce trysek (m/s)	Rychlost proudění v oblasti sání zóny (m/s)
20	95	8,50	0,86
25	120	10,74	1,09
30	145	12,98	1,31
35	170	15,21	1,54
40	190	17,00	1,72
45	210	18,79	1,90
50	235	21,03	2,13
55	250	22,37	2,27
60	270	24,16	2,45

Pro další výpočty převezveme hodnoty pro objem plynu proudícího v zóně 170 m³ (zvýrazněná část Tab. 6.2), které odpovídají nejčastějšímu nastavení pájecí pece. Výpočet rychlosti v (m/s) se provede podle vztahu

$$v = \frac{R}{A}, \quad (6.16)$$

kde R je objemový proud (m³/s) a A (m²) je plocha, kterou prochází daný objem.

Tab. 6.3: Objem a rychlost proudění v jednotlivých zónách [5]

Funkce	Objem proudění (m³)	Oblast	Umístění na peci	Počet	Rychlost proudění (m/s)
Vhánění	-	-	-	-	-
Dusík (N ₂)	15,00	Peak zóna	nahoře/dole	6	0,224
N ₂ do izolace proc. komory	3,00	Peak zóna	nahoře/dole	6	0,045
Pyrolýza	70,00	Peak zóna	nahoře/dole	6	1,038
Peak celkem		Peak zóna	nahoře/dole	6	1,307
N ₂ do izolace proc. komory	3,00	Předehřev	nahoře/dole	14	0,019
Zpětný proud do Z2	50,00	Zóna 2	dole	1	4,475
Chladicí zóna	450,00	Chlazení	nahoře	3	13,424
Odsávání	-	-	-	-	-
Pyrolýza	70,00	Topná zóna	z boku	32	48,354
Chladicí zóna	500,00	Chlazení, Z11	dole	1	0,801

Pec dostává na vytvoření ochranné atmosféry cca 21 m³/h dusíku. Toto množství má za úkol vytvořit ochrannou atmosféru a zamezit (tím, že se vzniklý přetlak šíří na vstup a výstup pece) vniknutí vzduchu (kyslíku) do procesní komory. Dá se jednoduše zjistit, zda výše uvedené hodnoty proudění jsou správně. Rozdíl mezi nasáváním a odsáváním musí být uvedených 21 m³. Spočítají se hodnoty pro vhánění proudu plynu a použijí se hodnoty z Tab. 6.2 a Tab. 6.3.

.

.

Tab. 6.4: Hodnoty vhánění plynu do jednotlivých zón

Vhánění plynu celkem:	Rychlost (m/s)	Počet	Objemový proud (m ³ /h)
Přehřev			
Ventilátory	15,21	12	2 040,00
N2 Izolace proc. komory	0,02	12	2,57
	15,23	12	2 042,57
Zóna 2 nahoře	15,21	1	170,00
N2 Izolace proc. komory	0,02	1	0,21
Celkem	15,23	1	170,21
Zóna 2 dole	15,21	1	170,00
N2 Izolace proc. komory	0,02	1	0,21
Zpětný proud	4,48	1	50,00
Celkem	19,71	1	2 202,14
Peakzóna	15,21	6	1 020,00
N2	0,22	6	150,00
N2 Izolace proc. komory	0,04	6	3,00
Zpětný proud	1,04	6	69,60
Celkem	16,52	6	1 107,60
Chlazení Z11	15,21	1	170,00
Chlazení Z12 - Z14	13,42	3	450,00
Celkové vhánění			4 160,60

Z výsledků uvedených v Tab. 6.4 je patrné, že celkový objem vhaněného vzduchu v peci je 4 160,0 m³/h. Dalším výpočtem se dá zjistit objem vzduchu odsávaného v jednotlivých zónách - viz následující Tab. 6.5.

Tab. 6.5: Hodnoty odsávání v jednotlivých zónách

Odsávání celkem	Rychlost proudění (m/s)	Počet	Objemový proud (m ³ /h)
Topné zóny	1,54	20	3 400,00
Chlazení	0,77	2	170,00
Chlazení Z11	0,80	1	500,00
Pyrolýza	48,35	32	70,00
Celkem			4 140,00

Porovnáním výsledků uvedených v tabulkách (Tab. 6.4 a Tab. 6.5) se získá výsledný rozdíl.

$$4\,160,60\text{ m}^3/\text{h} - 4\,140,00\text{ m}^3/\text{h} = 20,60\text{ m}^3/\text{h} \quad (6.17)$$

Je tedy zřejmé, že výpočty objemového proudění jsou správné. Malý rozdíl 0,4 m³/h je způsoben zaokrouhlováním v předchozích propočtech.

Výběr solveru (řešiče)

Program OpenFOAM nabízí několik řešičů podle účelu, který má splňovat:

- Combustion
- Compressible
- HeatTransfer
- Incompressible
- DiscreteMethods
- Lagrangian
- Financial
- Multiphase
- Electromagnetics
- StressAnalysis

Pro zjednodušení výpočtů byla zvolena metoda "incompressible", veškeré výpočty se provádí při stabilní teplotě ve všech zónách. Zkoumané médium je nestlačitelné, platí-li podmínka, že Machovo číslo $Ma < 0,3$. Ve skutečnosti žádné nestlačitelné médium neexistuje, pro rychlejší výpočty je tak celá situace značně idealizovaná.

Machovo číslo Ma (-) se počítá jako poměr rychlosti zkoumaného média vůči rychlosti zvuku. Rychlost zvuku za teploty 20 °C je 343,3 m/s. Podle hodnot v Tab. 6.5 je nejvyšší hodnota rychlosti proudění 48,35 m/s.

$$Ma = \frac{48,35 \text{ m/s}}{343,3 \text{ m/s}} = 0,14 \quad (6.18)$$

Podmínka je tedy splněna i pro nejvyšší rychlost proudění ve zkoumané peci.

Pro vybranou kategorii média jsou k dispozici různé řešiče (solvery). Pro nestlačitelné médium to jsou

- AdjointShapeOpimizationFoam
- Boundary Foam
- icoFoam
- non NewtonianIcoFoam
- pimpleFoam
- pisoFoam
- shallowWaterFoam
- simpleFoam

Výběr možností je detailně popsán v příručce programu. Protože se jedná o stacionární proudění s velkým počtem zjednodušení, byla zvolena metoda "SimpleFoam". Jako turbulentní model byl zvolen RAS s k-epsilon modelem.

Výpočty Reynoldsova čísla (viz kapitola 5.5.1) prokázaly, že proudění ve zkoumané peci je turbulentní. Jako další krok je třeba spočítat hodnotu turbulentní energie k . Pro výpočet potřebujeme znát turbulentní intenzitu, kterou lze spočítat podle empirického vzorce

$$i = 0,16 \cdot Re^{-\frac{1}{8}} \quad (6.19)$$

S využitím výše uvedené rovnice spočítáme koeficienty k podle vzorce

$$k = \frac{1}{2} \cdot \left((\bar{v}_x \cdot i) + (\bar{v}_y \cdot i) + (\bar{v}_z \cdot i) \right) \quad (6.20)$$

Tab. 6.6: Reynoldsovo číslo, intenzita turbulence a koeficient k pro různé části pece

Oblast pece	Re (-)	i (-)	k (m ² /s ²)
Pole trysek předeřev	3963	0,0568	0,378
Předeřev, odsávání Z	3110	0,0585	0,402
Zóna 2 dole	5136	0,0550	0,591
Peak zóna	4305	0,0562	0,438
Chladicí zóny 12 - 14	3497	0,0577	0,304
Odsávání chl. zóna 11	1555	0,0638	0,473

K popisu disipace (přeměny energie malých vírů na teplo) je definován parametr ε . Podobně jako u jiných výpočtů v oblasti proudění je i tady použit empirický koeficient $c_\mu=0,09$.

Zde platí vzorec:

$$\varepsilon = \frac{c_\mu \cdot k^2}{v_t} \quad (6.21)$$

Pro kinematickou turbulentní viskozitu potom platí

$$v_t = \beta \cdot \nu \quad (6.22)$$

Poměr viskozit β je poměr turbulentní vůči laminární viskozitě a dá se spočítat i s pomocí Reynoldsova čísla, výsledkem je Tab. 6.7.

Tab. 6.7: Poměr turbulentní a laminární viskozity v závislosti na Reynoldsově čísle

Re	3 000	5 000	10 000	15 000	20 000
β (-)	11,6	16,5	26,7	34,0	50,1

Tabulka udává několik základních hodnot poměru viskozit, pro vyšší hodnoty Reynoldsova čísla jsou hodnoty odvoditelné aproximací, pro $Re = 100\,000$ je potom používaný koeficient $\beta \cong 100$

S využitím hodnot z Tab. 6.7 spočítáme příslušné hodnoty ε , a tím dostaneme hodnoty koeficientů turbulentního proudění (viz Tab. 6.8).

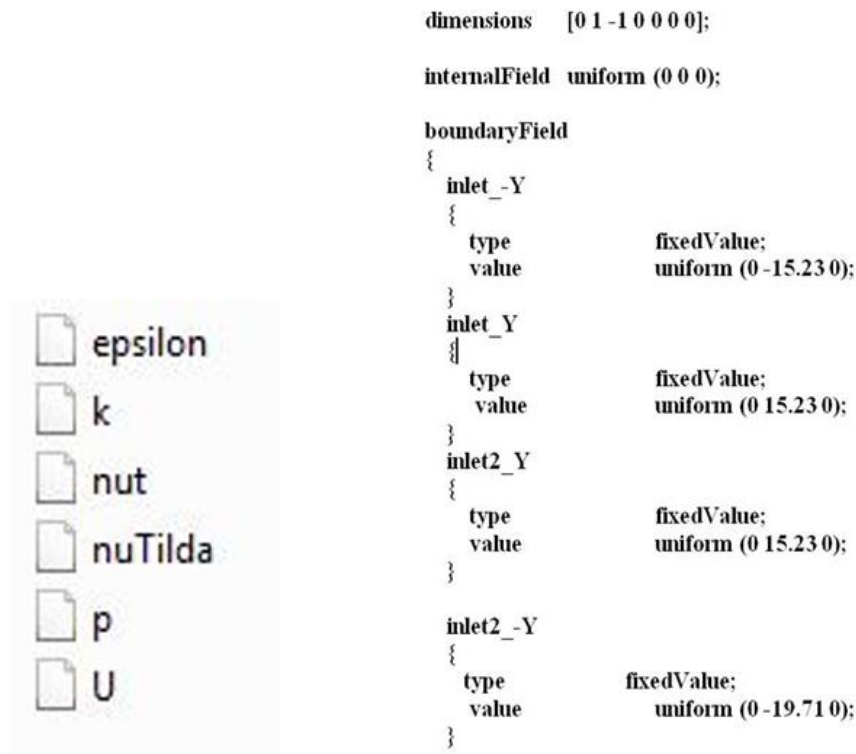
Tab. 6.8: Koeficienty turbulentního proudění

Oblast pece	β (-)	v_t (m ² /s)	ε (m ² /s ³)
Pole trysek předehřev	13,07	$2,01 \cdot 10^{-4}$	64,1
Předehřev, odsávání Z	12,03	$1,72 \cdot 10^{-4}$	84,4
Zóna 2 dole	16,95	$2,60 \cdot 10^{-4}$	121,2
Peak zóna	14,21	$2,18 \cdot 10^{-4}$	79,0
Chladicí zóny 12 - 14	13,5	$2,07 \cdot 10^{-4}$	40,1
Odsávání chl. zóna 11	-	-	-

Stanovení hraničních podmínek

Pro start solveru je nutné stanovit hraniční podmínky. Výše uvedené hodnoty rychlosti, tlaku, turbulentní kinetické energie k , disipace ε a viskozity je nutné vložit do příslušných skriptů, tzv. OpenFoam Dicts.

Jak může vypadat fyzikální nastavení solveru ukazuje následující Obr. 6.14.



Obr. 6.14: Nastavení OpenFoam Dict pro zóny Y

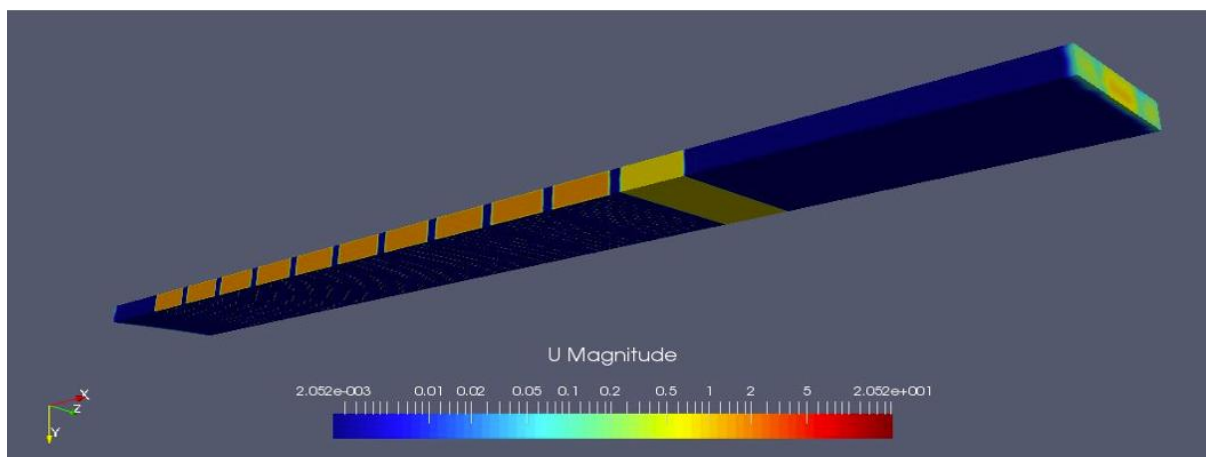
Na Obr. 6.14 je vidět příklad zadání hodnot z pro zóny Inlet_Y a Inlet2_Y, hodnoty se vybírají z Tab. 6.5.

Základní nastavení modelu simpleFoam je následující:

- stacionární
- start v čase 0
- čas ukončení 1.000
- delta T1
- interval zápisu 50
- lineární interpolace
- lineární gausovský gradient
- limitovaná Laplaceova pravidla
- tolerance $1 \cdot 10^{-6}$
- konvergence při toleranci $1 \cdot 10^{-5}$

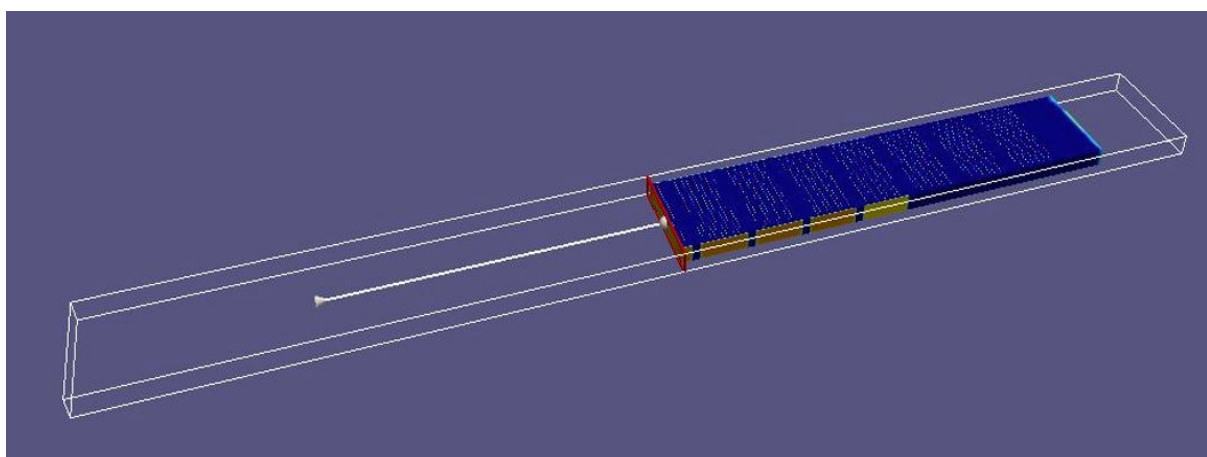
6.3 Grafické znázornění výsledků

Vyhodnocení je z větší části představeno řezy v jednotlivých rovinách. Je zahrnuta především střední část pece, protože se v ní nachází transportní systém, který nese výrobky (desky plošných spojů) a má tedy zásadní význam pro vlastní pájecí proces.



Obr. 6.15: Celkový pohled na výsledek simulace

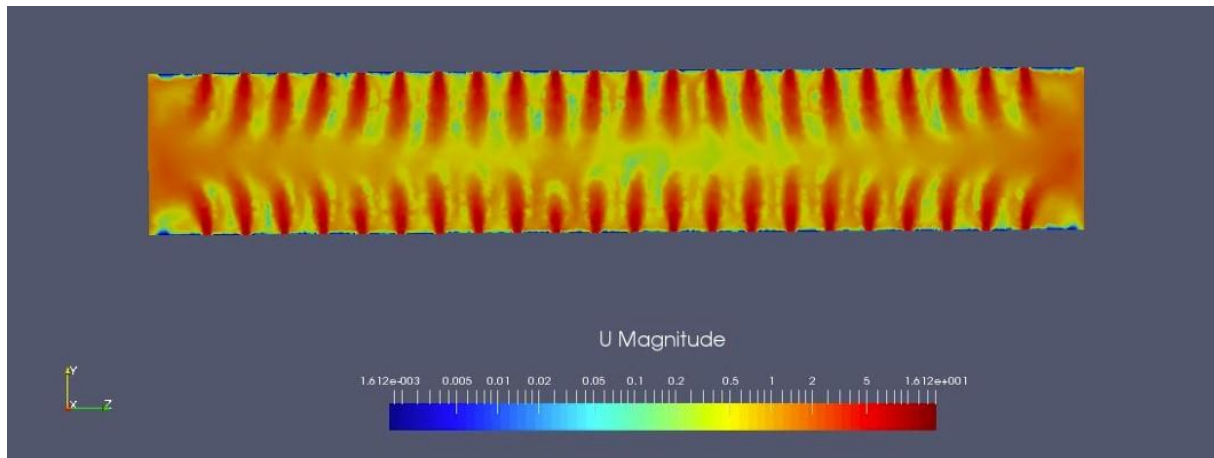
Na Obr. 6.15 je finální výsledek simulace. Barvy v obrázku odpovídají rychlosti proudění v dané zóně podle měřítká U Magnitude. Tmavě modré plochy mezi zónami jsou definovány jako zdi (walls) a mají rychlost proudění 0 m/s. Rychlosti proudění v ose Z a Y byly vypočítány ze známých hodnot ventilátorů a mechanické stavby pece. Proudění ve směru X je vypočítáno simulačním programem, protože bylo definováno jako Pressure outlet. Počítá s přetlakem, který v peci vzniká přetlakem uvnitř (vhánění dusíku). Aby bylo lépe vidět proudění uvnitř systému pece, jsou připojeny obrázky Obr. 6.16 a Obr. 6.17 znázorňující poměry v rovině Y–Z.



Obr. 6.16: Výsledek simulace – řez v rovině Y–Z

Byla zkoumána plocha ohraničená červenou čarou, směr pohledu je určen bílou čarou vedenou v ose X. Vlastní řez prochází středem topné zóny a zároveň děr, kterými se přenáší

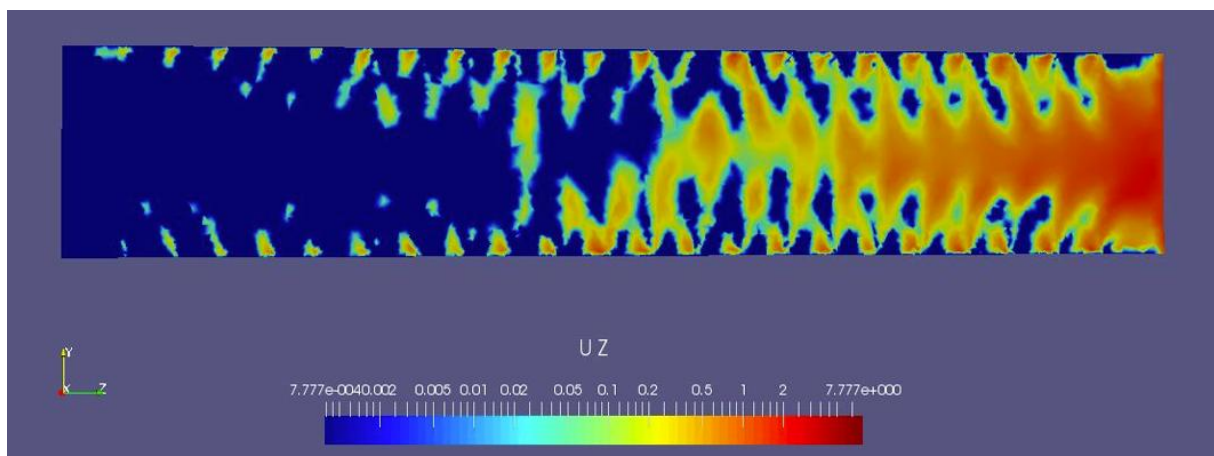
teplo z pájecí pece na výrobek. Na Obr. 6.17 je ukázán výsledek simulace proudění uprostřed topné zóny v rovině Y–Z.



Obr. 6.17: Proudění v rovině Y-Z

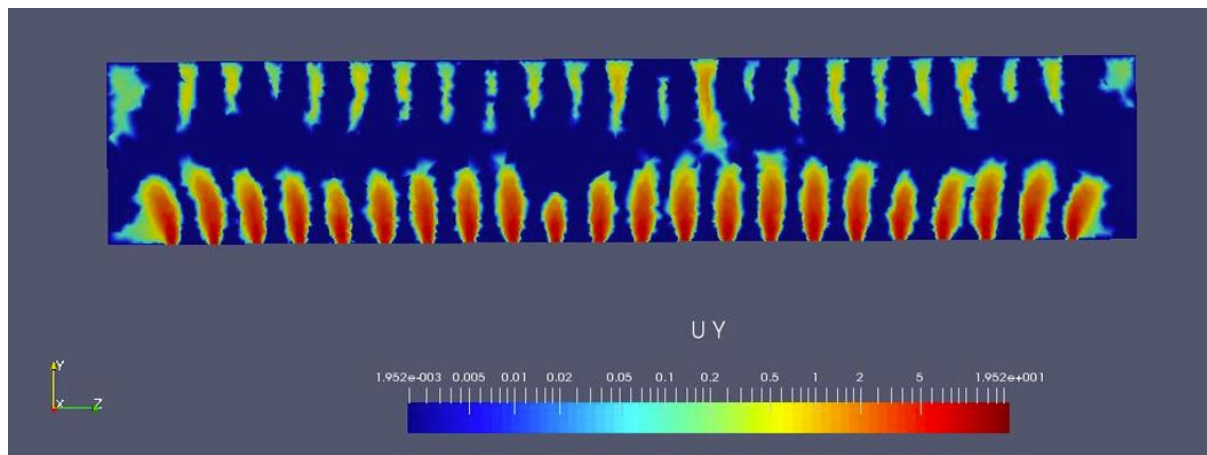
Obr. 6.17 znázorňuje průběh proudění v rovině napříč vůči směru pohybu DPS pecí. Je vidět proudění z pole trysek (soustava děr v hliníkové desce), které se postupně stáčí doleva nebo doprava podél toho, na kterou stranu je blíže k nasávacímu kanálu topné zóny. Z obrázku také vyplývá, že přesně uprostřed zóny je oblast klidnějšího proudění, kde rychlost proudu horkého plynu ve směru osy Y je menší než směrem k okrajům zóny.

Z tohoto stavu vyplývá důležitá otázka, zda zesílené proudění na okraji zóny nemá vliv na rovnoměrné rozdělení ohřevu DPS. Deska spojů nikdy nejezdí přesně středem pece, pevná strana transportu je v tomto případě vpravo (uvažujeme pec tzv. L–R). Mohlo by tak dojít k tomu, že pájené součástky budou vystaveny působení různých sil a teplot podle toho, kde jsou umístěny. Z barevného vyjádření rychlostí proudění vyplývá, že v oblasti transportu (místo pohybu DPS) se rychlost proudění pohybuje od 0,2 do 1,5 m/s. Protože Obr. 6.17 zobrazuje výslednou rychlost proudění ve všech směrech, nelze přesně určit jeho vliv v jednom určeném směru. K tomu je třeba vygenerovat obrázek proudění ve směru jedné osy, Z. V následujícím obrázku je zobrazeno jen proudění v kladném směru.



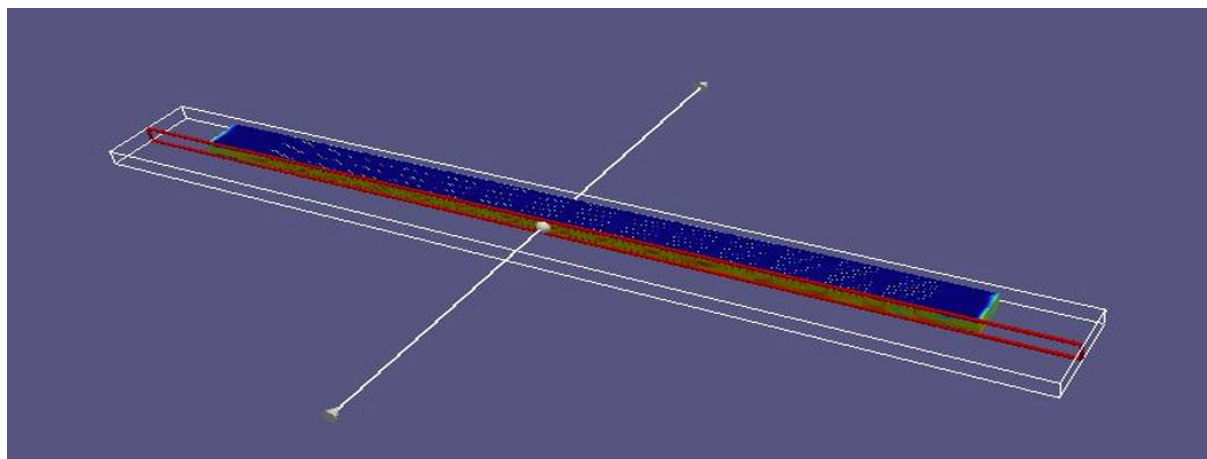
Obr. 6.18: Simulace rychlosti proudění ve směru osy Z

Obr. 6.18 ukazuje, že proudění ve směru osy Y přechází velice rychle v proudění ve směru osy Z. To ukazuje na rovnoměrné proudění v oblasti roviny transportu. Odsávání z vnější strany topné zóny způsobuje zrychlení proudění, které bude popsáno v další části práce. Z obrázku (Obr. 6.18) také vyplývá skutečnost, že modré plochy musí představovat proudění v dalších osách. Rychlost proudění se opět pohybuje v rozsahu od 0,2 do 1,5 m/s.



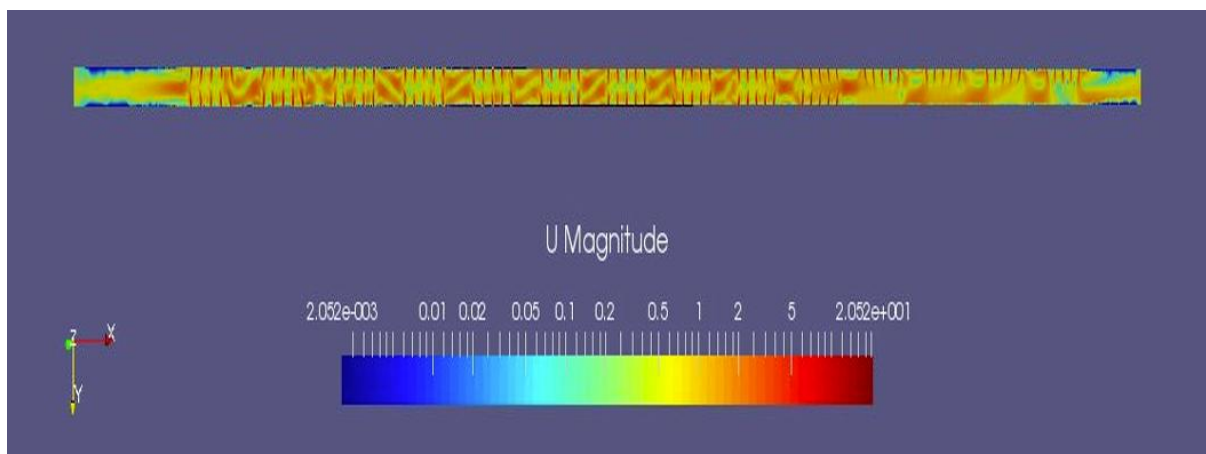
Obr. 6.19: Proudění ve směru osy Y

Jako protiklad k výše uvedenému obrázku (Obr. 6.18) je zobrazení rychlosti proudění ve směru osy Y na Obr. 6.19, které ukazuje, že uvnitř topné zóny jsou i místa, kde dochází k nárazovému proudění. Nárazová rychlost proudění se pohybuje v rozmezí 2 až 5 m/s. Právě tyto proudvé nárazy mohou být škodlivé ve smyslu posunuté součástky. Proto bude v dalším textu proveden zjednodušený výpočet sil, které na součástky působí.



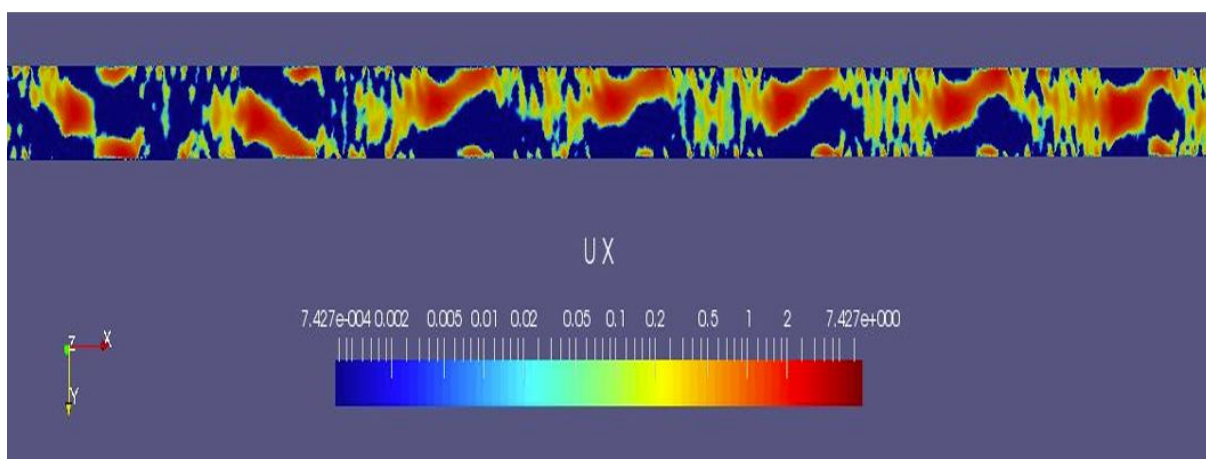
Obr. 6.20: Řez v rovině osy X ve směru osy Y

Obr. 6.20 ukazuje rovinu, ve které bude řešena následující simulace. Tato červeně orámovaná rovina prochází středem pece. Výsledný pohled je ve směru bílé šipky. Následující obrázek (Obr. 6.21) tedy ukáže průběh proudění v jednotlivých zónách v peci ve směru transportu. Simulace ukazuje poměry na vstupu a výstupu pece, kde dochází vlivem vnitřního přetlaku v peci k proudění ve směru vstup/výstup.



Obr. 6.21: Zobrazení proudění po celé délce pece v oblasti podélné osy

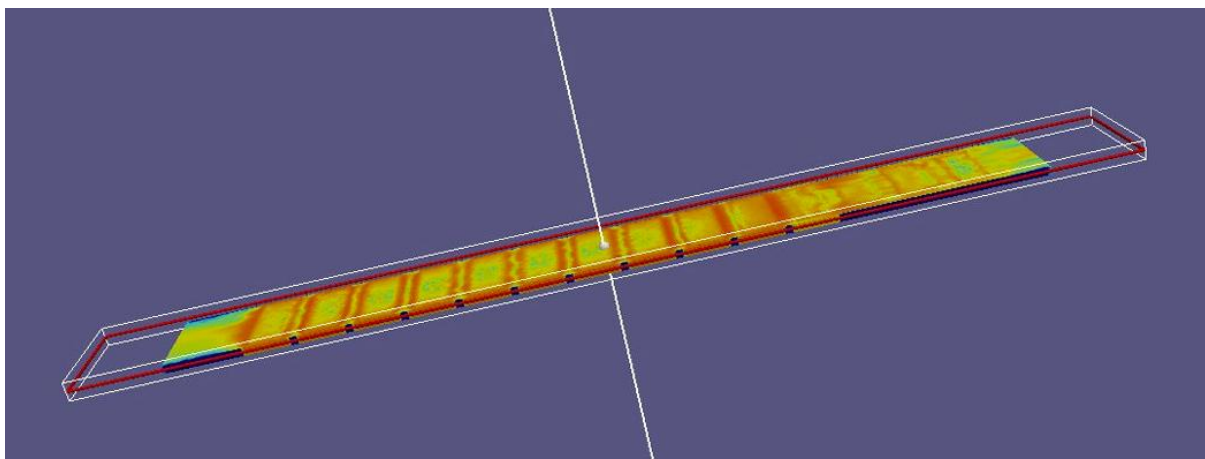
Z Obr. 6.21 je zřejmé, že proudění existuje i mezi jednotlivými zónami. Příčinou je především dodatečné vhánění dusíku do pece, které vytváří uvnitř mírný přetlak, který potom směřuje proudění ke vstupu a výstupu. Důsledkem toho je tepelné ovlivňování zón mezi sebou, které má vliv na výsledný teplotní profil. Nejsilnější vliv má na rozhraní přetavovací zóny a chladicí zóny, protože v první chladicí zóně probíhá intenzivní odsávání znečištěného plynu do čištění ve fluxmanagementu. Konstrukčními úpravami lze toto ovlivňování snížit a vylepšit tak separaci topných zón.



Obr. 6.22: Simulace proudění ve směru Y osy X

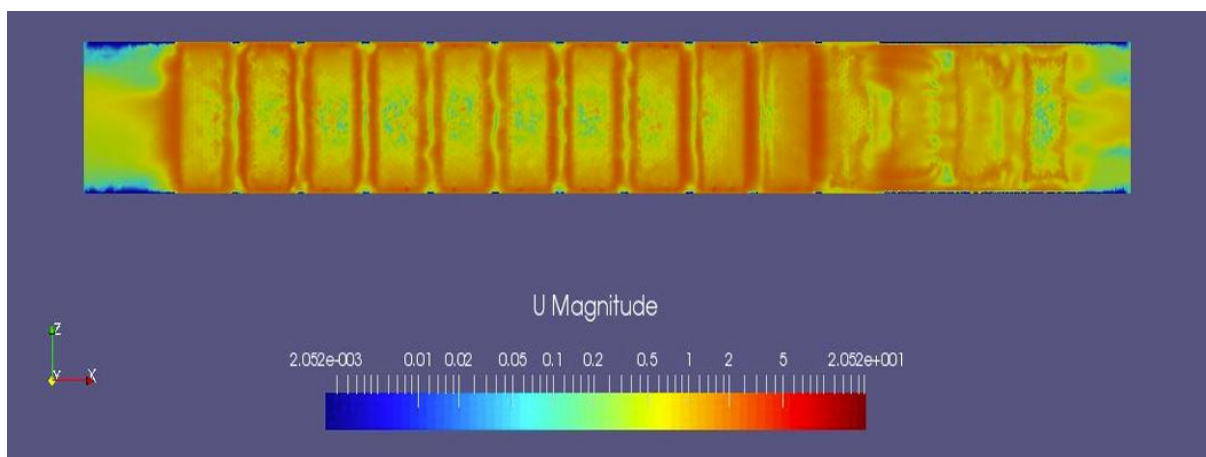
Jak je vidět z přiloženého Obr. 6.22 vznikají proudy horkého vzduchu mezi zónami. Protože v rámci simulace je zobrazen pouze jeden směr proudění, dá se předpokládat, že modře vyznačené plochy představují proudění v opačném směru. Je logické, že uvnitř pájecího zařízení není žádné místo, kde by proudění neexistovalo.

Desky plošných spojů prochází ve vodorovné rovině středem pece, proto následující Obr. 6.23 a Obr. 6.24 ukazují tento stav.



Obr. 6.23: Označení roviny pro další simulaci

I zde se jedná o simulaci prostoru ohraničeném červenou čarou při pohledu shora na topný systém pece. Jednotlivé zóny jsou jednoznačně určeny, je vidět, jak se vytváří proudění v rovině transportu. Jak již bylo uvedeno, vliv přísunu dusíku do pece způsobuje změnu tlakových podmínek a v konečném důsledku se to projeví prouděním na vstupu a výstupu pájecího zařízení. Je třeba při nastavování proudění velmi dbát na rovnoměrnost, protože jinak se to okamžitě projeví na zněčištění toho kterého prostoru, do kterého proudí větší objem plynu.

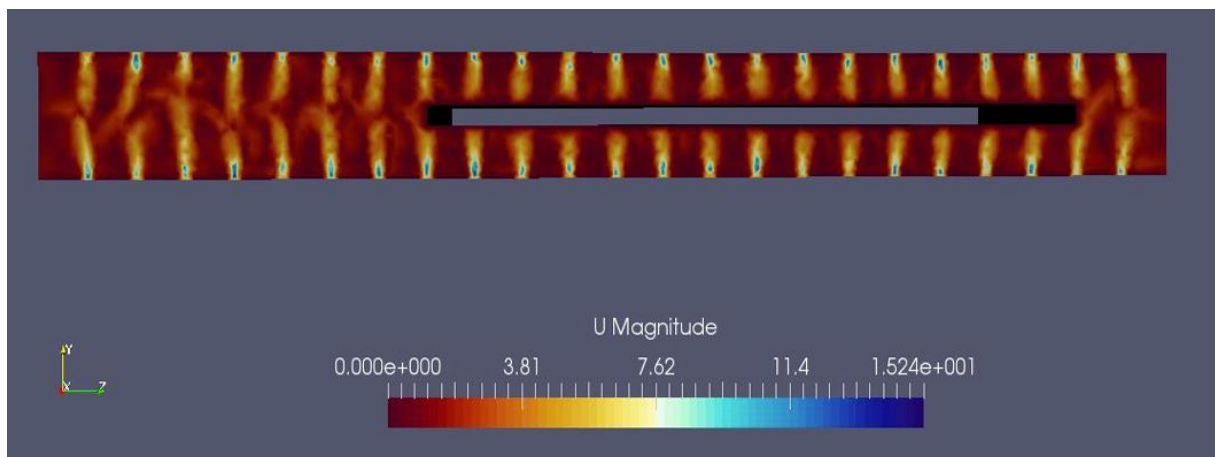


Obr. 6.24: Pohled na rovinu XY (pohled na pec shora)

6.4 Silové působení proudění na desku plošných spojů

Proudění v peci působí určitou silou na desku spojů (Obr. 6.25). Tuto sílu lze vypočítat z maximální rychlosti proudění. Pro zjednodušení výpočtu se vezme deska spojů běžně používané velikosti o ploše 0,10 m², což v rozměrech může být např. 0,35×0,29 m. Pro výpočet síly platí:

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot c_v \cdot A \cdot \rho \cdot w^2 \quad (6.23)$$



Obr. 6.25: Grafické znázornění silového působení na DPS uvnitř pájecí pece

Hodnoty pro vzduch se převezmou z Tab. 5.3, pro pravoúhloú desku platí $c_v=2,3$, max. rychlost bude 5 m/s. Výsledek dostáváme dosazením do rovnice (6.23).

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot 2,3 \cdot 0,1 \text{ m}^2 \cdot 1,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5^2 = 3,35 \text{ N} = 341,2 \text{ g} \quad (6.24)$$

Silovému působení v peci není vystavena jen deska spojů, ale i součástky. U těch se velmi důležité, aby působící síla neposouvala součástku mimo její polohu na desce spojů. Pájecí pasta vykazuje určitou lepivost, která musí součástku udržet na jejím místě. Zvláště součástky s velkou plochou a malými vývody jsou postiženy nebezpečím posunutí.

6.5 Tepelné rozdíly na desce plošných spojů

Pro přezkoumání, jaký vliv má na růst teploty na DPS rozdílná rychlost proudění se dají spočítat koeficienty přenosu tepla α_k pro dvě různé rychlosti proudění, 0,5 m/s a 1,5 m/s.

Pro výpočet koeficientu platí, za použití empirických koeficientů, přibližná rovnice

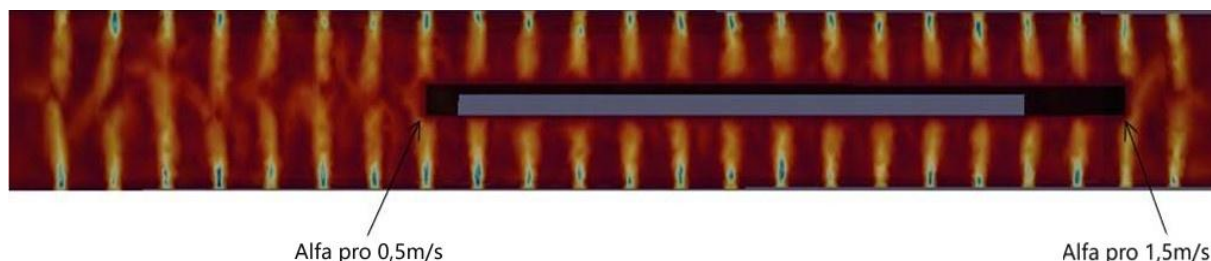
$$\alpha_k = 6,2 + 4,2 \cdot v \quad (6.25)$$

Dosažením výchozích hodnot rychlosti proudění se dostanou následující hodnoty

$$\alpha_k(0,5) = 6,2 + 4,2 \cdot 0,5 = 8,3 \quad (6.26)$$

$$\alpha_k(1,5) = 6,2 + 4,2 \cdot 1,5 = 11,9 \quad (6.27)$$

Výpočty potvrzují jednoznačně rozdílný koeficient ohřevu mezi levou a pravou stranou desky spojů, tedy v podstatě uprostřed pece a na jejím okraji u pevné strany transportu. S tím je třeba počítat při navrhování rozmístění termočlánků při kontrole teplotního profilu, resp. při jeho nastavování. V běžné praxi se pro nastavení maximální teploty používal empirický vzorec, který doporučoval 5 % přehřátí nad bod tavení (liquidus). Počítáno bylo od absolutní nuly. Tím se bez složitých výpočtů dá udělat první nástin teplotního profilu. V závislosti na hustotě součástek, jejich velikosti a množství je třeba poté nastavovaný průběh upřesnit. Velmi důležité je mít vytipované kritické součástky, které se podrobují detailnímu měření. Nejčastěji se situace řeší tak, že se kontroluje největší a nejmenší součástka, kvůli zjištění tepelného rozdílu ΔT . V praxi se při konvektivním ohřevu můžeme potkat s rozdíly až kolem 20 K. To je považováno u mnoha firem za hraniční hodnotu. Pro větší rozdíly se potom velmi dobře uplatní pájení s využitím kondenzace par Galdenu. Při praktickém testu bylo dosaženo $\Delta T_k = 21,5$ K v konvektivní peci, při přesunutí do zařízení kondenzačního pájení $\Delta T_p = 6,5$ K.



Obr. 6.26: Koeficienty přenosu tepla pro různé rychlosti proudění

Obr. 6.26 ukazuje výsledek simulace koeficientu přenosu tepla pro krajní polohy desky spojů uvnitř konvektivní pájecí pece. Vzhledem k fyzické stavbě pece je uprostřed zóny slabší proudění než na okraji, kde dochází ke zpětnému nasávání horkého plynu do topné zóny. To vyvolává změny v rovnoměrnosti ohřevu desky. Rozdíly teplot jsou největší v oblasti

předehřevu, při vyšších teplotách se pak rozdíl nepatrně snižuje. Situaci lze charakterizovat pomocí rovnice:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha_k \cdot (T_p - T_{pcb}), \quad (6.28)$$

kde \dot{Q} je tepelný tok (W), A plocha zkoumaného objektu, α_k koeficient přenosu tepla a T jsou příslušné teploty pece a desky spojů. Další výraz pro předávané teplo má tvar

$$\dot{Q} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (6.29)$$

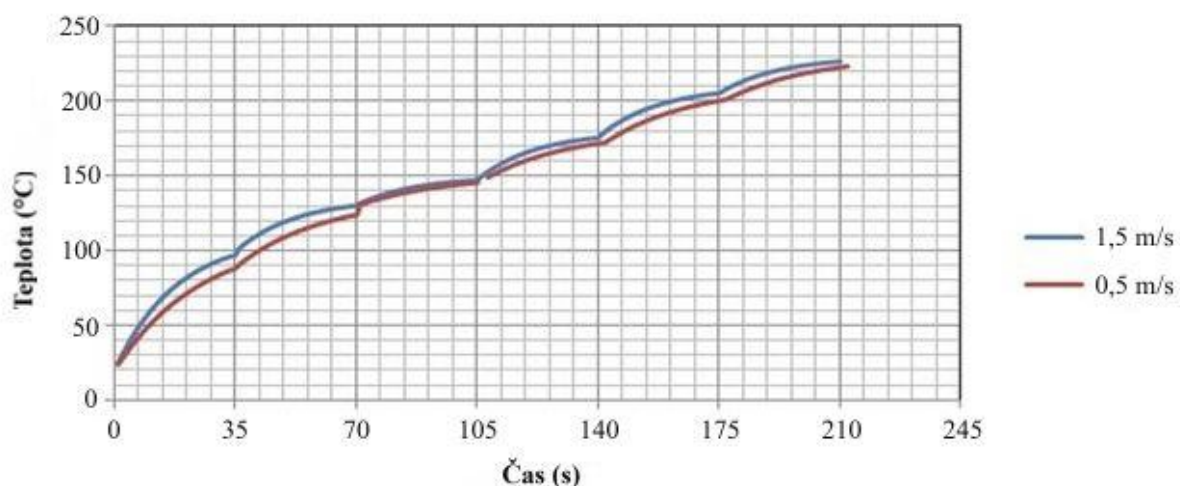
kde m je hmotnost měřeného objektu, c je specifická tepelná kapacita.

Protože předané/přijaté teplo musí být stejné, musí být obě rovnice také stejné. Po matematické úpravě se dostáváme k finálnímu tvaru jednoduché diferenciální rovnice

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A \cdot \alpha_k \cdot (T_p - T_{pcb})}{m \cdot c} \quad (6.30)$$

Jelikož v každé pájecí peci se teploty v průběhu pájení postupně zvyšují, byly zvoleny hodnoty pro prvních 6 zón - 110 °C, 135 °C, 150 °C, 180 °C, 210 °C a 230 °C. Bylo uvažováno s rychlostí 1 m/min, proto je časová osa rozdělena po 35 sekundách, které odpovídají průjezdu jednotlivými zónami (jedna zóna je dlouhá 35 cm).

V počáteční fázi při nízkých teplotách je rozdíl teploty mezi středem desky spojů a jejím pravým okrajem cca 10 K, při vyšších teplotách se potom snižuje na rozdíl 3–4 K. To je nutné vzít do úvahy při nastavování teplotního profilu. Výsledek zobrazuje Obr. 6.27.



Obr. 6.27: Propočet rozdílů teplot mezi levou a pravou stranou DPS

V praxi se tolerance teploty ve většině případů nastavuje na ± 5 K, takže nastavení není příliš kritické. Ovšem jsou i firmy, které interním předpisem stanoví toleranci ± 2 K. U takového nastavení už je potřeba velmi důkladně provádět prvotní měření a nastavení teplotního profilu.

6.6 Silové působení proudění na součástku

Pro názornou ukázkou silového působení na součástku na desce plošných spojů byl zvolen jako typický prvek elektrolytický kondenzátor o průměru $d = 1$ cm a výšce $h = 2$ cm. Jednoduchým výpočtem se dá spočítat plocha, která je vystavena působení proudění. Ta je tvořena jednak horní stranou válce kondenzátoru a dále plochou obvodové části.

$$A_k = \pi \cdot r^2 = 3,141592 \cdot 0,005^2 = 78,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (6.31)$$

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (6.32)$$

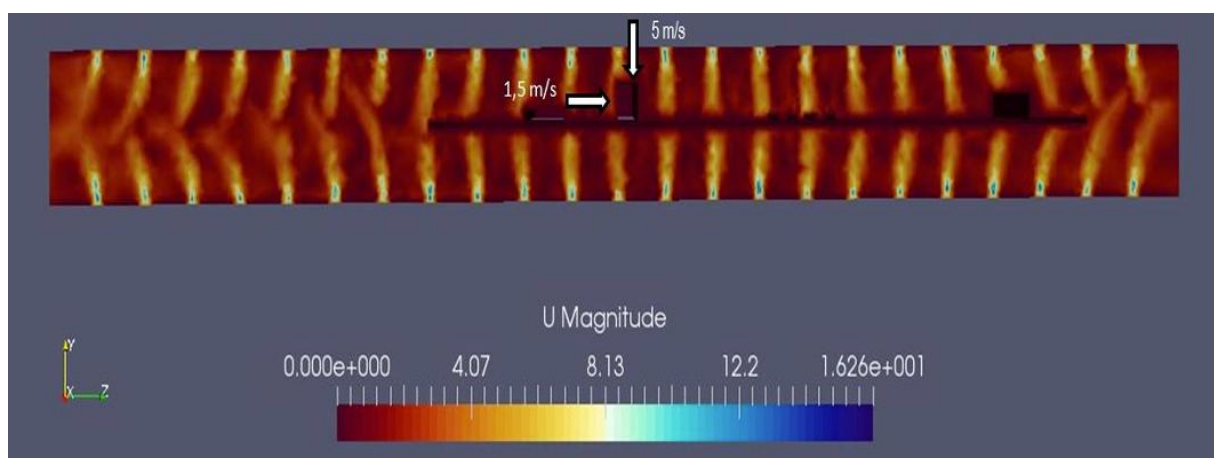
Sečtením obou hodnot se získá celková plocha vystavená proudění $6,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Zjednodušený výpočet vychází z maximálních spočtených hodnot, tedy v ose Z maximálně 1,5 m/s a v ose Y maximálně 5 m/s. Protože obě rychlosti (jejich vektory) jsou na sebe kolmé, dá se výsledná síla jednoduše spočítat z Pythagorovy věty

$$a^2 + b^2 = c^2 \rightarrow c = \sqrt{1,5^2 + 5^2} = 5,22 \text{ m/s} \quad (6.33)$$

Pro výpočet síly vycházíme z rovnice (6.23), hodnota koeficientu c_v pro válcové těleso $c_v=1,2$, po dosazení do rovnice se dojde k výsledné síle

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 6,36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,164 \cdot 5,22 = 0,121 \text{ N} = 12,33 \text{ g} \quad (6.34)$$



Obr. 6.28: Rychlost proudění působícího na součástku

Rychlost proudění působícího na součástku je znázorněno na Obr. 6.28. Z výsledku vyplývá, že součástka vlivem adheze pájecí pasty musí odolat síle minimálně 0,121 N, aby nedošlo k jejímu posunu.

7 Zhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praxi

Z grafů naměřených hodnot je vidět rozdíl mezi jednotlivými zařízeními, resp. lze rozeznat jednoznačný vliv mechanické konstrukce na rozdělení proudění té které pece. V žádném případě nelze kteroukoliv ze zkoumaných pájecích pecí označit jako nevyhovující či nefunkční. Je nutné ale brát ohled na jejich specifika a tomu přizpůsobit nastavení teplotních profilů. Samozřejmě při respektování specifických vlastností konkrétního výrobku.

U pece č. 1 je výrazným prvkem v grafech měření separace jednotlivých zón. Tím je na jedné straně zajištěna možnost nastavení velkého rozdílu teplot mezi zónami, především mezi poslední zónou předehřevu a první přetavovací (peak) zónou, na druhé straně může výrazná separace působit problémy při automatizovaném vyhodnocení profilu. Měření prokázalo, že i s termickou masou simulující součástky na měřicí desce dochází k poklesu teplot v oblasti mezi topnými zónami, v praxi se jedná až o 8–10 °C. Zvláště při přechodu na sedlovou část profilu nebo při přechodu přes liquidus neumí automatické systémy správně vzniklou situaci vyhodnotit. Jednou teplota přejde přes teplotu tavení, aby se po malé chvíli (např. 10 s) zase vrátila pod tuto teplotu. Automatický externí kontrolní systém to považuje za ukončení určité fáze profilu (např. parametr doba nad teplotou liquidu). Pokud následně teplota opět překročí liquidus, automatizovaný systém může dávat falešné výsledky. Grafy také ukazují velmi stabilní rovnoměrné proudění ve všech zónách, což svědčí o výborné konstrukci daného zařízení.

Pec č. 2 má velmi podobnou stavbu pole trysek jako pec č.1, průběh teploty i proudění však na rozdíl od první pece ukazuje podstatně hladší průběh křivky teploty a rovnoměrnější proudění. Z grafu teplotního profilu je vidět, že před přetavovací zónou vykazuje i tato pec zesílenou separaci zón mezi sebou. Tato skutečnost má pozitivní vliv na nastavování dané pece. Při větším rozdílu dochází následně k rychlejšímu ohřevu v oblasti přetavovací zóny a tím se sníží nebezpečí thombstoningu, tedy nezapájené, především dvouvývodové součástky. Mechanická stavba tryskového pole, kdy trysky jsou hustěji podél delší strany, tedy příčně vůči směru pohybu výrobků pecí, má pozitivní vliv na rovnoměrné proudění i v oblasti mezi zónami. Vyhodnocování takového profilu automatickým systémem potom probíhá velmi stabilně a jednoznačně. Největší problémy, které mohou nastat při posuzování průběhu teplotního profilu, kdy automatizovaný systém špatně vyhodnotí např. přechod přes teplotu liquidu, tak nemůže nastat (viz případ stroje č. 1).

Pec č. 3 je, jak bylo již napsáno, staršího provedení. Topné zóny s obdélníkovitými sloty vykazují násobně větší objem proudícího vzduchu, který ohřívá pájený výrobek, než u prvních dvou pecí. To má vliv na velmi rovnoměrné rozložení teplot uvnitř pece a tím pádem velmi příznivý vliv na pájecí profil. Zde je ale nutné při nastavování s touto odlišností počítat, jinak může docházet (a při benchmarkingových testech s jednotným předpisem nastavení) k posunu součástek na desce plošných spojů, resp. na skleněné dece, na které se tato vlastnost testovala. Jednou z dalších výhod třetí pece je použití axiálních ventilátorů, které jsou tišší než radiální, použité u zbývajících dvou pecí. Z měření vyplývá, že i starší zařízení dokáže splnit současné požadavky na kvalitní pájecí proces.

Z dosažených výsledků lze učinit následující závěry a doporučení:

- z pohledu přenosu tepla se jeví jako výhodné řešení s obdélníkovými sloty, jako u pece č. 3. To lze zdůvodnit velkým množstvím proudícího plynu (vzduchu, dusíku), které zlepšuje přenos tepla na výrobek.
- u tohoto řešení je nutné výrazně dbát na přesné nastavení teplotního profilu z důvodu zmenšeného procesního okna
- řešení trysek s tak zvanými obdélníkovými (Y) sloty vytváří předpoklad pro lepší přenos tepla na výrobek, avšak je náročnější na lidskou práci (montáž tryskového pole)

Pokud vezmeme do úvahy ekonomické hledisko dané požadavky dnešní doby, jež jsou zaměřeny na snižování výrobních nákladů, pak je zřejmé, že volba konstrukčního uspořádání je vždy určitým kompromisem mezi technickými nároky a ekonomickými požadavky. Bez komentáře snad lze ponechat skutečnost, že pec č. 3, jež vytváří tepelné pole prostřednictvím Y slotů je v provozu více než 10 let a bylo na ní zapájena více než jedna miliarda výrobků bez zjevných reklamací. Vzhledem k poměrně vysokým nákladům na energii v současné době se zákazníci budou při pořizování nové výrobní technologie zcela jistě orientovat i podle spotřeby, protože tvoří nemalou část výrobních nákladů. Probíhají úpravy např. v zesílení izolace pecí, což umožňuje úsporu kolem 20 %. Takové řešení má ale i svá úskalí. Na straně jedné zabezpečí velmi stabilní tepelné podmínky a úsporu nákladů za energii, na straně druhé jakýkoliv přechod např. z pájecího na lepicí profil (obecně z „teplejšího na chladnější“ profil), tedy snížení teploty, znamená prodloužení času přechodu, protože lépe zaizolovaná pec lépe „drží“ teplotu. To je pochopitelně ztrátový čas. Je tedy třeba více dbát na správný výběr technologických zařízení pro výrobu, vždy v souladu s konkrétním výrobkem. U velkých korporací, které vyrábějí na jedné lince třeba jen jeden typ výrobku ve statisícových nebo dokonce milionových počtech, je to velkým přínosem. U výroby, kdy dochází k častému střídání výrobků na dané lince je potom vždy otázkou kompromisu, co je ekonomicky výhodnější – vyšší náklady na energii nebo větší objem výroby.

V neposlední řadě je významným prvkem v úsporách energií zcela jistě otázka účinnosti přenosu tepla na výrobek. Popsané a prakticky otestované měřicí zařízení může být významným pomocníkem jak pro konstruktéra v okamžiku návrhu nového stroje, tak i pro uživatele (výrobní firmu) pro posouzení vhodnosti stroje pro konkrétní výrobek, resp. jeho pájení. Průběh rychlosti proudění v procesní komoře pájecí pece může být jedním z kritérií při volbě budoucích konfigurací linek, spolu s dalšími měřeními, která mohou pomoci rozhodnout o nákupu konkrétního stroje. To je velmi důležité, protože investice do nových strojů jsou finančně velmi náročné a proto je třeba zvolit optimální stroj pro danou výrobu.

Popsaná metoda včetně zařízení už byla použita firmou vyrábějící elektroniku k posouzení nové pece, zařazené do benchmarkingu.

8 Závěr

I když měření proudění se dnes může zdát z obecného pohledu jako jednoduchá fyzikální záležitost, v případě konstrukce pecí pro pájení přetavením je tato situace mnohem komplikovanější. Co je podstatné, je skutečnost, že přímo může výrazným způsobem ovlivnit kvalitu pájených spojů. Důvodem, proč se touto problematikou zabývat z pohledu procesu pájení přetavením, jsou jak vyšší požadované teploty přetavení zmenšující procesní okno pájecího procesu, tak stále rostoucí požadavky na homogenní rozložení teploty uvnitř pece z důvodu rostoucí hustoty součástek na deskách plošných spojů. Nárůst teplot v pájecím procesu po přechodu na bezolovnaté pájky znamená především zvýšení spotřeby energie těchto zařízení. Obzvláště v dnešní době, kdy ceny energií prudce stouply, je každý ušetřený kilowatt výhodou. Obvykle jsou výrobní linky v provozu 24/7, tedy 24 hodin denně, 7 dní v týdnu. Úspory za celý rok mohou potom představovat významnou částku. S narůstajícím počtem výrobních linek se benefit násobí (není výjimkou, že firma má 15–20 linek).

Ve výrobě elektroniky je zřetelný trend provádět vše, pokud možno, v jednom výrobním kroku. Některé dříve používané metody pájení už se dnes nepoužívají, např. pájení vlnou, nebo jen v omezené míře. Vlnu dnes nahrazuje metoda tzv. Pin-in-paste. Na desku spojů se nanese pájecí pasta přes stupňovitou šablonu, která umožní přizpůsobit množství nanesené pasty danému pájecímu bodu. Drátové součástky, upravené pro automatizované osazování, jsou potom osazeny společně s SMT součástkami a zapájeny na jeden průchod pájecí pecí. Ušetří se jednak čas, jednak náklady. O peníze jde vždy až v první řadě. To ovšem vede k tomu, že konstruktéři velmi často kombinují velké a malé součástky na jedné desce v těsné blízkosti. Potom je velmi náročné nastavení procesních parametrů tak, aby velké součástky (relé, cívky apod.) byly zapájeny a malé součástky v jejich blízkosti nebyly přehřáté nebo dokonce poškozené teplem.

Kritické jsou např. elektrolytické kondenzátory, které jsou citlivé na přehřátí, které může způsobovat zkrácení jejich životnosti. Celý problém tkví ve skutečnosti, že elektrolyt, použitý v kondenzátorech, má nižší teplotu bodu varu než jsou používané maximální teploty v peci. Dojde tak k určitému úniku páry elektrolytu. Potom závisí na kvalitě použitých materiálů a kvalitě výroby kondenzátorů, zda budou poté ještě dostatečně těsné a nebudou neúměrně rychle vysychat, což v praxi znamená snižování kapacity nebo, v nejhorším případě, zkrat. S nárůstem teplot souvisí i energetická náročnost současných výrobních technologií. I proto je třeba věnovat rozložení teploty z pohledu konstrukce pecí neustálou pozornost a na základě nově získaných poznatků konstrukci nových pecí inovovat.

Nová metoda měření tepelných polí v průtahových pecích, popsaná v této práci, je zaměřena na měření a optimalizaci návrhu rozložení a uspořádání topných zón v průtahové peci, včetně různých provedení trysek, kterými proudí tepelná energie k pájenému výrobku. Optimalizace pecí umožní snížení spotřeby energií při zachování správných procesních parametrů. Dosažené výsledky tak vytváří předpoklady pro inovativní kroky v konstrukci pecí, a tím i další zlepšování procesu pájení přetavením na základě dosažení optimalizovaného tepelného pole v přetavovací peci.

Významná je také možnost přímého porovnání pecí různých výrobců v rámci benchmarkingu. Popsaný měřicí systém byl již pro tuto činnost aplikován v rámci recipročního využití Firma, která umožnila měření na různých typech pecí má výsledky k dispozici a v budoucnu při hledání nových technologií bude měřicí systém sloužit k porovnání nových strojů v rámci benchmarkingových testů.

Postupný přechod na používání EC motorů v pájecích pecích umožňuje ještě lépe nastavit teplotní profil. Teoreticky lze nastavit proudění i teplotu v každé zóně naprosto individuálně. V praxi to ale není tak jednoznačné, protože, jak bylo již zmíněno, musí uvnitř pece fungovat mírný přetlak, který se od středu pece postupně přesouvá ke vstupu a výstupu, kde brání vnikání vzduchu (kyslíku) dovnitř pece. Celé nastavení je tedy možné změnit, ale musí být zachováno nastavení směru vnitřního proudění. Základní nastavení lze provést s použitou měřicí deskou, která díky tepelné odolnosti použitého materiálu, umožní opakovaná měření bez nebezpečí poškození teplem. Pro komplexní výrobky ale stejně zůstává nutnost preparace skutečného výrobku pomocí termočlánků na kritických součástkách a změření reálného průběhu teplot. Pokud je profilování předem nastaveno, jde přesné nastavení profilu udělat na menší počet měření. To je poměrně velká výhoda, protože běžná deska plošných spojů z materiálu FR4 nevydrží vcelký počet opakovaných měření, postupně dojde k jejímu zničení (změna barvy, delaminace).

Podle specifikace některých past je vyžadován velký rozdíl mezi teplotou posledního přehřevu a přetavovací zóny. Na straně druhé ale může v hraničním případě dojít k překonání liquidu, vzápětí návrat k solidu a to může působit velké potíže vyhodnocovacím on-line programům, které, vzhledem k jejich stáří, si s tím nedokáží poradit. Vznikají potom neshody v rámci auditu. Určitě budou mít velkou budoucnost nové programy, fungující na bázi umělé inteligence (AI) ve spolupráci s programy pro rozšířenou realitu. Ty zabezpečí interaktivní pohled do nitra pájecího zařízení za provozu. První pokusy v tomto směru už byly podniknuty a představeny na světových výstavách. Jednoznačně je to trend budoucnosti, nejen v souvislosti se zaváděním procesu Industry 4.0.

Kapitola 6 věnovaná simulaci, je náznakem, jak řešit případné další zkoumání proudění v průtahových pecích. Jak bylo naznačeno, existuje řada různých programů, které se liší jak rozsahem technických možností, tak i s tím souvisejícími pořizovacími náklady. S ohledem na složitost zadávání vstupních parametrů, které se vzájemně ovlivňují, by bylo vhodné zvolit některý z profesionálních programů jako např. ANSYS nebo SolidWorks apod. To lze považovat za další etapu tohoto výzkumu, může to být tématem následné vědecké práce.

Práce ukázala, že idea měření proudění za provozních podmínek je proveditelná a dává poměrně přesné výsledky (i ve srovnání se simulací). Pro další vývoj zkoumání proudění a přenosu tepla by bylo vhodné rozšířit měřicí systém. Systém je v dané konfiguraci schopen zaznamenávat až 6 analogových a 4 digitální kanály, nabízí se tedy možnost rozšíření až na 6 čidel proudění a 4 teplotní čidla. Dal by se takto snímat celý prostor pece najednou a vytvořit tak vnitřní "mapu" proudění.

9 Literatura

- [1] LEA, C., *A Scientific Guide to Surface Mount Technology*. Electrochemical Publications Limited. 1988 ISBN 901150 22 3.
- [2] ILKOVIČ, D., *Fyzika*. Bratislava, 1958, SNTL Praha.
- [3] BELL, H., 2012 *Fundamentals of reflow soldering, part 1, Fundamentals of materials technology in the field of soldering*, Rehm Thermal Systems, Germany, 2010, interní publikace firmy Rehm Thermal Systems GmbH
- [4] BELL, H., 2012 *Fundamentals of reflow soldering, part 2, Reflow soldering methods*, Rehm Thermal Systems, Germany, interní publikace firmy Rehm Thermal Systems GmbH
- [5] REHM THERMAL SYSTEMS GMBH, Blauberen, Germany, 2018 *Internal presentations and measuring results*,
- [6] BARBIN, D. F., NEVES FILHO, L. C., SILVEIRA JÚNIOR, V.: *Convective heat transfer coefficients evaluation for a portable forced air tunnel*, Applied Thermal Engineering, 30 str. 229–233.
Dostupné z DOI:10.1016/j.applthermaleng.2009.08.009
- [7] HELLER INDUSTRIES, 2023, January 17., *Flux Management*, Florham Park, New Jersey, USA,
- [8] SYNKIEWICZ, B., K., SKWAREK, A., WITEK, K., *Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering*, Soldering & Surface Mount Technology, 2014, ISSN: 0954-0911
- [9] GECZY, A., ILLES, B., DARNAI, T., 2015. *Investigating condensation heat transfer during vapour phase soldering on round-shaped PCB plates*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 86, July 2015, strana 639-647
Dostupné z DOI:10.1016/j.rineng.2025.104414
- [10] ILLÉS, B., HARSÁNYI, G., *Investigating direction characteristics of the heat transfer coefficient in forced convection reflow oven*, Experimental Thermal and Fluid, Science 33 (2009) 642–650.
Dostupné z: DOI:10.1016/j.expthermflusci.2009.01.001
- [11] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. a WALKER, J., *Fundamental of Physics*. 4.vydání J.Wiley&Sons. 2001 ISBN 214-1868-0.
- [12] HORÁK, Z., KRUPKA, F: *Fyzika*, SNTL/ALFA, 1981
- [13] BILEN, K., CETIN, M., GUL, H., BALTA, T.: *The investigation of groove geometry effect on heat transfer for internally grooved tubes*, Applied Thermal Engineering, Volume 29, Issue 4, March 2009, strany 753-761, Dostupné z DOI:10.1016/j.applthermaleng.2008.04.008

- [14] ILLÉS,P., HARSÁNYI,G.: *Thermal Characterization of Solid Structures during Forced Convection Heating*, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2011,, Dostupné z DOI: 10.5772/13516
- [15] SZENDIUCH, I.: *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*, VUT IUM 2006, ISBN 80-214-3292-6
- [16] CASTELL, A., SOLÉ, C., MEDRANO, M., ROCA, J., CABEZA, L.F., GARCÍA, D. *Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins*, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1676–1686. Dostupné z DOI 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.004
- [17] GAO, Y., TSE, S., MAK, H., *An active coolant cooling system for applications in surface grinding*, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 523–537 Dostupné z DOI 10.1016/S1359-4311(02)00214-4
- [18] KATZ, D, M.: *Physics for Scientists and Engineers*, US Naval Academy, Cengage Learning, Inc, 2015, ISBN 9780534466855
- [19] <https://www.azosensors.com/article.aspx,ArticleID=26/>
- [20] https://www.ist-g.com/sites/default/files/DFFS74W_E.pdf Datový list
- [21] HWANG,J.,S,: *Environment-Friendly Electronics: Lead-Free Technology*, Electrochemical Publications LTD, Isle of Man, British Isles, 2001, ISBN 0901150 40 1
- [22] <https://www.environmental-expert.com/products/ist-ag-model-fs74w-gas-flow-sensors-570128>
- [23] BLEJCHAR, TOMÁŠ, *Turbulence, Modelování proudění - CFX*, první vydání 2010, studijní text, VŠB Ostrava, ISBN 978-80-248-2606-6
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model
- [25] ŽELEZNÝ ZDENĚK, *Diferenciální rovnice 1. řádu --- Sbíрка řešených příkladů. Č. Bud.*, 2012. diplomová práce (Mgr.). Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích. Pedagogická fakulta
- [26] SOBOLEWSKI, MACIEJ, *Charakterystyka spoin lutowniczych w montazu komponentów elektronicznych duzej mocy uzyskanych z wykorzystaniem nowych stopów bezolowiowych*, Rozprawa doktorska, ISBN 978-83-60768-95-2
- [27] ACCEPTABILITY OF ELECTRONIC ASSEMBLIES, *IPC-A-610J*, Apr 8 2024, Developed by IPC, Association Conecting Electronics Industries
- [28] REFLOW SOLDERING,: *Apparatus and Heat Transfer Processes*, Elsevier, July 2020, ISBN 9780128185056
- [29] INOUE, M., KOYANAGAWA, T.: *Thermal Simulation for Predicting Substrate Temperature during Reflow Soldering Process*, IEEE Proceedings of 55th Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, Florida, 2005, pp.1021-1026. Dostupné z DOI: 10.1109/ECTC.2005.1441396

- [30] SZENDIUCH, I.: *Pouzdrění v mikroelektronice*. VUT Brno, Novpress, 2016, 379 s., ISBN 80-214-5417-0
- [31] <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/2006.htm>
- [32] JANALÍK, J.: *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*, skripta VŠB Ostrava, 2008

10 Seznam vlastních publikací

- [33] HURBAN, M., SZENDIUCH, I.; *Reflow Soldering in Vapour Phase Systems*. In 2nd IMAPS flash conference 2016. 1. Brno: Novpress s.r.o., 2016. s. 42-43. ISBN: 978-80-214-5416- 3.
- [34] HURBAN, M., SZENDIUCH, I.; *Gas flow and heat transfer in reflow oven*. In 3rd IMAPS flash conference 2017. 1. Brno: Novpress s.r.o., 2017. s. 86-87. ISBN: 978-80-214-5535-1.
- [35] HURBAN, M., SZENDIUCH, I., HEJÁTKOVÁ, E.; *Gas flow and heat transfer in reflow oven*. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Zlatibor, Serbia: IEEE Computer Society, 2018. s. 254-256. ISSN: 2161-2536. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2018.8443763>
- [36] SZENDIUCH, I., HURBAN, M., SKÁCEL, J., HEJÁTKOVÁ, E.; *Eco-label and Self Environmental Claims in Electronics*. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018). International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE). Zlatibor, Serbia: IEEE Computer Society, 2018. s. 251-256. ISBN: 9781538657300. ISSN: 2161-2536. Dostupné z DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443765
- [37] HURBAN, M., SZENDIUCH, I. *Digitalisation and networking in “smart” production”*. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>, 2018, roč. 12, č. 1, s 16-18. ISSN: 1802-4564.
- [38] SZENDIUCH, I.; HURBAN, M. *Measurement of gas flow in reflow oven*. In 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE). Wrocław, Poland: IEEE Computer Society, 2019. s. 151-154. ISBN: 9781538657300. ISSN: 2161-2536. Dostupné z DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810150
- [39] SZENDIUCH, I.; HEJÁTKOVÁ, E.; HURBAN, M.; SKÁCEL, J. *Ecolabeling of Electronics Products – what is new and what next?*. In Electronics Technology (ISSE), 2020 43rd International Spring Seminar. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE). Košice, slovensko: IEEE Computer Society, 2020. s. 151-154.: ISBN: 9781538657300. ISSN: 2161-2536. Dostupné z DOI: 10.1109/ISSE49702.2020.9120964
- [40] HURBAN, M., SZENDIUCH, I. *Optimizing of gas flow and heat transfer in reflow oven*, International Spring Seminar on Electronics 2022, Wien, Dostupné z DOI: 10.1109/ISSE54558.2022.9812804

- [41] HURBAN, M.; SZENDIUCH, I. *Smart sensors, another foundation for Industry 4.0*. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>. Plzen: 2019. s. 1-2. ISSN: 1802-4564.
- [42] HURBAN, M.; SZENDIUCH, I. *Vliv koeficientu přenosu tepla na pájení přetavením*. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>. Plzen: 2021. s. 1-3. ISSN: 1802-4564.
- [43] HURBAN, M., SZENDIUCH I., *Pros and cons of soldering with nitrogen*, IMAPS flash conference , 2023, ISBN 978-80-214-6185-7, strana 48-49
- [44] HURBAN, M., SZENDIUCH I., *Vapourphase soldering*, IMAPS flash conference, 2024, ISBN 978-80-214-6279-3, strana 56-57
- [45] HURBAN, M., SZENDIUCH, I., *A new approach to measuring the temperature fields in reflow ovens*, Journal of Electrical Engineering, Vol. 76, No. 2, 2025, pp. 164-169

11 Použité zkratky a symboly

Název	Význam	Jednotka
\vec{v}	vektor rychlosti	m/s
ρ	hustota	kg/m ³
\vec{F}	vektor síly	N
R	objemový proud	m ³ /s
\dot{m}	hmotnostní proud	kg/s
A	plocha	m ²
T	teplota	K
M	hmotnost	kg
Z	výška	m
P	tlak	Pa
G	gravitační zrychlení	9,81 m/s ²
T	čas, časové rozpětí	s
V	objem	m ³
V	specifický objem	m ³ /kg
v	rychlost	m/s
ν	kinematická viskozita	m ² /s
η	dynamická viskozita	kg/m·s
D	průměr, specifický rozměr	mm, cm, m
L	délka	mm, cm, m
B	šířka	mm, cm, m
ϑ	teplota	°C
F	síla	N
R_i	specifická plynová konstanta	m ² ·g/s ² ·K
R	plynová konstanta	m ² /s ² ·mol·K

A	koeficient přenosu tepla	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
λ	tepelná vodivost	$\text{W/m} \cdot \text{K}$
T	smykové napětí	N/m^2
β	koeficient tepelné roztažnosti	$1/\text{K}$
i	intenzita turbulence	m
L	charakteristický rozměr - délka	m
K	turbulentní kinetická energie	m^2/s^2
ε	koeficient turbulentní disipace	m^2/s^3
a_s	rychlost zvuku	m/s
O	obvod	m
E-modul	modul pružnosti	N/mm^2
M	kroučící moment	Nm
x, y, z	souřadnice souřadnicového systému	m
Q	hustota tepelného proudu	W/m^2

Použité bezrozměrné symboly

Re	Reynoldsovo číslo	-
Ma	Machovo číslo	-
Nu	Nusseltovo číslo	-
Pr	Prandtlovo číslo	-
Gr	Grashoferovo číslo	-
Ra	Rayleighovo číslo	-
π	Ludolfovo číslo	-
∂	parciální derivace	-

12 Seznam obrázků

Obr. 1.1: Princip ohřevu infračervenými zářiči [4].....	4
Obr. 3.1: Rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění [14].....	9
Obr. 3.2: Proudění z kruhového otvoru do volného prostoru [10].....	13
Obr. 3.3: Vliv regulace otáček ventilátorů v chladicí zóně na profil ochlazování [4]	16
Obr. 3.4: Řešení ochlazování posledního předeřevu v pájecím zařízení [4].....	17
Obr. 3.5: Vliv aktivovaného ochlazování posledního předeřevu na teplotní profil [4]	18
Obr. 3.6: Vliv aktivovaného topení zdola na teplotní profil pájecí pece [4].....	19
Obr. 3.7: Vliv chlazení shora, zdola a z obou stran [4].....	20
Obr. 4.1: Plyn proudí nad vytápěnou konstrukcí (kvádrem), příčný řez v ose X [14].....	22
Obr. 4.2: Plyn proudí nad vytápěnou konstrukcí (kádrem), průřez ve směru osy Y [14].....	22
Obr. 4.3: Tvorba radiální vrstvy (průřez ve směru osy X) [14]	23
Obr. 4.4: Měřicí zařízení (vstupní proudy plynu, pohled v řezu) [14].....	25
Obr. 4.5: Měřicí systém a) měřicí zařízení (radiální proudová vrstva, pohled v řezu); b) měření umístění (ML) na vyhřívané konstrukci (pohled shora) [9].....	26
Obr. 4.6: Proložení analytické křivky pro výpočet hodnot T_h [10].....	28
Obr. 4.7: Model vedení tepla termočlánku měřicího systému	29
Obr. 5.1: Příklad mechanického (a) a elektrického (b) čidla pro měření proudění plynů [19]	30
Obr. 5.2: Pohled na sensor FS7 bez pouzdra (FS7.0) a s pouzdrém (FS7.A) [20]	31
Obr. 5.3: Pohled na použitý měřicí sensor FS7.4W	32
Obr. 5.4: Pohled na měřicí desku před ověřením funkce	33
Obr. 5.5: Měřicí bod na navržené měřicí desce.....	34
Obr. 5.6: Blokové schéma měřicího systému.....	35
Obr. 5.7: Detailní pohled na průběh proudění a teploty v prvních zónách průtahové pece.....	36
Obr. 5.8: Znázornění vlivu změny frekvence ventilátorů	37
Obr. 5.9: Průběh teploty a proudění standardní průtahové pájecí pece.....	38
Obr. 5.10: Řešení izolace měřicího boxu	39
Obr. 5.11: Schematické znázornění soustavy trysek topné zóny pece č. 1	41
Obr. 5.12: Průběh rychlosti proudění a teploty v peci 1 ve směru osy Z.....	46
Obr. 5.13: Rychlost proudění pro pec č. 1 v ose Y	47
Obr. 5.14: Průběh teploty a rychlosti proudění pro pec č. 1, osa Z.....	48

Obr. 5.15: Průběh rychlosti proudění pro pec č. 1 v ose Y	49
Obr. 5.16: Schematické znázornění topné zóny v peci č. 2	50
Obr. 5.17: Průběh teploty a rychlosti proudění u pece č. 2, osa Z	51
Obr. 5.18 Průběh teploty a rychlosti proudění u pece č. 2, osa Y	52
Obr. 5.19: Průběh teploty a rychlosti proudění u pece 2, osa Z.....	53
Obr. 5.20: Průběh rychlosti proudění v ose Y při pájecím profilu u pece č. 2.....	54
Obr. 5.21: Schematický náčrt topné zóny pece č. 3.....	55
Obr. 5.22: Průběh teploty a rychlosti proudění při 150 °C u pece č. 3, osa Z.....	56
Obr. 5.23: Průběh teploty a rychlosti proudění při 150°C u pece č. 3, osa Y	57
Obr. 5.24: Průběh teploty a rychlosti proudění při pájení v peci č. 3, osa Z.....	57
Obr. 5.25: Průběh teploty a rychlosti proudění při pájení v peci č. 3, osa Z.....	58
Obr. 6.1: Základní možnosti popisu proudění [24]	61
Obr. 6.2: Postup při simulaci proudění systémem CFD [24]	64
Obr. 6.3: Druhy sítí popisujících simulovaný objekt [24].....	64
Obr. 6.4: Znázornění mezní vrstvy [24]	65
Obr. 6.5: Postup při řešení stacionárního proudění [24]	66
Obr. 6.6: Metody výpočtu nestacionárního proudění [24]	68
Obr. 6.7: Metody řešení Boussinesquovy hypotézy [24]	70
Obr. 6.8: Náčrt jedné zóny pájecí pece	72
Obr. 6.9: Vytvoření fluidní zóny ze 3D výkresu.....	73
Obr. 6.10: Fluidní geometrie jedné strany pájecí pece.....	73
Obr. 6.11: Definice regionů pro simulaci.....	74
Obr. 6.12: Výsledný pohled na přiřazené regiony	75
Obr. 6.13: Návrh výpočetní sítě	76
Obr. 6.14: Nastavení OpenFoam Dict pro zóny Y	83
Obr. 6.15: Celkový pohled na výsledek simulace	84
Obr. 6.16: Výsledek simulace – řez v rovině Y–Z.....	84
Obr. 6.17: Proudění v rovině Y-Z	85
Obr. 6.18: Simulace rychlosti proudění ve směru osy Z.....	85
Obr. 6.19: Proudění ve směru osy Y	86
Obr. 6.20: Řez v rovině osy X ve směru osy Y	86
Obr. 6.21: Zobrazení proudění po celé délce pece v oblasti podélné osy	87

Obr. 6.22: Simulace proudění ve směru Y osy X.....	87
Obr. 6.23: Označení roviny pro další simulaci.....	88
Obr. 6.24: Pohled na rovinu XY (pohled na pec shora).....	88
Obr. 6.25: Grafické znázornění silového působení na DPS uvnitř pájecí pece.....	89
Obr. 6.26: Koeficienty přenosu tepla pro různé rychlosti proudění.....	90
Obr. 6.27: Propočet rozdílů teplot mezi levou a pravou stranou DPS	91
Obr. 6.28: Rychlost proudění působícího na součástku	92

13 Seznam tabulek

Tab. 3.1: Závislost teploty na rychlosti transportu v průběžné peci [4].....	14
Tab. 3.2: Vliv otáček ventilátorů na teplotu součástek po průchodu pecí [4].....	16
Tab. 5.1: Ověření izolačních schopností ochranného krytu měřicího systému.....	40
Tab. 5.2: Vliv frekvence ventilátorů na množství a rychlost plynu rotujícího v topné zóně [5]	42
Tab. 5.3: Vlastnosti suchého vzduchu [31].....	43
Tab. 5.4: Parametry pole trysek	45
Tab. 5.5: Parametry pole trysek u pece č. 3	55
Tab. 6.1: Konfigurace výpočetních sítí	76
Tab. 6.2: Objem a rychlost proudění v jednotlivých zónách pece [5]	77
Tab. 6.3: Objem a rychlost proudění v jednotlivých zónách [5].....	78
Tab. 6.4: Hodnoty vhánění plynu do jednotlivých zón	79
Tab. 6.5: Hodnoty odsávání v jednotlivých zónách	80
Tab. 6.6: Reynoldsovo číslo, intenzita turbulence a koeficient k pro různé části pece.....	81
Tab. 6.7: Poměr turbulentní a laminární viskozity v závislosti na Reynoldsově čísle.....	82
Tab. 6.8: Koeficienty turbulentního proudění	82