



České vysoké učení technické v Praze
FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

**Mikro PIV měření pro sledování vlivu
drsnosti povrchu na proudové pole**

**Micro-PIV Measurement for Observation of Surface
Roughness Influence on Flow Field**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jakub Dostál a Ing. Adam Bláha

Autor: Dmitry Paley

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci napsal samostatně pod vedením Ing. Jakuba Dostála a Ing. Adama Bláhy s použitím literatury uvedené v seznamu na konci mé bakalářské práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24.01.2019

.....
Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucím mé bakalářské práce Ing. Jakubu Dostálovi a Ing. Adamu Bláhovi za odborné vedení a pomoc s experimentem.

Dále bych rád poděkoval ostatním kolegům a zaměstnancům Ústavu mechaniky tekutin za pomoc při řešení různých problémů.

Anotační list

Jméno autora:	Dmitry Paley
Název bakalářské práce:	Mikro PIV měření pro sledování vlivu drsnosti povrchu na proudové pole
Anglický název:	Micro-PIV Measurement for Observation of Surface Roughness Influence on Flow Field
Akademický rok:	2018/2019
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedouce bakalářské práce:	Ing. Jakub Dostál a Ing. Adam Bláha
Bibliografické údaje:	Počet stran: 57
	Počet obrázků: 63
	Počet tabulek: 3
	Počet slov: 8744

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis experimentu včetně problematiky kalibrace a návrhu trati pro metodiku mikro Particle Image Velocimetry (PIV). Tato metodika zkoumá průtoky tekutiny v mikroměřítku. Experiment byl postaven pro zkoumání vlivu drsnosti povrchu desky na rychlostní profil při obtékání desky. V teoretické kapitole jsou poznatky z mechaniky tekutin a metody mikro PIV. Ostatní kapitoly obsahují návrh a provedení experimentu, analýzu výsledků měření a závěr.

Klíčová slova: obtékání desky, rychlostní profil, Particle Image Velocimetry (PIV), experiment mikro PIV, long-distance objektiv, kouř, aerodynamický tunel.

This bachelor thesis is focused on the description of the experiment based on the micro Particle Image Velocimetry (micro PIV) method. This method examines fluid flows at a microscale. The experiment was designed to investigate the effect of the surface roughness of the board on the velocity field. In the theoretical chapter are information about fluid mechanics and micro PIV methods. Other chapters include the design and execution of the experiment, the analysis of the measurement results and the conclusion.

Key words: Air flowing of the board, flow field, Particle Image Velocimetry (PIV), micro PIV experiment, long-distance lens, smoke particles, aerodynamic tunnel.

Obsah

Seznam veličin a jednotek	6
Úvod.....	7
1. Úvod do mechaniky tekutin	8
1.1. Obtékání a odpor těles	10
1.2. Mezní vrstva.....	13
1.3. Obtékání desky	16
1.4. Experimentální metody určení rychlostního pole	21
1.5. PIV.....	22
1.6. Long-distance mikro PIV	25
1.7. Aerodynamický tunel	31
2. Návrh experimentu	33
2.1 Volba měřeného modelu	33
2.2 Aerodynamický tunel	33
2.3. Experimentální trať	39
3. Provedení experimentu	44
4. Analýza naměřených dat	47
5. Výsledky	49
5.1 Rychlostní pole pro hladkou desku	49
5.2 Porovnání rychlostního pole nad hladkou a drsnou deskou.	52
6. Závěr	54
Použité zdroje	55
Seznam obrázků	56

Seznam veličin a jednotek

Re	Reynoldsovo číslo	[1]
v	Střední rychlost tekutiny	[m/s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
η	Dynamická viskozita	[Pa·s]
τ	Tečné napětí	[N/m ²]
F_x	Odpor tělesa	[N]
F_f	Třecí odpor	[N]
F_p	Tlakový odpor	[N]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
c_x	Součinitel odporu(celkového)	[1]
c_f	Součinitel třecího odporu	[1]
c_p	Součinitel tlakového odporu	[1]
S_p	Příčný průřez tělesa	[m ²]
S_f	Plocha stýkající s tekutinou	[m ²]
v_∞	Rychlost nenarušeného proudu	[m/s]
δ	Tloušťka mezní vrstvy	[m]
δ^*	Pošínovací tloušťka	[m]
δ^{**}	Energetická tloušťka	[m]
ϑ	Impulsová tloušťka	[m]
p	Tlak	[Pa]
v_t	Třecí rychlost	[m/s]
ψ	Proudová funkce	[1]
c_n	Součinitel celkového odporu	[1]
α	Úhel náběhu	[Rad]
d_e	Efektivní průměr	[m]
d_s	Difrakčně omezený průměr částice	[m]
d_p	Průměr částice	[m]
f	Ohnisková vzdálenost	[m]
M	Zvětšení	[1]
λ	Vlnová délka	[m]
K	Boltzmannová konstanta	[J/K]
T	Teplota	[K]
ε_x	Relativní chyba v ose X	[1]
ε_y	Relativní chyba v ose Y	[1]
e	Nejmenší vzdálenost, kterou je schopen snímat detektor umístěný v ploše snímku	[m]
n	Index lomu	[1]
NA	Numerická apertura	[1]

Úvod

Lidé se miliony let přizpůsobovali okolnímu prostředí a využívali okolní podmínky pro usnadnění práce. Tekutina byla jedním z prvních zdrojů pro pohánění různých zařízení a strojů, např. mlýn, lodní plachta, parní stroj ... Na začátku dvacátého století bylo zkonstruováno první letadlo. Byly zformulovány první zákony letu a zkoumalo se obtékání různých profilů. S rozvojem techniky XX. století se zájem o výzkum rozšířil do různých oblastí jako mikrosvět, vesmír, atom a dalších oborů. Pomocí nových zařízení se bylo možné dívat na nám známý svět z jiného pohledu. V sedmdesátých letech dvacátého století se pomocí křemíku začala vyrábět mikro zařízení, což později v anglické literatuře pojmenovali microelectromechanical systems (MEMS). Přesnější název takových systémů s použitím optických a tekutinových komponent se nazývá micro-system technology (MST). Ani v dnešní době se pokrok nezastaví, lidé se pokouší dosáhnout lepších výsledků a výkonů v různých oblastech. Proto je velmi podstatné chápat, jak funguje svět kolem nás. V tom nám pomáhají různá zařízení a výzkumné metody.

V další části své práce se zaměřím na proudění plynů v aerodynamickém tunelu a na metody zkoumání obtékání desky kouřem v tomto tunelu. Budou ukázány dvě desky o různých drsnostech a změna rychlostního pole vzhledem k charakteristice jejich povrchů. Pro pochopení všech aspektů práce nejprve uvádím základní teorie.

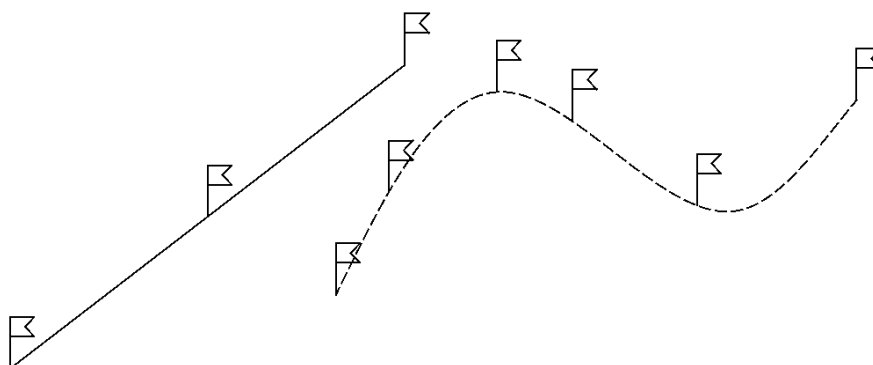
1. Úvod do mechaniky tekutin

V mechanice tekutin se tekutiny rozdělují na dva typy: ideální (dokonalá) a skutečné (reálné). Ideální tekutina je modelový případ (může být nestlačitelná nebo zcela stlačitelná) a bez vnitřního tření, skutečná tekutina je stlačitelná, viskozitu nelze zanedbat [1].

Proudění dvou druhů tekutin je možno rozdělit podle několika kritérií:

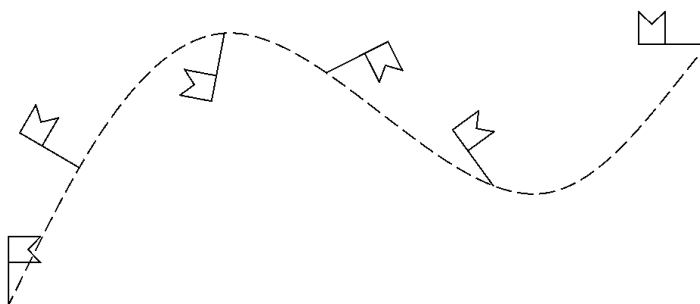
1. Proudění ideální tekutiny může být:

a) Potenciální proudění (nevířivé) - částice se pohybuje přímočaře nebo křivočaře po drahách tak, že vůči pozorovateli se neotáčejí kolem vlastní osy [2].



Obr. 1.1 Potenciální proudění [2]

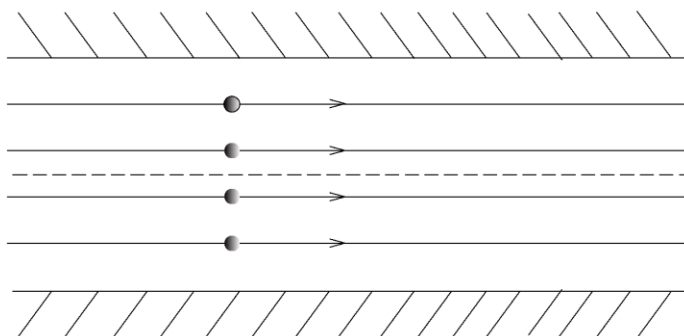
b) Vířivé proudění – částice se vůči pozorovateli natáčejí kolem vlastních os [2].



Obr. 1.2 Vířivé proudění [2]

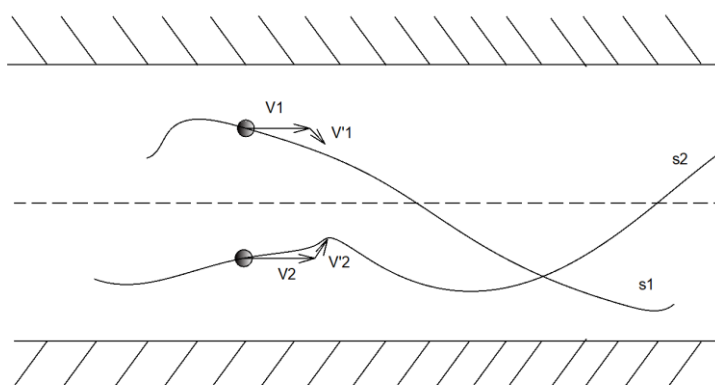
2) Proudění skutečné tekutiny může být:

a) Laminární – částice se pohybují ve vrstvách a jejich proudnice jsou rovnoběžné, bez přemísťování.



Obr. 1.3 Laminární proudění [2]

- b) Turbulentní – částice se kromě posouvání vůči sobě i přemísťují. Rychlosti jednotlivých částic se mění nepravidelně.



Obr. 1.4 Turbulentní proudění []

Zda jde o laminární nebo turbulentní proudění skutečné tekutiny můžeme zjistit pomocí Reynoldsova čísla [1].

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

kde v je střední rychlost tekutiny, d -charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita tekutiny.

V práci je popsán experiment v aerodynamickém tunelu, kde pracovním médiem je vzduch. Vzduch patří mezi tekutiny skutečné a díky viskozitě mezi vrstvami vzniká tečné (smykové) napětí, sousední částice působí navzájem třecí silou [2].

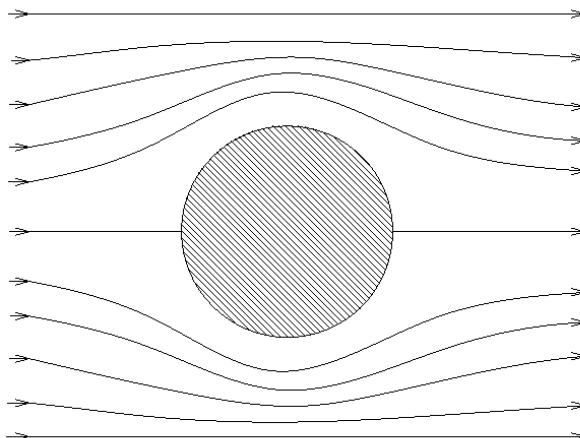
Newtonův zákon pro tečné napětí:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

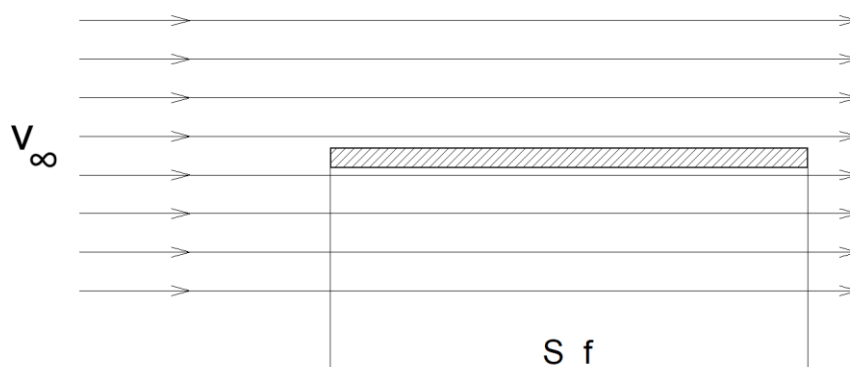
η - dynamická viskozita, $\frac{dv}{dy}$ - gradient rychlosti v kolmém směru

1.1. Obtékání a odpor těles

Je-li těleso obtékáno ideální tekutinou (viskozita je nulová), proudové pole je symetrické vůči hlavní osám, proto odpor bude nulový [1].

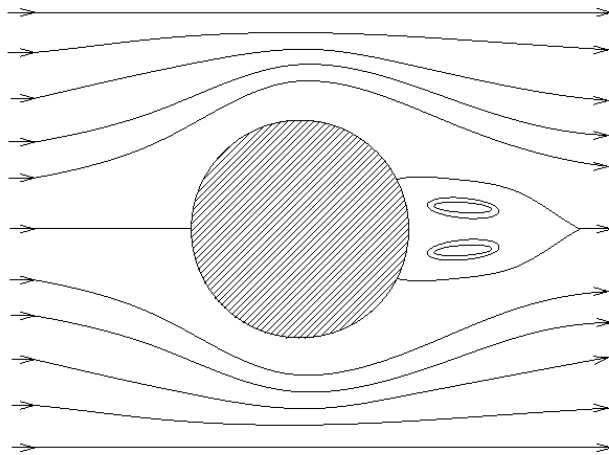


Obr. 1.5 Obtékání koule ideální tekutinou [2]

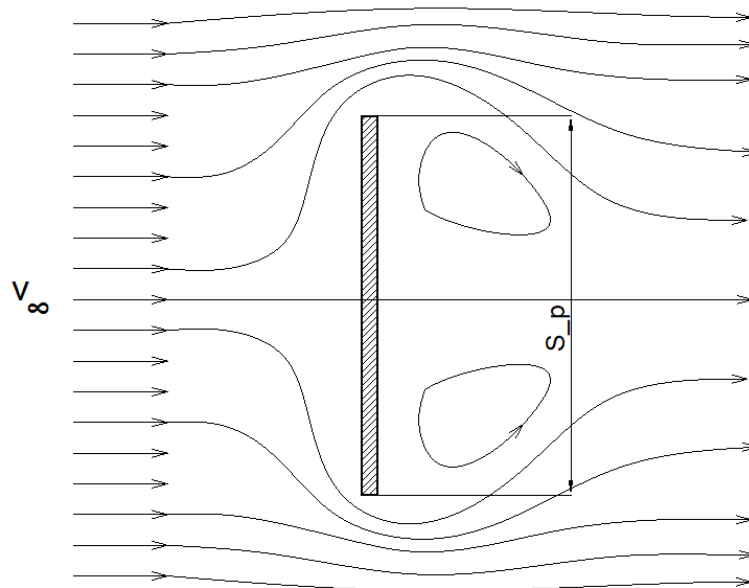


Obr. 1.6 Obtékání desky ideální tekutinou [2]

Při obtékání těles skutečnou tekutinou se mění směr a rychlost proudění. Díky vlivů viskozity mezi obtékaným tělesem a tekutinou vznikají silové účinky [1].

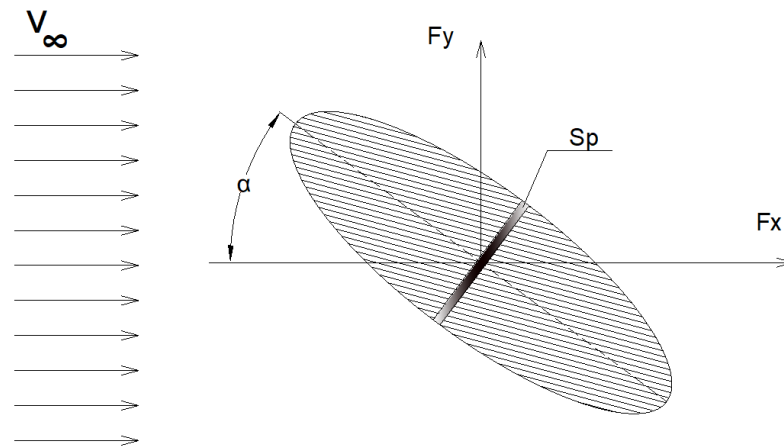


Obr. 1.7 Víry při obtékání zakřiveného tělesa [2]



Obr. 1.8 Obtékání desky kolmo k vektoru rychlosti [2]

Tyto účinky se rozdělují na vztlakovou sílu F_y , která působí kolmo k rychlosti nenarušeného proudu, a na sílu odporovou F_x . Vztlaková síla vzniká při nesymetrickém obtékání symetrického tělesa nebo při obtékání nesymetrického tělesa [2].



Obr. 1.9 Silové účinky pro symetrické těleso obtékané pod úhlem větším než nula vzhledem k proudu [2]

Odpor tělesa je vyjádřen vztahem [1]:

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S \cdot v_\infty^2 \quad (3)$$

c_x -součinitel odporu(celkového)

S - charakteristická plocha, např. příčný průřez

v_∞ - rychlost nenarušeného proudu

Velikost součinitelů odporu je dána druhem proudění v mezní vrstvě (laminární nebo turbulentní), tvarem tělesa, drsnosti povrchu a turbulenci nabíhajícího proudu.

a) Třecí odpor se vyjadřuje vztahem

$$F_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_f \cdot S_f \cdot v_\infty^2 \quad (4)$$

c_f -součinitel třecího odporu

S_f -plocha stýkající s tekutinou

b) Tlakový odpor vzniká při odtržení proudu od tělesa a závisí na existenci vířivé oblasti

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot S_p \cdot v_\infty^2 \quad (5)$$

c_p -součinitel tlakového odporu

S_p -příčný průřez tělesa

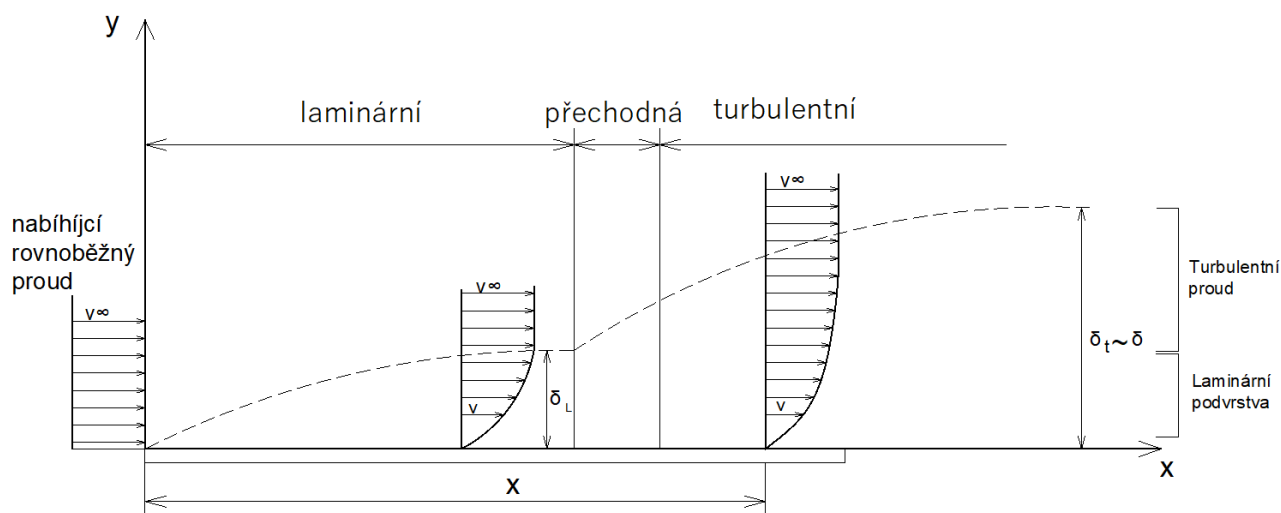
c) Indukovaný odpor vzniká při obtékání těles konečné délky a je jedním ze zdrojů vztlaku.

Ve většině případů je výsledný odpor složen z třecího a tlakového odporu. V těchto případech se vyjadřuje vztahem (3).

1.2. Mezní vrstva

Pojem mezní vrstvy zavedl Ludwig Prandtl. Mezní vrstva je oblast v těsné blízkosti obtékaného tělesa, kde existuje gradient rychlosti (mění se rychlost) a platí nerovnost $\frac{\partial v}{\partial y} \neq 0$. Existence mezní vrstvy je zapříčiněna vazkým chováním tekutiny při obtékání těles. Tento princip bude vysvětlen na příkladu obtékání tenké desky umístěné paralelně s proudem tekutiny.

Částice pohybující se před deskou mají stejnou rychlost. Avšak částice, pohybující se v blízkosti desky, na povrchu ulpí a mají rychlost nulovou. Vlivem viskozity se zabrzdí nejbližší vrstvy tekutiny u povrchu desky. Rychlost proudění směrem od stěny narůstá až do rychlosti nenarušeného proudu v_∞ . Tření na desce stále zabrzdňuje částice tekutiny, a protože do mezní vrstvy vstupují další částice, mezní vrstva směrem po proudu stále narůstá [1].



Obr. 1.10 Vývoj mezní vrstvy [2]

Rychlostní profily na celé délce mají spojitý přechod z nulové rychlosti na povrchu obtékaného tělesa do plné rychlosti ve vnějším proudu. Mezní vrstvu ovlivňuje skutečnost, že proudění v ní může být buď laminární nebo turbulentní. Na obr. 1.10 je v přední části je mezní vrstva laminární, v zadní turbulentní, mezi nimi přechodová oblast. Kritérium pro stanovení přechodu laminární mezní vrstvy do turbulentní je Reynoldsovo číslo.

Reynoldsovo číslo v libovolném místě desky se vypočítá:

$$Re = \frac{v_\infty \cdot x}{\nu} \quad (6)$$

v_∞ je rychlost nenarušeného proudu, x je vzdálenost od náběžné hrány.

Má-li nabíhající proud nulovou turbulenci, vznikne na začátku laminární mezní vrstva. Ta při $Re_x = 100\,000$ teoreticky přechází v turbulentní mezní vrstvu s laminární mezní podvrstvou. Má-li na začátku nabíhající proud určitou turbulenci, potom na začátku náběžné hrany vzniká turbulentní mezní vrstva. Turbulentní rychlostní profil je plnější, je to způsobeno turbulencí v mezní vrstvě. Rychlostní gradient pro laminární proudění u stěny je menší než v případě turbulentní mezní vrstvy [9].

Odpor v turbulentní mezní vrstvě je větší než v laminární, což se projevuje na hodnotě součinitelů odporu c_x .

Tab. 1.1 Rovnice pro výpočet součinitelů odporu a tloušťek mezních vrstev v závislosti na Reynoldsově čísle

Druh mezní vrstvy	Tloušťka mezní vrstvy	Součinitel odporu tělesa	poznámka
Laminární	$\delta = \frac{4,64 \cdot x}{\sqrt{Re_x}}$	$C_{xf} = \frac{1,328}{\sqrt{Re_L}}$	$Re_x \ll Re_k$
Turbulentní	$\delta = \frac{0,381 \cdot x}{\sqrt[5]{Re_x}}$	$C_{xf} = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_L}}$	$Re_x \gg Re_k$
Smíšená	$\delta = \frac{4,64 \cdot x}{\sqrt{Re_x}}$ pro $x < x_k$ $\delta = \frac{0,381 \cdot x}{\sqrt[5]{Re_x}}$ pro $x > x_k$	$C_{xf} = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_L}} - \frac{1700}{Re_L}$	$Re_x \approx Re_k$

$$Re_x = \frac{v_\infty \cdot x \rho}{\eta}; Re_L = \frac{v_\infty \cdot L \rho}{\eta}; Re_k = \frac{v_\infty \cdot x_k \rho}{\eta}$$

Mezní vrstva na počátku desky je laminární a přechází na dalším úseku v turbulentní mezní vrstvu s laminární podvrstvou.

Přechod mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou dává kritické Reynoldsovo číslo:

$$Re_k = \frac{v_\infty \cdot x_k \cdot \rho}{\eta} \quad (7)$$

kde x_k je vzdálenost od náběžné hrany do místa, kde laminární mezní vrstva přechází v turbulentní.

Tloušťka mezní vrstvy je velmi malá ve srovnání s rozměry tělesa a představuje setiny až tisícinu charakteristické délky tělesa.

Pojem mezní vrstvy není přesně definovaný. Proto se zavádí několik definic mezní vrstvy.

Standartní definice tloušťky mezní vrstvy: Smluvní tloušťka δ mezní vrstvy je kolmá vzdálenost od stěny do místa, kde rychlost zpravidla dosahuje 99 % rychlosti vnějšího proudu [2].

$$\delta = y \cdot (0,99 \cdot V_0) \quad (8)$$

Pošínovací (odtlačovací) tloušťka (δ^*) mezní vrstvy udává změnu tloušťky tělesa tak, aby průtok dokonalé tekutiny mezní vrstvou byl stejný jako průtok skutečné tekutiny stejným průřezem [2].

$$\delta^* b V_\infty = \int_0^\delta (V_\infty - v) \cdot b dy \quad (9)$$

Odkud vyplývá

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{v}{V_\infty}\right) dy \quad (10)$$

Impulsová tloušťka vzniká při vyrovnání úbytků hybnosti skutečné tekutiny v mezní vrstvě vzhledem k hybnosti dokonalé tekutiny mezi posunutým obrysem o ϑ a skutečným obrysem.

Z porovnání dvou průtoků:

$$\rho \cdot b \cdot V_\infty^2 \cdot \vartheta = \rho \cdot b \int_0^\delta v \cdot (V_\infty - v) dy \quad (11)$$

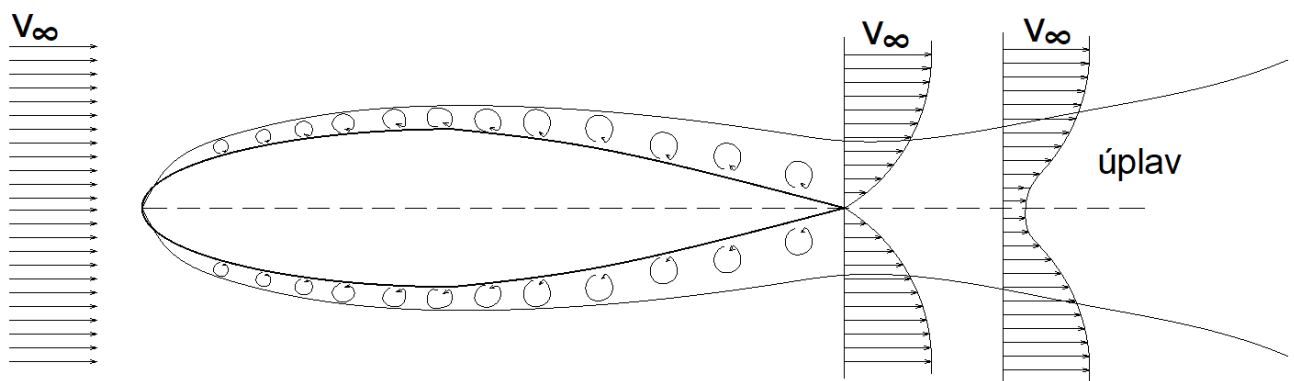
Vyplývá impulsová tloušťka (ϑ)

$$\vartheta = \int_0^\delta \left(1 - \frac{v}{V_\infty}\right) \cdot \frac{v}{V_\infty} dy \quad (12)$$

Energetická tloušťka vzniká při vyrovnání úbytku energie a je definovaná vztahem:

$$\delta^{**} = \int_0^\delta \left(1 - \frac{v^2}{V_\infty^2}\right) \cdot \frac{v}{V_\infty} dy \quad (13)$$

Při obtékání zakřiveného profilu se tlak na povrchu mění. Tlak se určí z Bernoulliovy rovnice. Tlak na povrchu se od náběžné hrány zmenšuje do místa, kde dosahuje minima a opět roste. Pokud nedochází k odtržení proudu, úplav je tvořen zpomalenými částicemi z mezní vrstvy. V úplavu není zpětné proudění. Jedná se o spojitě pokračování mezních vrstev. V tomto případě je tvar úplavu stejný jak u laminárního, tak u turbulentního proudění. V turbulentním úplavu dochází k rychlejšímu rozšiřování a vyrovnávání úplavu [1].



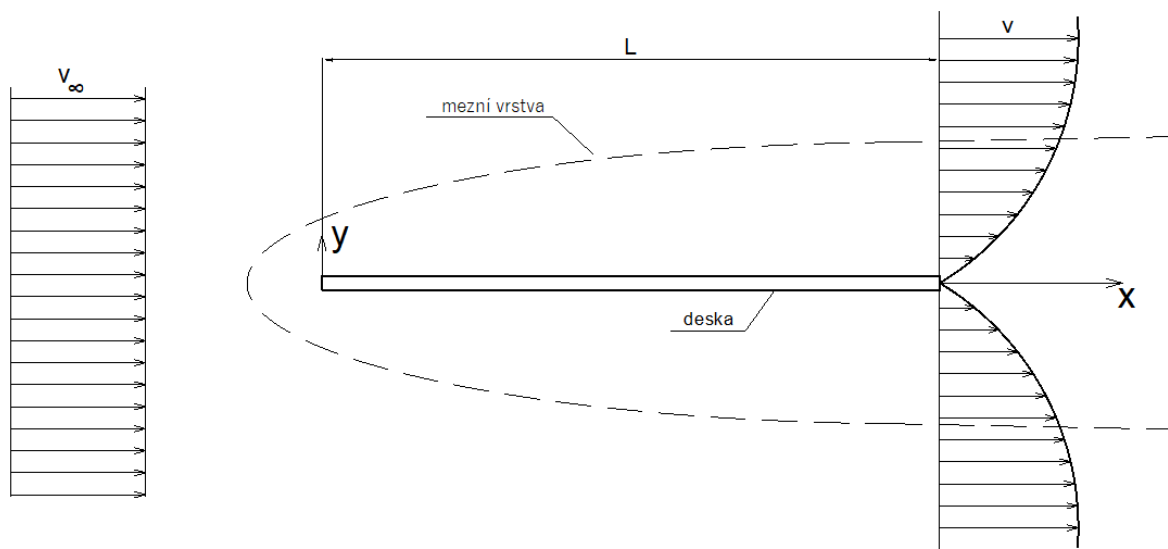
Obr. 1.11 Vznik úplavu při obtékání profilu [2]

Při obtékání tupých těles s laminárním odtržením proudu se setkáváme s vírovými vlákny, které uspořádaně vznikají u stěny a po dostatečném nárůstu se odrhnou a vytvoří za tělesem pravidelnou dvojřadu, tzv. Kármánovu vírovou stezku.

V turbulentní mezní vrstvě vzniká intenzivní výměna hybnosti mezi částicemi kapaliny, a proto i při zvýšeném tření částice ztrácejí kinetickou energii pomaleji. Hybnost, která je předána obtékanému tělesu se projevuje v tvarovém odporu tělesa.

1.3. Obtékání desky

V proudovém poli vně mezní vrstvy neuvažujeme vliv vazkých sil, a proto se používá Eulerova rovnice. Uvnitř mezní vrstvy mají vazké a setrvačné síly srovnatelný vliv a nutno použít rovnice Navierovy-Stokesovy [1].



Obr. 1.12 Obtékání desky postavené paralelně vzhledem k obtékané tekutině [2]

Pro dvourozměrný případ obtékání rovinné desky v kartézském souřadném systému platí

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

Pro řešení daného systému nelineárních parciálních diferenciálních rovnic Ludwig Prandl v roce 1904 zanedbal členy nižších řádu a srovnal řád funkcí, jejichž argument nabývá určitých hodnot v uvažovaném oboru. Pro případ podélného obtékání rovinné desky je tlak podél desky a v mezní vrstvě konstantní, z čehož plyne

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

Z uvedeného vyplývá, že nemůže vzniknout náhlé zrychlení díky konstantnímu tlaku a místní zrychlení $\frac{\partial v_x}{\partial t}$ se rovná konvektivnímu $\frac{\partial v_x}{\partial x}$. To znamená, že člen $\frac{\partial v_y}{\partial y}$ je stejného řádu jako $\frac{\partial v_x}{\partial x}$.

Podle předpokladu $y \approx \delta$, $v_x \approx \delta$, $\delta \ll x$ platí

$$v_x \approx 1, \frac{\partial v_x}{\partial x} \approx 1, v_y \approx \delta, \frac{\partial v_y}{\partial y} \approx 1, \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \approx 1, \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \approx \frac{1}{\delta^2}$$

Z toho vyplývá:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = v \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

Laminární proudění v mezní vrstvě

Použijeme-li proudovou funkci ψ jako novou proměnnou, která je definována vztahy:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \text{a} \quad v_y = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

a po transformaci Prandlových funkcí:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} \quad (21)$$

provedl Blasius řešení této základní rovnice pro třecí součinitel a tloušťku mezní vrstvy pomocí rozvoje řady. Pro rychlostní profil při obtékání desky se můžou aplikovat všechny poznatky Kármána, které učinil pro proudění tekutiny v potrubí s kruhovým průřezem. Podle Kármána rychlost je funkcí tangenciálního napětí na stěně trubky- τ_0 , hustoty ρ a kinematické viskozity ν tekutiny. Pro drsnou desku je vliv viskozity malý, přistupuje však vliv absolutní drsnosti stěny- k [2].

Třecí rychlost $V_t = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, kde τ_0 -smykové napětí na stěně, ρ -hustota tekutiny.

Na hranici mezní vrstvy a potenciálního proudění pro rychlost platí $v = v_\infty$. Rychlostní profil v mezní vrstvě je aproximován polynomem 3 stupně.

$$v = c_1 + c_2 y + c_3 y^2 + c_4 y^3 \quad (22)$$

Pro řešení platí tyto počáteční podmínky:

$$\text{při } y = 0, v = 0, \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} = 0$$

$$\text{při } y = \delta, v = v_\infty, \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

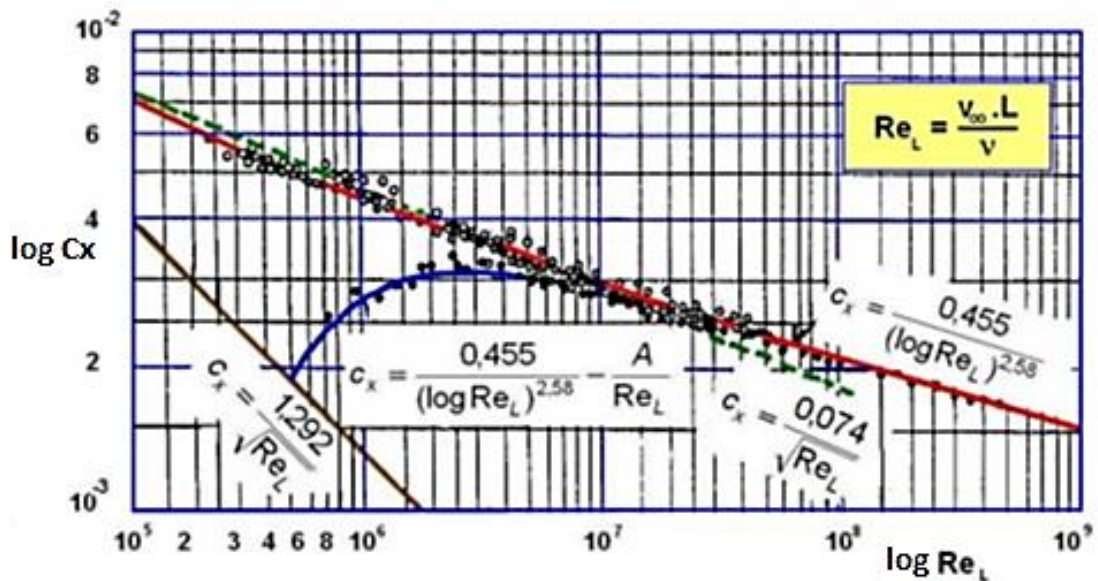
$$\frac{dp}{dx} = 0, \quad \frac{dp}{dy} = 0$$

Řešení Prandtlových a Kármánových rovnic najdeme v Tab. 1.1

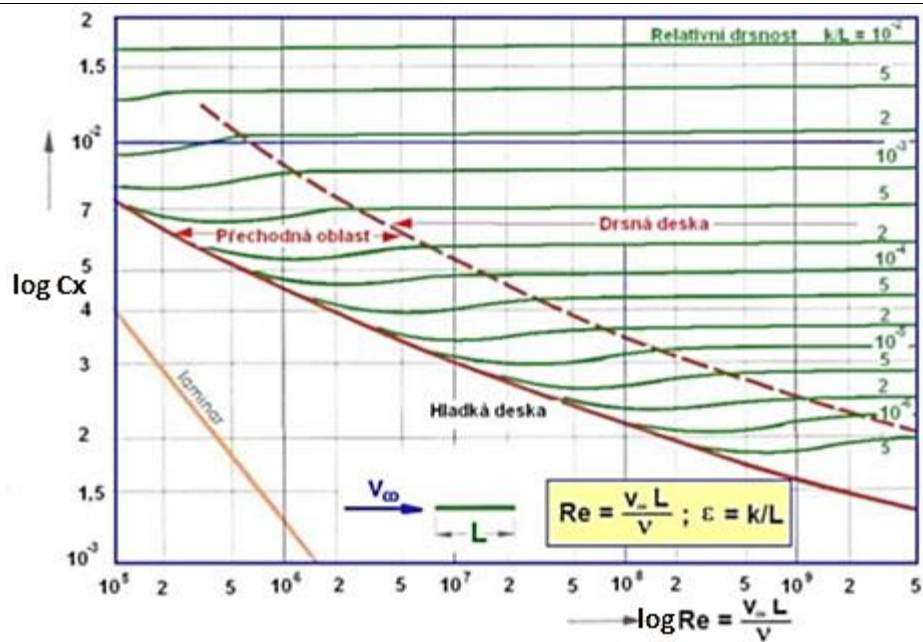
Turbulentní proudění v mezní vrstvě

Řešení turbulentního proudění v mezní vrstvě přesně neexistuje. Dá se odhadnout z experimentálních výsledků a metod založených na větě o změně hybnosti. Také existuje čistě numerické řešení. Při řešení je důležité, že rychlostní profil na desce je

určen mocninovou funkcí rovnicí $\frac{v_x}{v_\infty} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}$.



Obr. 1.13 Závislost odporového součinitele hladké desky pro laminární a turbulentní proudění na Reynoldsově čísle [9]

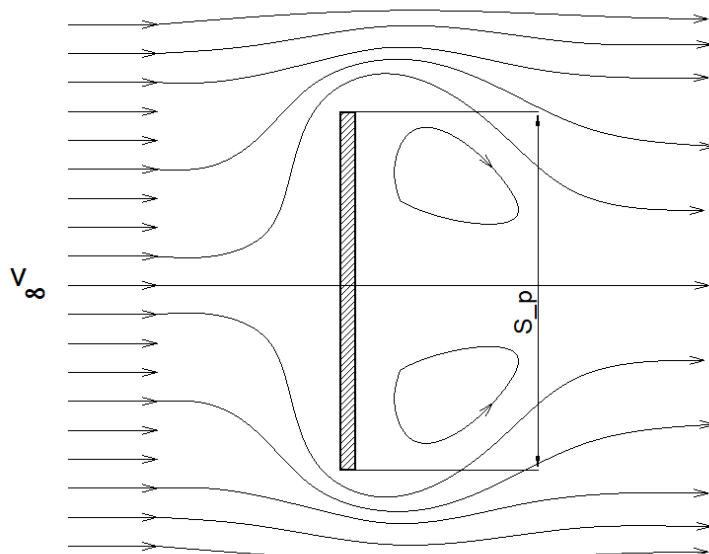


Obr. 1.14 Závislost odporového součinitele hladké desky na Reynoldsově čísle pro turbulentní proudění [9]

Relativní drsnost je definovaná zlomkem $\epsilon = \frac{k}{L}$, kde k je absolutní drsnost stěny desky a L je charakteristický rozměr.

Obtékání desky kolmo a šikmo na vektor rychlosti

Při obtékání desky postavené kolmo na vektor nabíhající rychlosti dojde k odtržení mezní vrstvy na horním a spodním kraji desky jen při nízkých Reynoldsových číslech ($Re < 10^5$) [1].



Obr. 1.15 Obtékání desky kolmo na vektor rychlosti proudící tekutiny [2]

Z Bernoulliovy rovnice vyplývá, že v přední části desky je přetlak a v zádni podtlak. Díky tomu vzniká kolmo na desku ve směru proudění tlakový odpor.

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \rho \quad (23)$$

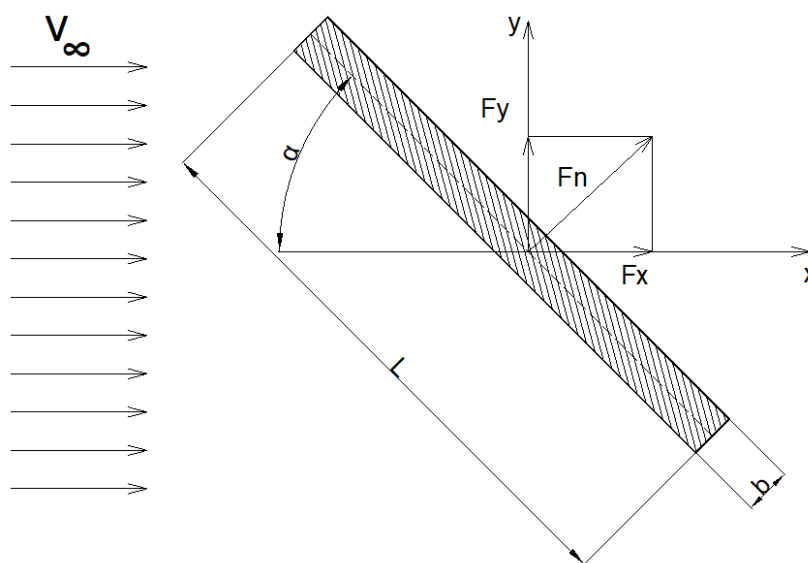
kde $S = a \cdot b$ – plocha obdélníka o stranách a a b , a je délka desky v svislé ose a b je její šířka.

Tab. 1.2 Závislost odporového součinitele na poměru velikosti stran obtékané desky

a/b	1	2	4	5	10	18	20	∞
c_x	1,1	1,15	1,19	1,2	1,29	1,4	1,5	1,9

Ve výše uvedené tabulce je závislost velikosti součinitele odporu c_x na poměru stran a/b . Je vidět, že se zmenšujícím poměrem odpor klesá. Nejnižších hodnot dosahuje na čtvercové desce. To je způsobeno přetékáním tekutiny ze stran do úplavu.

Při obtékání desky postavené šikmo na vektor nabíhající rychlosti vzniká kromě odporu i vztlaková síla.



Obr. 1.16 Obtékání desky nakloněné vůči proudu pod úhlem α [2]

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \rho$$

$$F_y = c_y \cdot S \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \rho$$

$$F_n = c_n \cdot S \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \rho$$

Pro šikmou desku se může stanovit součinitel celkového odporu c_n při úhlu náběhu $0^\circ < \alpha < 8^\circ$

$$c_n = 2\pi \cdot \tan(\alpha) \quad (24)$$

při úhlu náběhu $8^\circ < \alpha < 90^\circ$

$$c_n = \frac{1}{0,222 + \frac{0,283}{\sin \alpha}} \quad (25)$$

Vztah mezi součiniteli je následující: $c_x = c_n \cdot \sin(\alpha)$, $c_y = c_n \cdot \cos(\alpha)$

1.4. Experimentální metody určení rychlostního pole

Pro zjištění velikosti rychlosti v jakémkoliv bodě používáme metody na základě měření tlaku, termickou anemometrii a laserovou anemometrii.

K metodě s měřením tlaku patří zjištění rychlosti pomocí sond. Jedná nebo více sond se instaluje do tunelu a měří statický a celkový tlak.

K termické anemometrii patří metody žhaveného drátku a žhaveného filmu, k laserové anemometrii pak např. metoda PIV (Particle Image Velocimetry) a LDA (Laser Doppler Anemometry). Metodou PIV se podrobně zabývá kapitola 1.5.

Určení rychlosti pomocí tlaku

Pro měření tlaku v aerodynamickém tunelu se instalují sondy uvnitř tunelu. Tlak působí na elastickou membránu, což se v sondě projeví vznikem elektrického napětí.

K zjištění celkového tlaku běžně se používá Pitotova trubice. Pitotova trubice je cylindrická trubice s malým otvorem vpředu. Nabíhající tekutina se zastaví na otvoru a způsobí tlak. Pitot-statickou trubicí se změří statický i celkový tlak.

Termická anemometrie

Základem této metody je trubice s několika jehlicemi na konci. Jehlice jsou propojeny mezi sebou tenkými dráty. Tyto drátky jsou ohřáty elektrickým proudem. Tekutina při obtékání změní teplotu drátku a tím i odpor drátku, což změní proud, kterému odpovídá určitá rychlost. K takovým metodám patří tzv. metoda žhaveného drátku nebo žhaveného filmu.

Laserová anemometrie

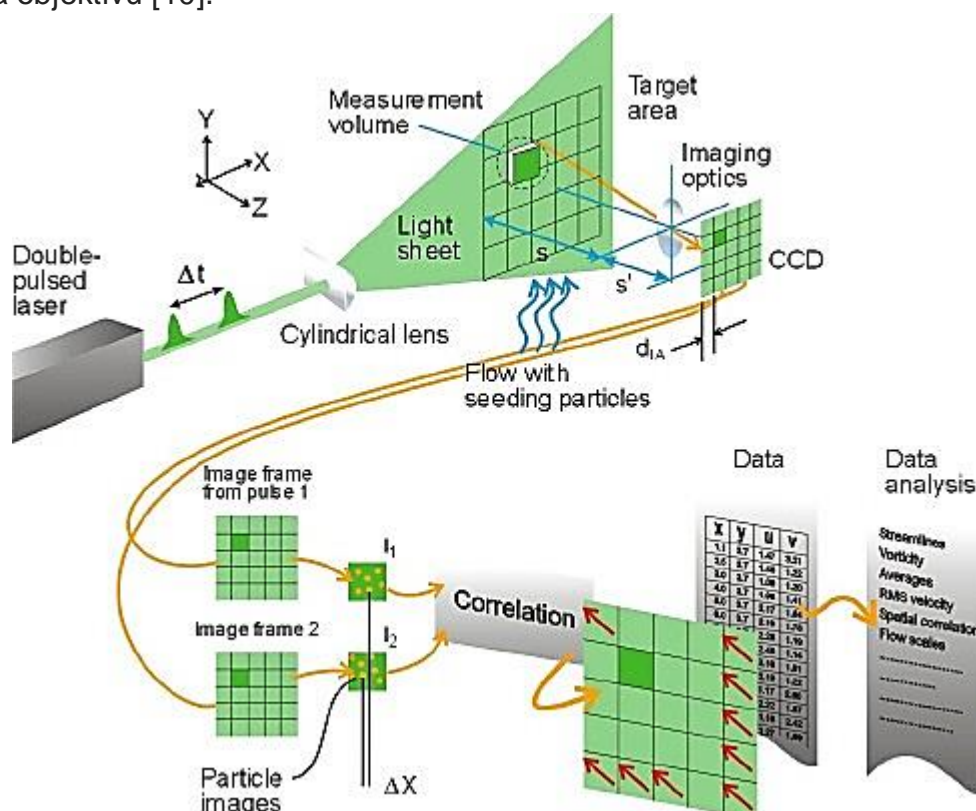
Jedná z laserových metod je Laser Doppler Anemometry (LDA). Je to bezkontaktní snímání rychlosti proudění díky Dopplerovu jevu. Průtok je ozářen nepohyblivým laserem. Odrážené záření od částic rozptýlených v tekutině snímá kamera. Vlivem Dopplerova jevu dochází k posuvu frekvence odráženého a vysílaného záření. Porovnání těch dvou frekvencí lze spočítat rychlost částic. Frekvence viditelného světla je relativně vysoká (10^{15} Hz) a díky tomu neexistuje zatím možnost zjištění frekvenčního posunutí bez porovnání s nějakým určitým zářením. Průtok je ozářen dvěma paprsky o různé frekvenci. Díky interferenci intenzity na povrchu foto senzoru se změní frekvence, která se rovná rozdílu výchozích frekvencí a má přímou závislost na rychlosti proudění [3].

1.5. PIV

Particle Image Velocimetry (PIV) byla používána od osmdesátých let k získání rychlostí v prostorovém 2D poli v makroskopických tocích. Základní myšlenka metody je jasná. Vezmou se dva obrázky částic s určitým časovým intervalem mezi snímky a spočítá se vzdálenost mezi částicemi. Průtok je značován vhodnými částicemi rozptýlenými v proudu tekutiny. Jednou z klíčových výhod techniky PIV oproti jiným obvyklým technikám je schopnost získat okamžitou informaci o rychlosti v celém poli. Toto okamžité proudové pole je důležité pro zkoumání struktury turbulentních průtoků. V roce 1998 Santiago a kol. demonstroval první systém mikro PIV – systém PIV s prostorovým rozlišením dostatečně malým, aby bylo možné provádět měření v mikroskopických systémech. Mikro PIV je jedna varianta z této metody. Tato technika popisuje měření rychlostního pole s rozlišením do mikrometru ($10^{-6}m$).

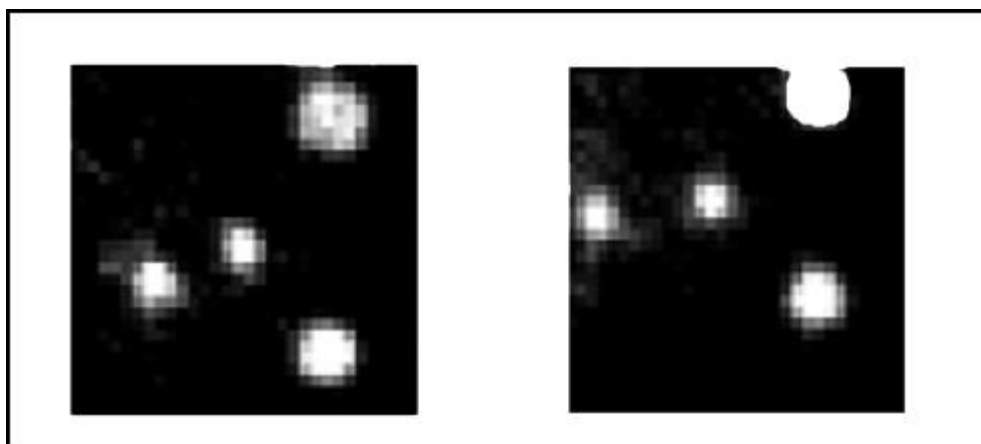
Princip metody PIV:

Paprsek laseru prosvítí proudící tekutinu krátkými pulzy (v méně náročných aplikacích může být použit i kontinuální laser), bez vlivu na proudění. V řezu určeném laserovým paprskem dojde k osvětlení značkovacích částic. Díky tomu zaznamenané značkovací částice odráží část světla do objektivu kamery. Kamera je postavena kolmo k laserovému řezu. Odraz od částic se zvětší v objektivu a světlo dopadne na CCD detektor foto kamery (viz Obr. 1.15). Kamera fotí s vysokou frekvencí (řádově 10^6 fps) pohyb všech částic v pozorované oblasti, která je limitovaná fyzikálními možnostmi kamery a objektivu [10].

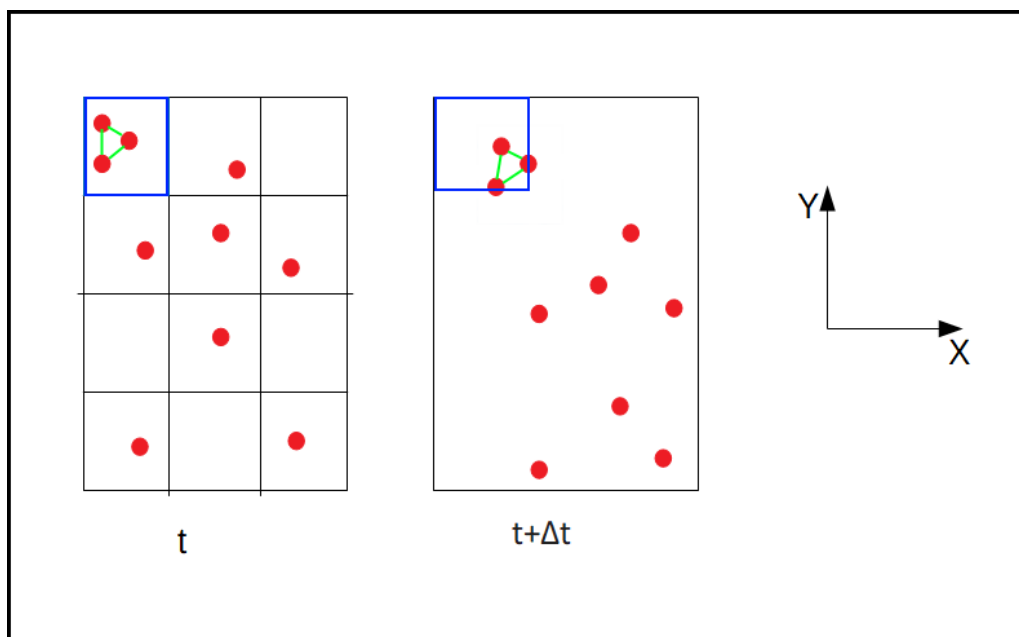


Obr. 1.17 Princip PIV metody [17]

Kamera pak udělá vysokofrekvenčně snímky s určitým intervalem mezi nimi. Pro vyhodnocení rychlostního pole existuje několik používaných algoritmů, například vzájemná (cross) a adaptivní (adaptive) korelace. Pro určení rychlostního profilu v experimentu se používá adaptivní korelace. Software porovnává polohu stejné částice na dvou po sobě jdoucích snímcích. Dal přes podíl posuvu částice za čas tohoto pohybu získáváme rychlost. Při vyhodnocování celého řezu se pole osvětlené tekutiny rozdělí na menší vyšetřovací oblasti (interrogation regions). Software zpracovává každou oblast zvlášť a výsledek se zprůměruje. V případě vzájemné korelace je síť menších vyšetřovacích oblastí nepohyblivá, což v případě adaptivní korelace není. V případě adaptivní korelace menší vyšetřovací oblasti se posouvají spolu s částicemi, aby se zabránilo chybě, pokud by došlo k odletu částice z obrazu díky unášení proudem [10].



Obr. 1.18 Zobrazení jedné vyšetřovací oblasti v různých časech. Je vidět posun částic mezi oběma snímky [10]

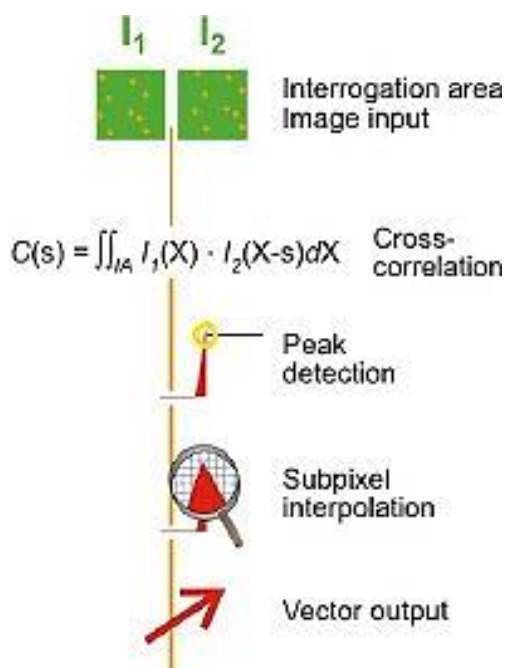


Obr. 1.19 Princip metody vzájemné korelace.

Pro určení rychlosti se používá vzorec

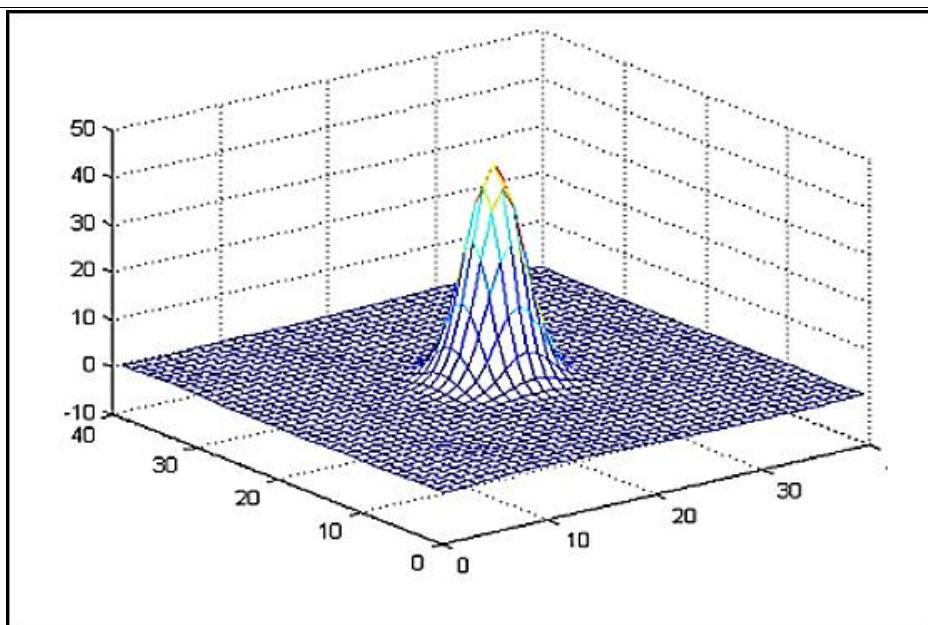
$$v = \sqrt{\left(\frac{d_x}{d_t}\right)^2 + \left(\frac{d_y}{d_t}\right)^2} \quad (26)$$

Po získání snímku a zprůměrování vyšetřovacích oblastí korelací se vygenerují data, ve kterých hledáme „vrcholy“ (signal peaks). To je způsob validace, která odstraňuje jednotlivé vektory na základě hodnot velikosti vrcholů (peaks) v korelovaném prostoru. Vrcholy určují průměrný posun částic ve vyšetřované oblasti a tedy i vektor rychlosti v daném směru. Při použití této funkce dostáváme poměr dvou nejvyšších vrcholů. Na velikosti poměru závisí kvalita vstupního signálů. Při větším poměru je vstupní signál lepší. Tento postup se opakuje pro každou dvojici snímku. Na obrázku níže je ukázka algoritmu vzájemné korelace:

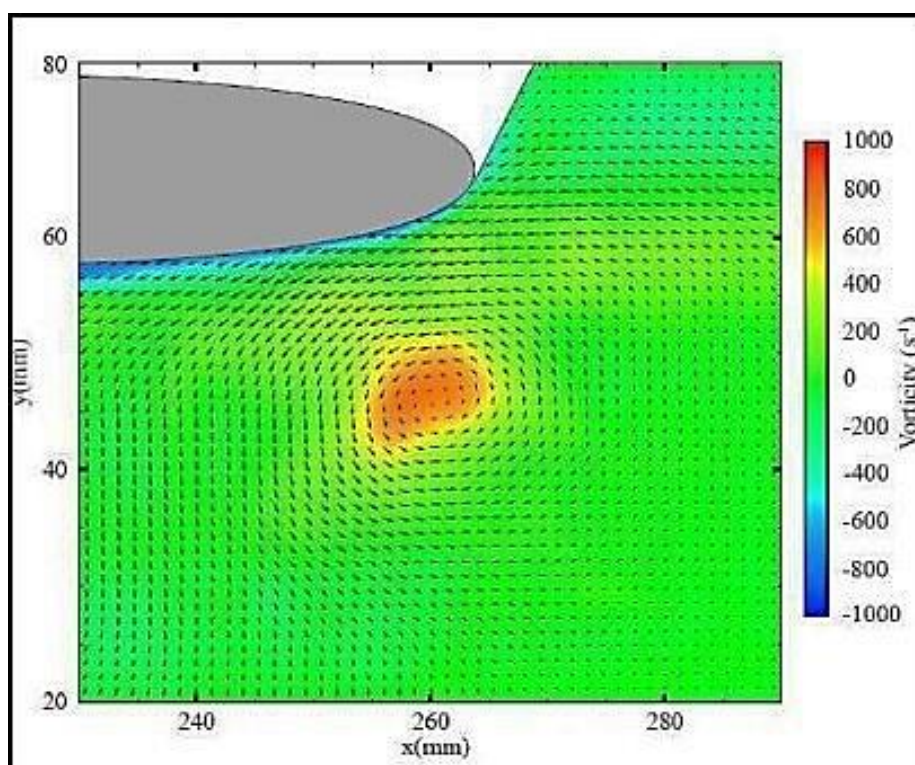


Obr. 1.20 Vzájemné korelace dvou oblastí pomocí [16]

Jako výsledek korelace dostaneme rychlostní pole. Šipky ukazují směr proudění v daném bodě a velikost šipky ukazuje velikost rychlosti v (m/s), případně může být velikost rychlosti zobrazena pomocí barevného pole (viz Obr. 1.20).



Obr. 1.21 Princip metody vzájemné korelace. Zpracování posuvu ve vyšetřovací oblasti, kde se zprůměruje rychlost částice a okolní šum. Z výsledku vychází vrchol. [10]



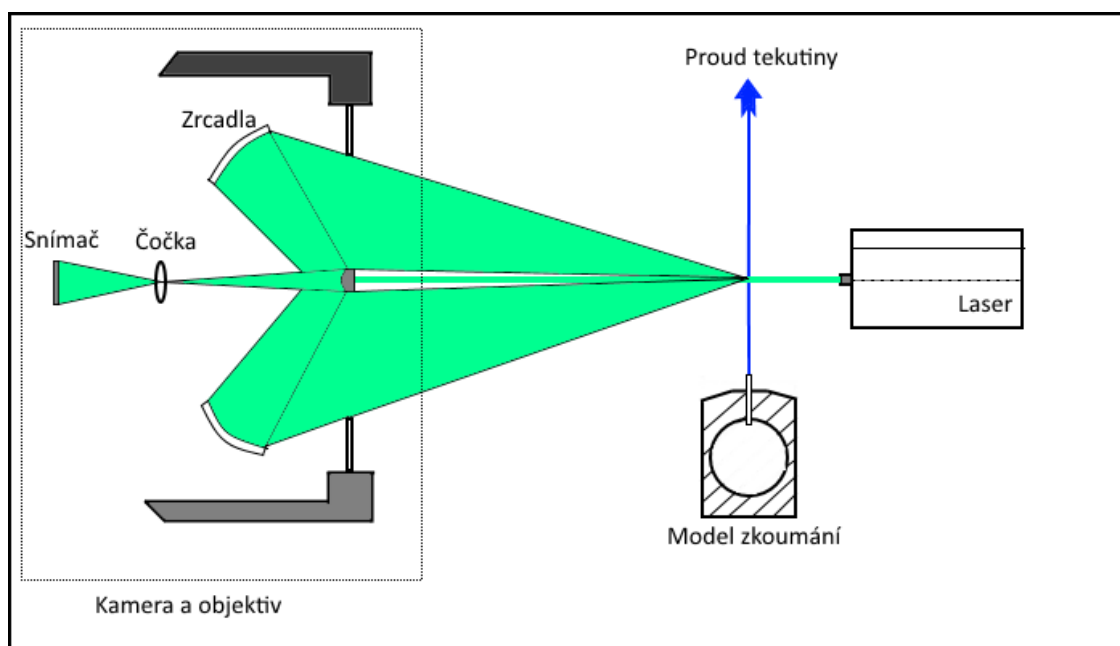
Obr. 1.22 Výsledek metody vzájemné korelace. Vektory ukazují směr. Jejich velikost je úměrná rychlosti.

1.6. Long-distance mikro PIV

Metoda long-distance mikro PIV je jedna z metod PIV. Zkoumaná oblast má rozlišení řádové $10^{-6}m$. Tato metoda potřebuje stejné vybavení jako klasická PIV metoda, což zahrnuje kameru (CCD nebo CMOS), počítač se softwarem pro zpracovávání výsledku

a zdroj světla (laser). Ale mikro PIV se od klasického PIV výrazně liší rozměrem testovacích částic a způsobem použití vybavení.

Zkoumaná oblast omezuje možnosti kamery a objektivu. Proto se používá speciální long-distance objektiv a přímý laserový paprsek jako zdroj světla. V klasickém PIV se pomocí optické soustavy upravuje světelný svazek do podoby širokého světelného listu, v mikro PIV laser svítí rovněž do zkoumané oblasti, aniž by byl rozptýlen. Částice rozptýlené v tekutině odráží část světla do objektivu, více na obr. 1.23. Software pak zpracovává snímky stejně jako v klasickém PIV. Další výrazný rozdíl je ve velikosti částice. Kvůli rozměru je částice náchylná na Brownův pohyb. Proto se minimální rozměr částice musí dodržet [4].



Obr. 1.23 Schematické zobrazení principu long-distance mikro PIV metody

Výběr částice

Nejpřesnější výsledek má být jasný a kontrastní. To je dosaženo za následujících podmínek:

- 1) Částice nezpůsobí ucpávání otvoru.
- 2) Částice přesně sledují tok tekutiny.
- 3) Částice jsou tak velké, že minimalizují působení Brownova pohybu (aktuální jenom pro případ Mikro PIV).
- 4) Částice nenaruší strukturu průtoku.

Klasická metoda PIV obvykle využívá např. polystyrenové, polypropylenové částice, hliníkové lupínky a olejové kapky (při zkoumání plynů). Jeden z hlavních důvodů použití těchto materiálů je jejich odlišný index lomu světla od okolního prostředí. Tyto materiály výše uvedené podmínky splňují. Je možné použít i částice se schopností fluorescence, tyto částice při dopadu světla emitují světlo jiné vlnové délky. Za použití vhodného filtru je tak možno eliminovat vliv odlesků na rozhraních různých prostředí.

U metody mikro PIV se v případě sledování proudění kapalin používají především fluorescenční částice. Tato metoda se používá pro plyné toky. Kvůli hustotě prostředí se používají pro značení jak fluorescentně, tak i nefluorescentně značené.

Fluorescentně značené částice jako vodní závěsy jsou ekonomicky dostupné. Několik výrobců (např. Duke Scientific) má k dispozici suché fluorescenční částice, ale pouze ve větších velikostech, větší než $7 \cdot 10^{-6} \text{m}$. Úspěšné výsledky byly zaznamenány za použití mlhy a kouře – jako nefluorescentní. Kromě toho je doba rozpadu emisí mnoha fluorescenčních molekul několik nanosekund, což může způsobit při vysokých rychlostech protékání pruhy na obrazu částic [5].

Průměr částic pro použití mikro-PIV musí být v rozmezí $100 \cdot 10^{-9}$ až $1 \cdot 10^{-6} \text{m}$. V případě použití kouře průměr částic je mezi $500 \cdot 10^{-9} \text{m}$ až $1 \cdot 10^{-6} \text{m}$. Návrh rozměru se volí podle zvolené metody osvětlení, pracovního průměru a z výpočtů pro Brownův pohyb.

Při použití Nd:YAG laseru, kde je vlnová délka $532 \cdot 10^{-9} \text{m}$, běžně se používá $500 \cdot 10^{-9} \text{m}$ až $1 \cdot 10^{-6} \text{m}$. Při použití částic s menším průměrem se laserové světlo nepoužívá (neviditelný odraz světla). Proto se používá fluorescentní částice s průměrem $100 - 300 \cdot 10^{-9} \text{m}$ a speciální metodika osvětlení. Částice by měly být zobrazeny s vysokou číselnou aperturou (NA) difrakčně omezenou optikou a s dostatečně velkým zvětšením tak, aby měly na obrazovce v průměru dva až čtyři pixely [10].

Efektivní průměr d_e zobrazované částice se počítá ze vztahu

$$d_e = [d_s^2 + M^2 d_p^2]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

Zde d_s -je difrakčně omezený průměr částice, který odráží světlo; d_p -průměr částice; M-zvětšení objektivu

$$d_s = 2.44(M + 1)f\lambda \quad (28)$$

kde f -je ohnisková vzdálenost; λ -vlnová délka dopadajícího světla

Brownův pohyb

Když je velikost částic příliš malá, skupinový účinek srážek mezi částicemi a malým počtem molekul kapaliny je nevyvážený, což zabraňuje tomu, aby částice pevně sledovaly tok. Tento jev se nazývá Brownův pohyb. Má dva škodlivé důsledky pro mikro PIV: jeden způsobuje chybu v měření rychlosti proudění, druhý způsobuje nejistotu v umístění testovacích částic.

Při Brownovom pohybu se molekuly vlivem tepelného pohybu neustále srážejí, přičemž směr a síla těchto srážek jsou náhodné, proto je i okamžitá poloha částice náhodná. Pohyb je výsledkem srážek mezi molekulami tekutiny a suspendovanými mikročásticemi. Aby byl zmenšen vliv tohoto děje, potřebujeme zvolit správný průměr částic. V časových intervalech Δt , které jsou mnohem větší než doba odezvy setrvačnosti částic, je dynamika Brownova posunu nezávislá na parametrech, jako je hustota částic a kapalin a střední čtvercová vzdálenost difuze je úměrná difuznímu koeficientu částice D . Pro sférické částice byl koeficient difuze D poprvé uveden Einsteinem:

$$D = \frac{K \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \quad (29)$$

kde K -je Boltzmannova konstanta; T -absolutní teplota; η -dynamická viskozita tekutiny; d_p - průměr testovací částice

$$\Delta x^2 = 2 \cdot D \cdot \tau \quad (\text{Fickův zákon}) \quad (30)$$

Δx^2 -střední projekce posuvů částice na libovolnou osu.

τ - čas mezi dvěma srážkami.

Pro ideální posuv částice za čas Δt v rovinách x, y platí:

$$\Delta x = u \cdot \Delta t \quad (31)$$

$$\Delta y = v \cdot \Delta t \quad (32)$$

kde u, v jsou časové zprůměrované rychlosti v osách x, y.

Relativní chyba posuvu v osách je dána vztahem

$$\text{v ose x: } \varepsilon_x = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (33)$$

$$\text{v ose y: } \varepsilon_y = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (34)$$

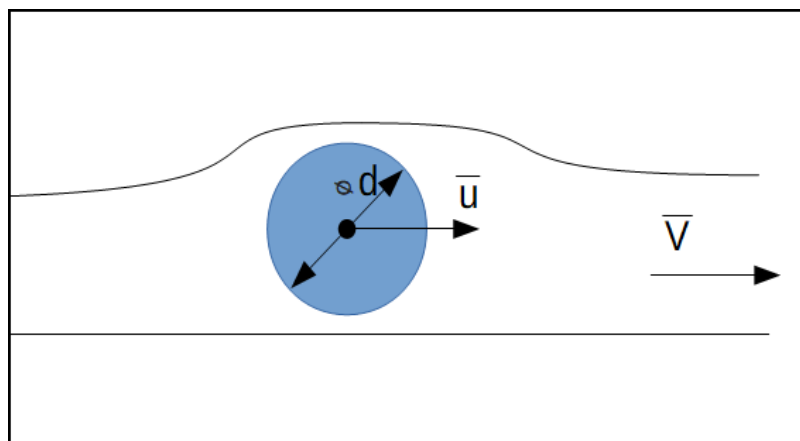
kde v - rychlost v ose Y, u - rychlost v ose X, D - průměr částice, Δt - časová hranice pro relativní chybu.

Tato relativní Brownova chyba stanoví časovou hranici Δt . Ze vztahu je vidět, že při zvýšení Δt klesá relativní chyba. Nicméně, delší Δt sníží přesnost výsledků, protože měření PIV jsou založena na zprůměrování rychlosti prvního řádu.

Další zvláštnost ve vztahu je to, že při vysokých rychlostech se vliv Brownova pohybu moc neuvažuje [10].

Doba odezvy (Response time).

Doba odezvy určuje čas, za který částice z počátečního stavu $t = 0$ [s] urychlený z rychlosti $u = 0$ [m/s] do rychlosti $u = V$, kde rychlost u – okamžitá rychlost částice a V – konstantní rychlost průtoku (Viz obr.1.22).



Obr. 1.24 Schematické zobrazení částice pohybující v tekutině

Částice v čase $t = 0$ m/s má rychlost $u = 0$ m/s a průtok má rychlost $V = \text{konst.}$ Pro tento případ po uvolnění bude vztah výslednici sil.

$$m \frac{du}{dt} = F = 3 \cdot \eta \cdot \pi \cdot d \cdot (V - u) \quad (35)$$

$$\frac{\rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3}{3} \cdot \frac{du}{dt} = 3 \cdot \eta \cdot \pi \cdot d_p \cdot (V - u) \quad (36)$$

u – rychlost částice, V – rychlost toku tekutiny; η - dynamická viskozita tekutiny; ρ - hustota částice

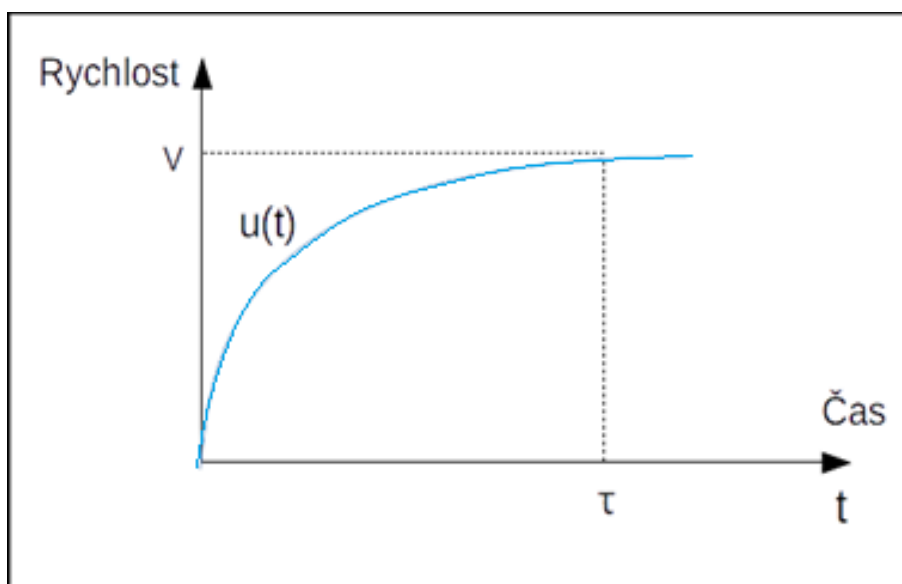
$$\frac{\rho \cdot d^2}{18 \cdot \eta} \cdot \frac{du}{dt} = V - u \quad (37)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{V - u}{\tau} \quad (38)$$

kde τ - je doba odezvy

$$\tau = \frac{\rho \cdot d^2}{18 \cdot \eta} \quad (39)$$

$$u(t) = V \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (40)$$



Obr. 1.25 Graf závislosti rychlosti pohybu částice na čase.

U typického mikro PIV experimentu jsou částice o průměru 300 nm z polystyrenových latexových koulí ponořených do vody a čas odezvy mají $1 \cdot 10^{-9}$ sekundy.

Tento čas odezvy je menší než časové měřítko libovolného realistického průtoku kapaliny nebo proudění plynu (tj. až $10 \cdot 10^{-9}$ s) [10].

Hloubka ostrosti

Přesnost zjištěného rychlostního pole přímo závisí na kvalitě snímků, ze kterých se určuje rychlostní pole.

Světelný paprsek má dva důležité efekty – minimalizuje šum pozadí a zajišťuje, že každá viditelná částice v kameře se nachází na ohniskové vzdálenosti. Nicméně, v mikro PIV díky mikroskopické délkové stupnici a omezenému optickému přístupu se na rozdíl od klasického PIV vyžadují objemové osvětlení částic. Experimenty používající techniku mikro PIV musí být navrženy tak, aby bylo možno pozorovat kvalitní obrazy částic i za přítomnosti světla mimo ohniskovou oblast a odrazy od povrchů zkušebních kanálů. Aby byl tok tekutiny osvětlen prostorově, existují dva způsoby – pomocí optických systémů s hloubkou ostrosti kamery větší nebo menší než hloubka mikro kanálu. Oba tyto způsoby se používají v mikro PIV.

Výhoda použití metody s větší hloubkou ostrosti je v tom, že všechny částice, které se nachází ve vyšetřované oblasti jsou dobře viditelné a zpracovatelné adaptivní korelací. Nevýhoda této metody je v tom, že znalost polohy (hloubky) každé částice je ztracená. Ve výsledku má rychlostní pole zprůměrovanou hloubku mikro kanálu. Například kdyby byl měřen průtok způsobený tlakem, očekávali bychom parabolický profil rychlosti. Rychle se pohybující částice nejbliž k centru jsou stejně zaostřeny jako částice pohybující se vedle stěny s menší rychlostí. Změřená rychlost bude zprůměrovaná od všech jednotlivých rychlostí. Což není přesné.

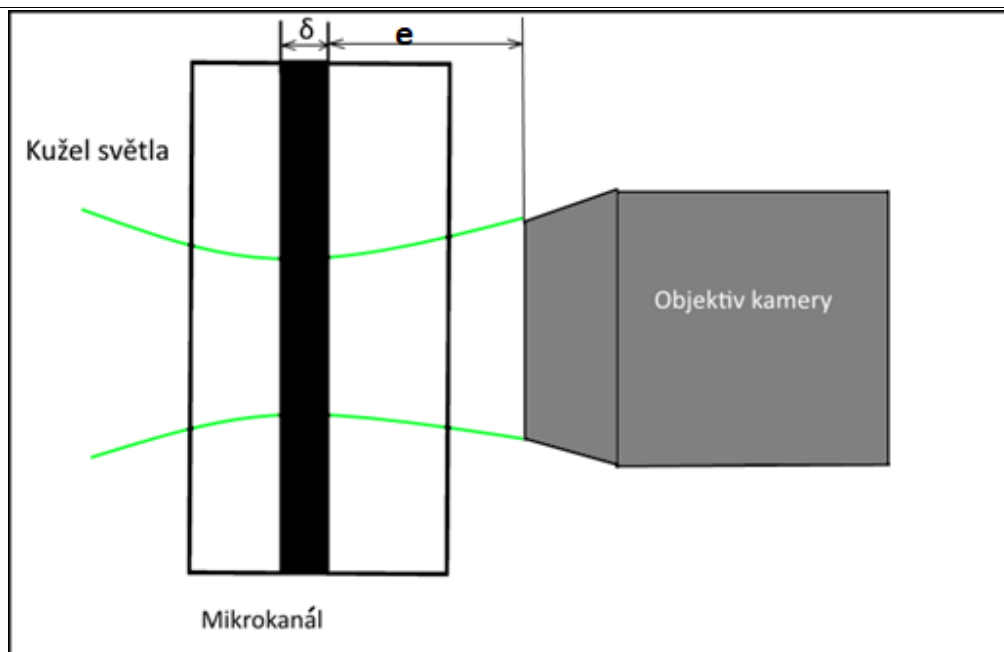
Druhý způsob vysvětluje fakt, že hloubka ostrosti je menší než hloubka mikro kanálu. Proto jsou částice dobře viditelné jenom v hloubce δ (viz Obr. 2.7.). Je velmi důležité znát δ , ale také je důležité znát hloubku korelace z_{kor} . Hloubka korelace říká jak daleko od fokální polohy se musí nacházet částice, aby její rychlost měla vliv na funkci korelace.

Pro hloubku ostrosti platí vztah:

$$u(t) = V \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (40)$$

$$\delta = \frac{n \cdot \lambda_0}{NA^2} + \frac{n \cdot e}{NA \cdot M} \quad (41)$$

kde e – je nejmenší vzdálenost, kterou je schopen snímat detektor umístěný v ploše snímku (v případě CCD – kamery e je vzdálenost mezi pixely), NA -numerická apertura čočky, n -index lomu prostředí, M - zvětšení objektivu, λ_0 - vlnová délka laseru. (Viz Obr. 2.7.)



Obr. 1.26 Schématické zobrazení hloubky ostrosti [10]

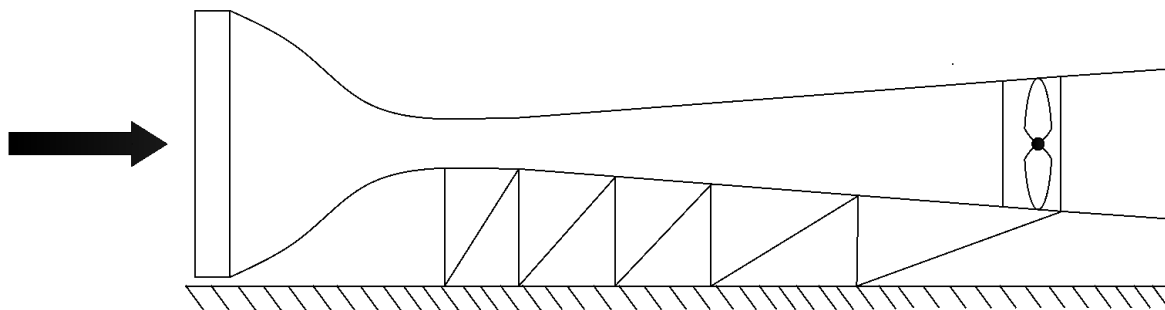
Experimenty s technikou mikro PIV musí být navrženy tak, aby se snadno detekovaly částice v hloubce ostrosti za působení nežádoucího světla od povrchu kanálu a částic mimo hloubku ostrosti. Světlo odražené od povrchu kanálu lze snadno odstranit pomocí použití fluorescenčních částic, které odráží jinou vlnovou délku a pomocí filtru i konfokálního mikroskopu se oddělí od šumu [10].

1.7. Aerodynamický tunel

Při zkoumání vlastností jakéhokoliv profilu tělesa, které obtéká tekutina, se běžně používají aerodynamické tunely. Tunely existují různých typů – pro zkoumání podzvukových a nadzvukových rychlostí při teplotách atmosféry, v různých výškách, mohou být velké (od 6 m^2)

Existuje dva typy aerodynamických tunelů: otevřený(přímý) a zavřený(cirkulační).

Otevřený (přímý)



Obr. 1.27 Otevřený aerodynamický tunel [3]

Výhody otevřeného tunelu:

a) nízké náklady.

b) nejsou problémy s realizací sání a výfuku do tunelu.

Nevýhody otevřeného tunelu:

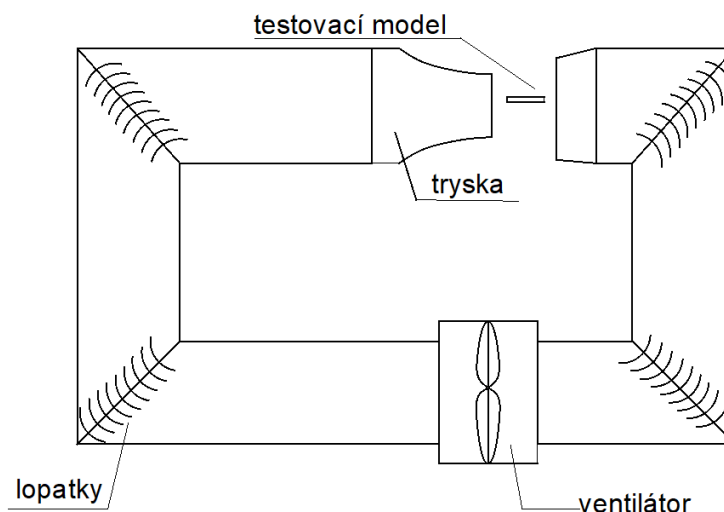
a) Komplikování návrh místnosti, kde se nachází tunel. Dostatečné místo pro sání a výfuk. Při měření s vlivem venkovní atmosféry je třeba brát v úvahu vlhkost vzduchu a kondenzaci.

b) V závislosti na rozměru a rychlosti proudění je velká spotřeba energie.

c) Hlučnost u větších tunelů (od 6 m^2) - může být omezena pracovní doba kvůli silnému hluku.

Díky nízkým nákladům jsou populární pro experimenty na středních a vysokých školách. Není potřeba zajišťovat úklid a tyto tunely se dají instalovat v učebnách [3].

Uzavřený (cirkulační)



Obr. 1.28 Uzavřený aerodynamický tunel [3]

Výhody uzavřeného tunelu:

a) Nezávislost na okolním prostředí a díky lopatkám i mřížím se dá dobře upravovat kvalita průtoku.

b) Menší spotřeba energie oproti otevřeným tunelům.

c) Menší hlučnost, a proto je možná delší pracovní doba.

Nevýhody uzavřeného tunelu:

a) Vysoká cena oproti otevřeným tunelům.

b) Při použití kouře nebo vnitřního spalovacího motoru nutno připojit čisticí kanál.

c) Pokud se tunel používá často (pět, šest krát týdně), je nutné zajistit výměnu vzduchu nebo chlazení tunelu [3].

2. Návrh experimentu

Zájem o zjištění vlivu drsnosti na rychlostní profil obtékané desky mne inspiroval k postavení experimentu pro použití metody mikro PIV, protože teoretické znalosti nebyly postačující. V dalších podkapitolách jsou uvedeny: výběr modelu obtékání, postavení tunelu, návrh experimentální trati a výsledky.

2.1 Volba měřeného modelu

Z praktického hlediska vliv drsnosti na rychlostní profil nejnázne popisuje experiment s deskou. Rozměr desky byl zvolen s ohledem na možnosti měřicí optiky. Objektiv Questar je schopen změřit oblast s maximální velikostí 2x2 mm. Pro zkoumání vlivu drsnosti, ale i sledování vývoje mezní vrstvy po délce desky byla zvolena deska o rozměru 192x35 mm. Pro eliminaci vlivu okraje byla vybrána šířka desky 2 mm. Příčný rozměr desky byl zvolen s ohledem na eliminaci vlivu okrajových jevů.



Obr. 2.1 Pohled shora na obtékanou desku

2.2 Aerodynamický tunel

Podle zkoumaného modelu a s ohledem na poznatky literatury [1] byl navržen zavřený aerodynamický tunel (viz. Obr. 2.1).

Tunel obsahuje trysku, difuzor a lopatky v rozích.

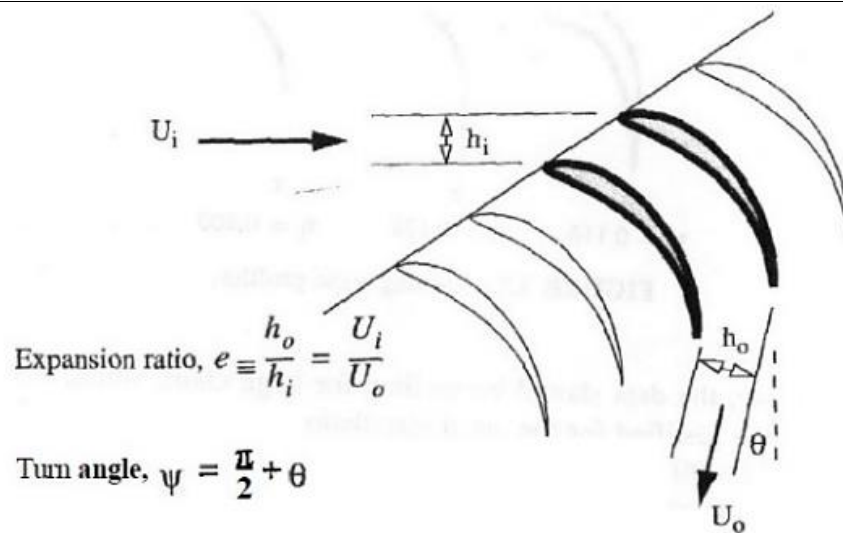


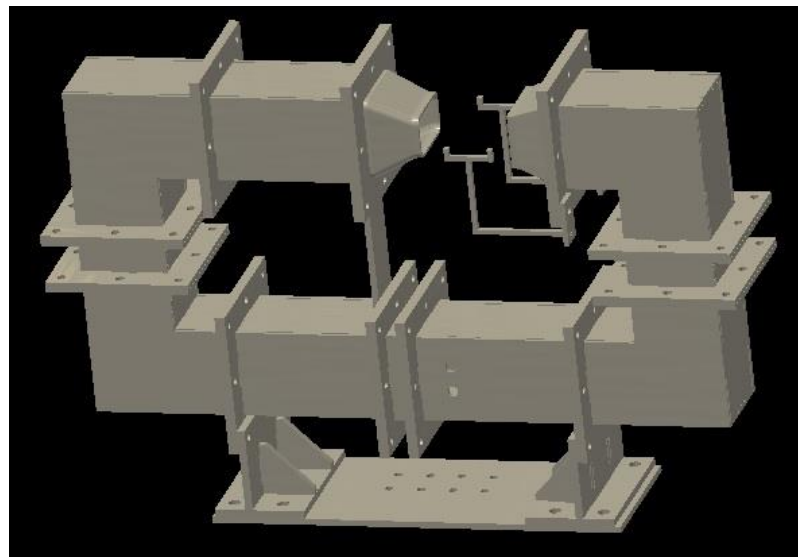
FIGURE 36 Geometry of cascade flow with area change from entrance to exit.

Obr. 2.2 Tvar lopatky použitý v experimentu [3]

Lopatky se používají k eliminaci velkých ztrát v rozích tunelu. Instalují se do kaskády.

Difuzor se používá pro snížení rychlosti vstupního proudu pomocí energetických ztrát při změně průřezu a tření na povrchu difuzoru. Důležitější parametry difuzoru jsou poměr ploch výstupní k vstupní a úhel rozšiřování. Instalují do tunelu tak, aby se průřez postupně zvětšoval ve směru proudu [3].

Tryska se používá pro zrychlení proudu ve směru proudění a k usměrnění toku tekutiny.



Obr. 2.3 Model navrženého tunelu vytvořený v programu Autodesk

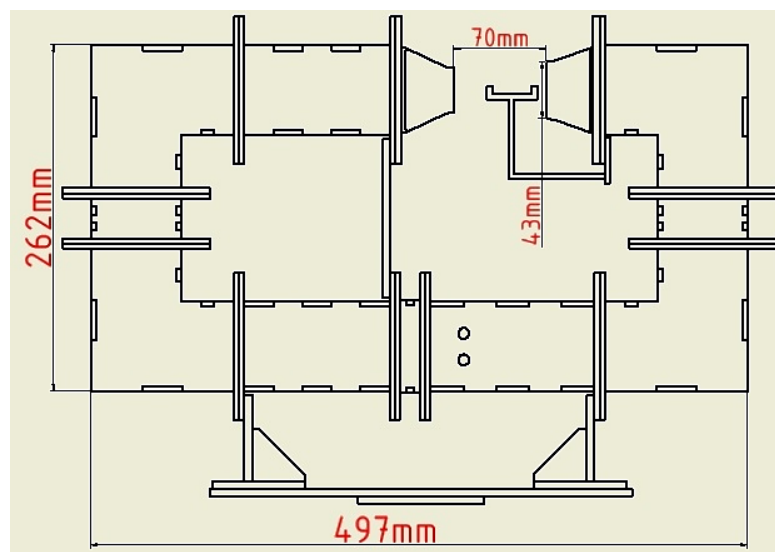
Výroba a montáž jednotlivých dílů

Tunel je sestaven z plexiskla a některé díly jsou z PAJet plastu.

Plexisklo (polymethylmethakrylát) je syntetický polymer s vlastnostmi termoplastu. Jeho hustota je 1190 kg/m^3 , teplota tavení $160 \text{ }^\circ\text{C}$.

Významnými vlastnostmi plexiskla jsou průhlednost, odolnost vůči vodě a zředěným kyselinám, tvrdost a dobrá obrobiteľnosť. Je zdravotně nezávadný a může být lehce spojován lepidlem. Při porovnání se sklem má lepší ohebnost, odolnost vůči nárazům a jsou nižší pořizovací náklady.

Nevýhodou tohoto materiálu je nízká povrchová tvrdost, lehce se poškrábe. V experimentu je z toho materiálu vyroben celý tunel, včetně držáku.



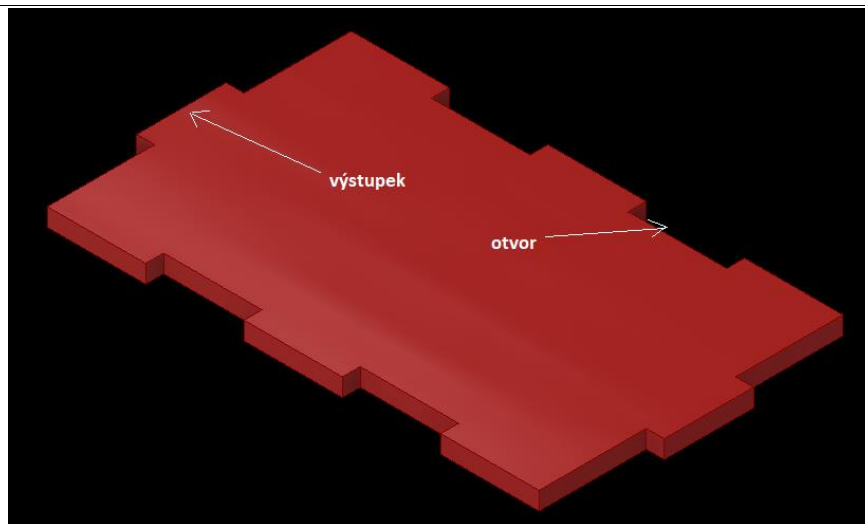
Obr. 2.4 Rozměry tunelu

Druhým nejpoužívanějším materiálem je PAJet. Z toho materiálu jsou vyrobeny lopatky, difuzor a tryska.

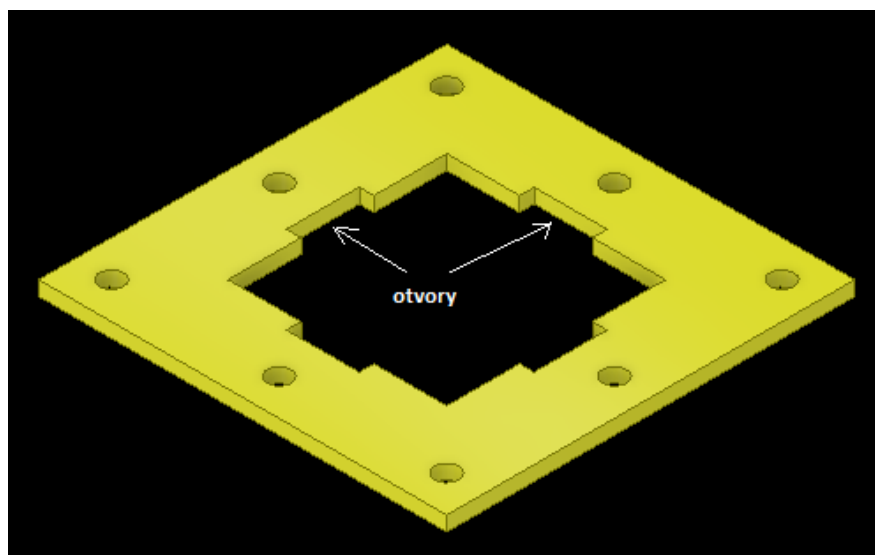
PAJet je složen z polyamidu 12, amidických skupin o určitém počtu v makro molekule. Tento počet skupin při polymeraci dává PAJetu vlastnosti vhodné pro tisk geometrické náročnějších dílů. Vlastnosti tohoto tiskového média jsou specifické oproti běžným materiálům. Je to vyšší tepelná odolnost do $160 \text{ }^\circ\text{C}$, vyšší rázová houževnatost a vysoká odolnost vůči oděru. Teplota tisku je $235 \text{ }^\circ\text{C}$ a hustota 1010 kg/m^3 . V rámci experimentu byla potřeba mít hladký povrch v místě, kde dochází k výtoku a vtoku i změně směru proudění. Ten materiál díky vysoké kvalitě tisku splnil tuto podmínku, ale bylo třeba přidat operaci broušení.

Tvar desek, které tvoří tělo tunelu, obsahuje otvory a výstupky ve formě obdélníku. Výstupky se pak vkládají do určitých otvorů. To zajišťuje pevný spoj a snadnou montáž. Desky se spojí kolmo, což určí obdélníkový průřez tunelu.

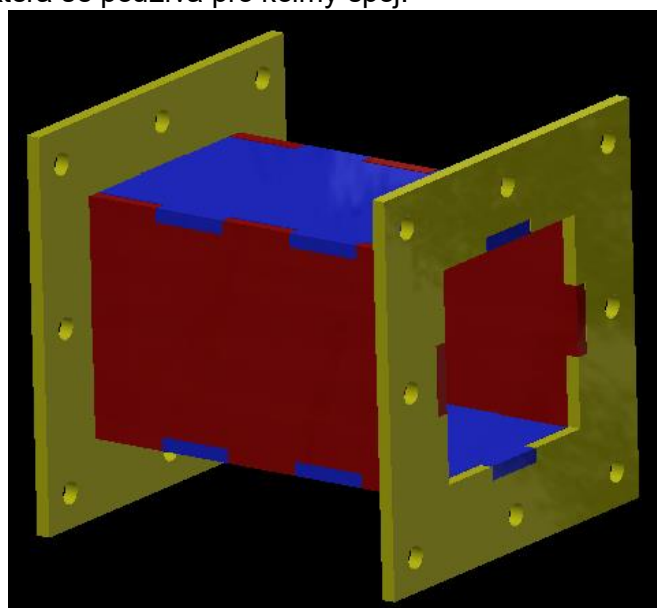
Desky, které mají pouze otvory se spojují kolmo k průřezu a dále se spojují s dalšími bloky pomocí šroubů a matic.



Obr. 2.5 Tvar desky, ze které se skládá tělo tunelu



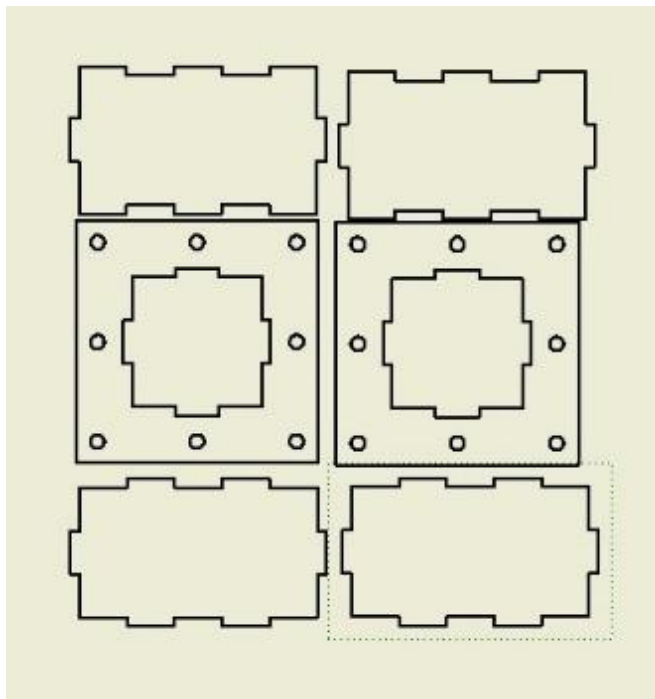
Obr. 2.6 Tvar desky, která se používá pro kolmý spoj.



Obr. 2.7 Segment tunelu

Desky jsou vypálené laserem z listu plexiskla o šířce 4 až 6 mm. Výkres pro model vypalování se exportuje z CAD programu do formátu DXF. Tento formát je čitelný pro laserový stroj, přičemž geometrie z výkresu se přenese na list plexiskla. Na tomto stroji byly vypáleny desky s potřebnou přesností.

Pro nepropustnost a pevnost spojů se používá lepidlo ACRIFIX 1S0116, které se nanese na stykové hrany. Doba tvrdnutí je přibližně 10 až 15 minut.



Obr. 2.8 Ukázka výkresu pro vypálení na laseru

Design lopatky je použit z odborné literatury [3]. Lopatky jsou vytištěny na 3D tiskárně.

3D tisk je proces, při kterém se z digitální podoby (3D model) vytváří fyzický model. Jednotlivé vrstvy materiálu se na sebe nanášejí tavením plastové struny, která je namotaná na cívce. Tato struna se vtlačuje do hlavy s tryskou, kde se roztaví a tryskou se postupně nanáší vrstvu po vrstvě na desku.

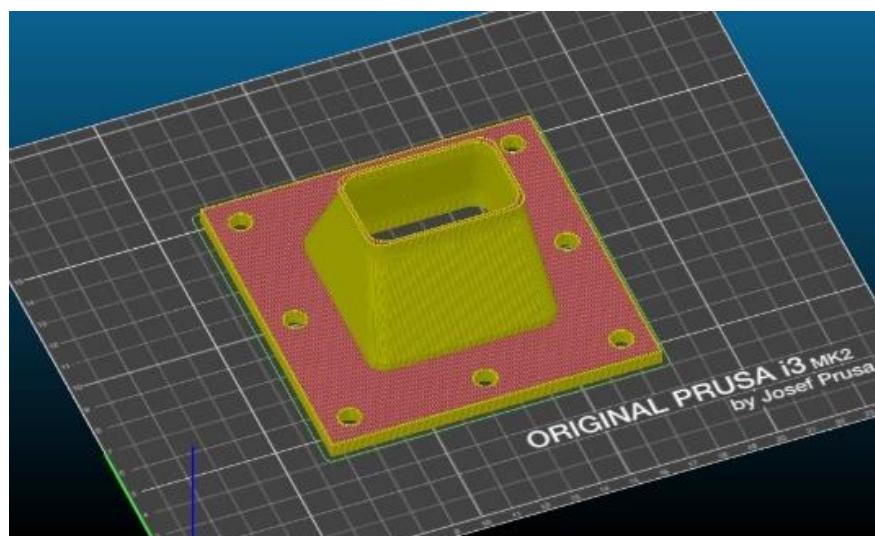
Pro tisk je použit materiál PAJet. Po tisku byly lopatky povrchově upraveny brusným papírem na potřebnou hladkost povrchu.



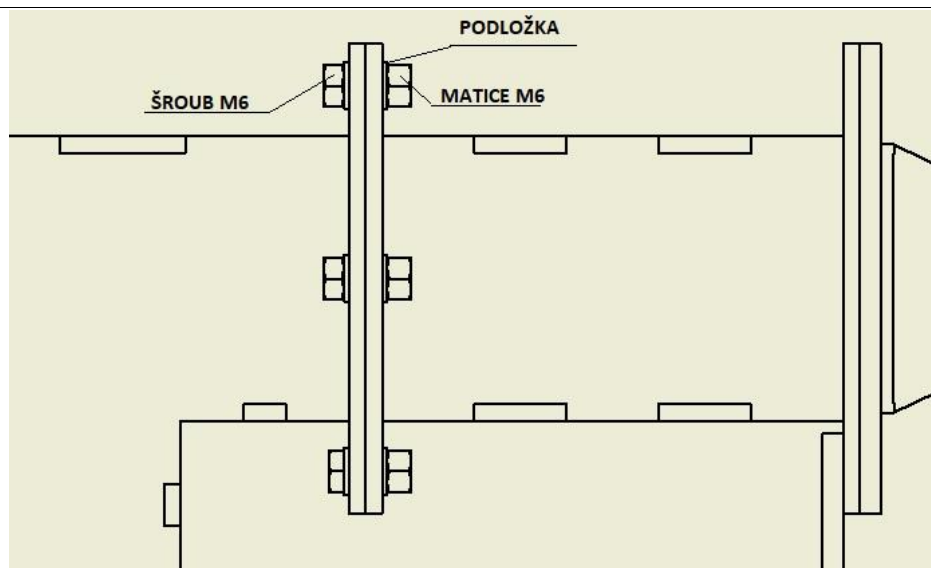
Obr. 2.9 3D tiskárna Prusa i3 MKII [15]

Difuzor a tryska jsou také vytisknuty z materiálu PAJet. Po tisku, stejně jako lopatky, se odbrousí brusným papírem. Jejich geometrie je taky podle literatury [3].

Průřez difuzoru a trysky v celé délce je obdélníkový, ale má různé rozměry.

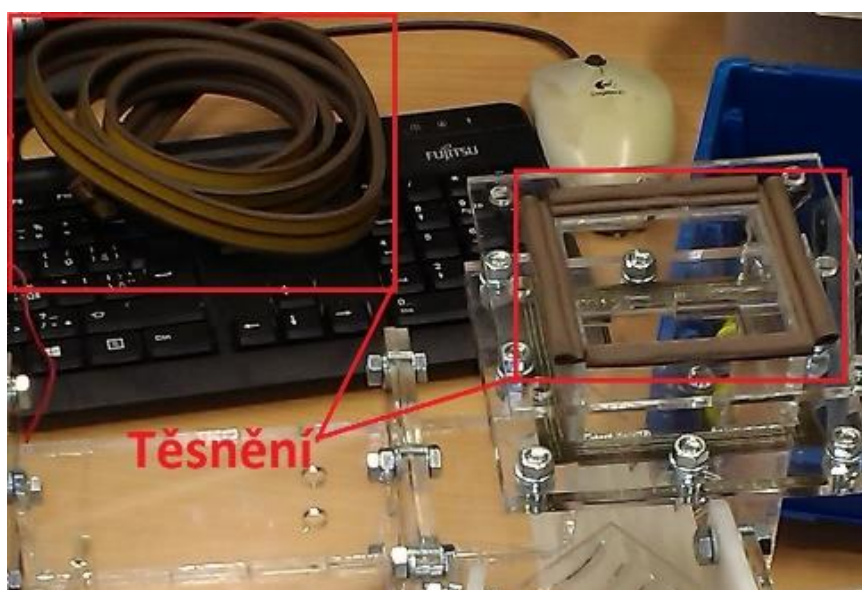


Obr. 2.10 Pohled na trysku v programu 3D Slicer. Růžová oblast se skládá z jednotlivých vrstev. Pro spoj jednotlivých bloků a části spojovací desky mají otvory s dírami průměr 6 mm. Jsou spojovány pomocí šroubu, matic a podložek.



Obr. 2.11 Spoje dvou segmentu jsou spojeny pomocí matic, podložek a šroubů.

Mezi segmenty tunelu bylo vloženo samolepicí těsnění, protože spojované plochy nejsou ideálně rovné. Vzduch uniká skrz štěrbinu a těsnění zabezpečí hermetizaci.



Obr. 2.12 Samolepicí těsnění

2.3. Experimentální trať

Pro ustavení polohy laseru a tunelu se používají tzv. posuvné plošiny. Tunel a laser jsou připojeny k vysoce přesné jedno-osové posuvné plošině se zkříženými válečky.



Obr. 2.13 Posuvná plošina [14]

Plošiny zajišťují rovnoměrný a přesný posuv v jednotlivých směrech. Existují složitější plošiny, které umožňují posuv ve dvou a více směrech. Materiál plošin je slitina hliníku. Plošina má otvory pro šrouby, kterými se spojí s objektem, což zajistí silný spoj s celou konstrukcí.

Posuvná plošina tunelu na obrázku 2.13 zajišťuje pohyb tunelu ve vodorovné ose a posuvná plošina na obrázku 2.14 zajišťuje pohyb tunelu ve svislé ose.



Obr. 2.14 Posuvná plošina ve vodorovné ose

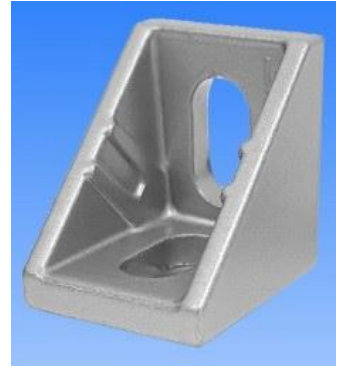


Obr. 2.15 Posuvná plošina ve svislé ose

Konstrukce je složena z hliníkových profilů s T drážkami různých délek. Stabilitu a pevnost celé soustavy zajistí spoj profilu kolmo k sobě pomocí úhelníkových upínacích sad, které jsou připevněny k profilům pomocí šroubů a matic. Takové spoje tvoří kostru celé experimentální trati. Na kostru se připojí všechny objekty potřebné pro měření.

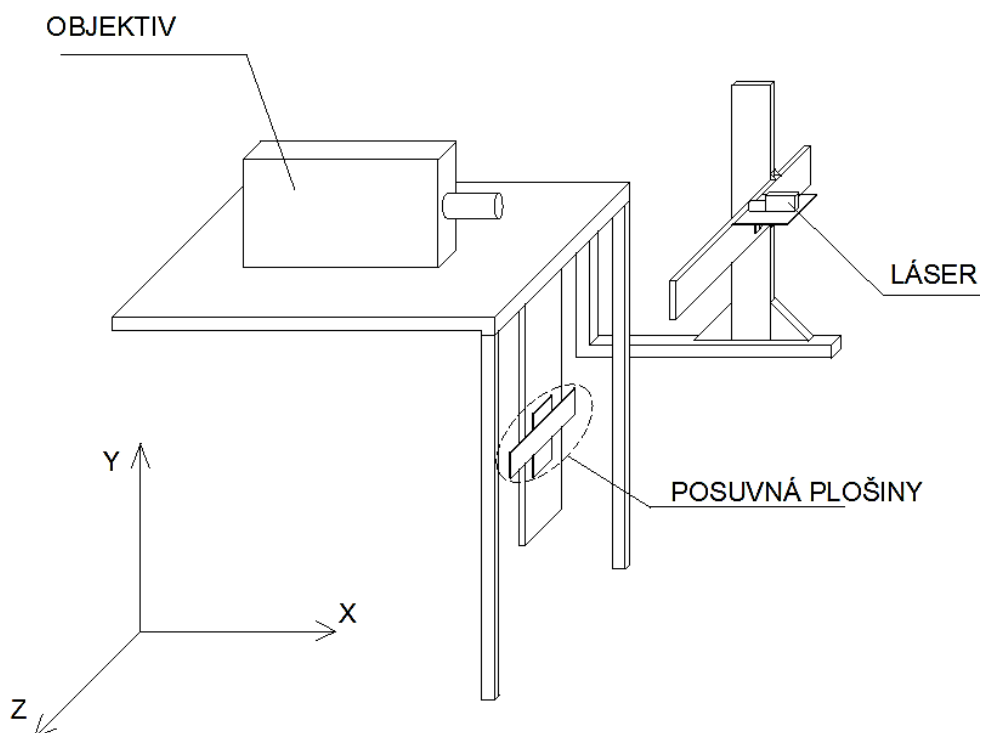


Obr. 2.16 Hliníkový profil s T drážkami [13]



Obr. 2.17 Úhelníkový upínací prvek [13]

Objektiv je uchycen pomoci šroubů na upínací ocelové desce, která je nepohyblivě zafixovaná ke kostře konstrukce. Kamera je spojena s objektivem soustavou optických propojovacích komponent. Velmi důležité bylo dosáhnout souměrnosti mezi otvorem kamery a objektivem, protože souosost mezi nimi se projevuje na kvalitě snímku.



Obr. 2.18 Schéma experimentální trati

Na schématu je ukázán objektiv Questar FR-1 MKIII. Jedná se o long-distance objektiv s ohniskovou vzdáleností 914 mm. Má ovládací kolečko pro zaostření.

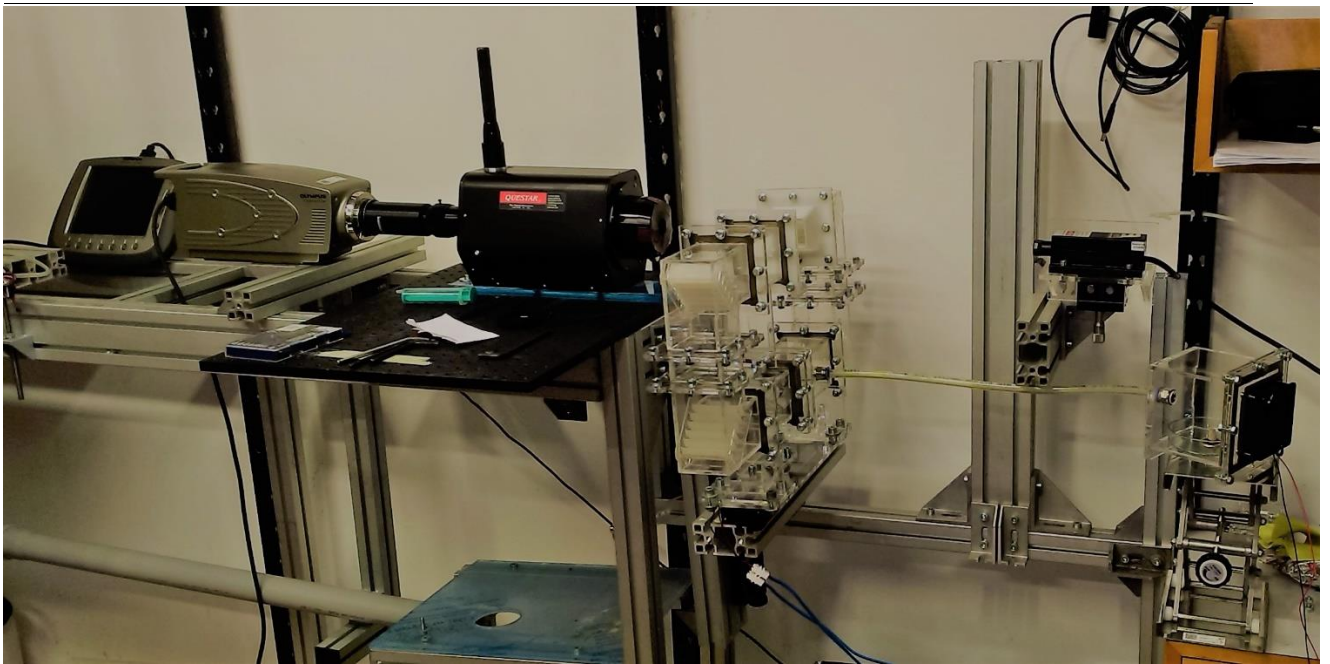


Obr. 2.19 Objektiv Questar FR-1 MKIII [12]

Kamera Olympus i-Speed DF má maximální snímkovací frekvenci 150 000 fps. Kamera se ovládá pomocí obrazovky s tlačítky. Snímky se mohou ukládat na paměťovou kartu a přenést do počítače.



Obr. 2.20 Kamera Olympus i-Speed DF [11]



Obr. 2.21 Fotografie experimentální trati

3. Provedení experimentu

Před zahájením samotného experimentu je třeba zkontrolovat splnění následujících požadavků:

- 1) Ventilátor zajišťuje optimální průtok vzduchu tunelem
- 2) Kouř použitý pro vizualizaci obsahuje vhodné množství částic, pomocí nichž bude možné vyhodnotit rychlostní pole
- 3) Objektiv je správně zaostřen do měřené oblasti
- 4) Správná poloha laseru vůči objektivu – laser musí svítit do ohniska objektivu
- 5) Správná poloha sledovaného předmětu – předmět se musí nacházet v ohnisku objektivu a současně být nasvícen laserem

Kroky experimentu

Pro splnění prvního bodu byl použit ventilátor pro chlazení procesoru počítače velikosti 60x60x10. Napájecí napětí max. 12 V. Při napětí 2.9 V ventilátor zajišťuje dostačující průtok. Na začátku experimentu byl použit druhý ventilátor v kombinaci s výše uvedeným. Druhý ventilátor byl větších rozměrů a byl součástí kouřové komory, ta byla propojená s tunelem. Do komory byl z venku ventilátorem nasáván vzduch. Kouř dál postupoval přes hadici do tunelu, kde už proudil vzduch pohaněný menším ventilátorem. Tento způsob sycení tunelu kouřem nebyl však úspěšný.

Řešením úkolu bylo odstranění většího ventilátoru z trati. Vytvoření otvoru v místě připojení hadice od komory s kouřem. Velikost otvoru odpovídala velikosti zdroje kouře. Ten otvor byl zaslepen. Po dalších pokusech byla dosažena dostačující hustota částic v průtoku. Napětí na ventilátoru (2.9 V) bylo nastaveno s ohledem na rozlišovací schopnost kamery.

Na začátku experimentu byly použity aromatické tyčinky. Tyčinky vytvářely vizuálně dostatečnou hustotu, ale při použití v tunelu hustota rychle klesala. Bod 2) experimentu byl splněn za použití kouře z aromatického kuželu (vánoční František). Hustota a kvalita takto generovaných kouřových částic byla pro experiment vyhovující. Díky svému kuželovitému tvaru se lehce instaloval do tunelu.

Objektiv „Questar“, který byl použit v experimentu, má speciální nástroj pro zaostření. Je to žlutý světelný bod, který svítí před objektivem a je viditelný, když svítí na předmět v místě budoucího zkoumání. Snímek budoucího objektu je zaostřený tam, kde je zaostřený bod světla. Jinak je potřeba otáčet rotačním kolečkem na objektivu, dokud nebude bod zaostřený.

Dalším krokem je správně nastavení laseru vůči objektivu. Laser musí svítit do stejného bodu jako světelný paprsek znázorňující polohu ohniska. Když tato podmínka není splněna, laser bude směřovat mimo místo zkoumání. Proto je velmi důležité nastavit polohu laseru správně.

Poslední krok úspěšného splnění experimentu spočívá ve správně zvolené měřicí oblasti. Oblast se musí nacházet v těsné blízkosti obtékaného objektu, aby byl jeho vliv pozorovatelný.

Měřené varianty

Splnění cílů bakalářské práce vyžadovalo provedení experimentu s následujícími variantami obtékaných objektů:

Vyřešení úkolu bakalářské práce vyžádalo provedení následujících variant:

- a) Měření desky s hladkým povrchem (viz. Obr. 3.1)
- b) Měření desky s drsným povrchem (viz. Obr. 3.2)



Obr. 3.1 Hladká deska



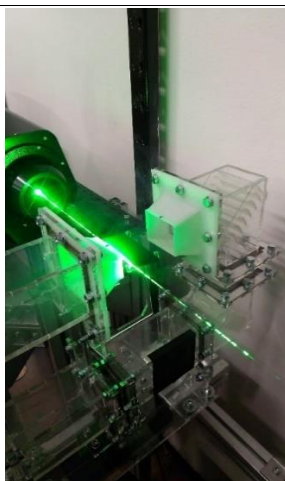
Obr. 3.2 Drsná deska

V případě hladké desky se předpokládá pozorování rovnoměrného nárůstu rychlosti proudu směrem od povrchu a stejný nárůst mezní vrstvy.

První měřicí deska v rámci experimentu byla hladká.

Porovnání dvou desek s různou drsností povrchu se provedlo ve vzdálenosti 9 mm od náběžné hrany ve vzdálenosti 900 μm od desky. V případě drsné desky nebylo možné provést měření ve vzdálenosti menší než 900 μm kvůli odleskům.

Zvlášť byla změřena hladká deska ve třech vzdálenostech 300 μm , 600 μm a 900 μm .

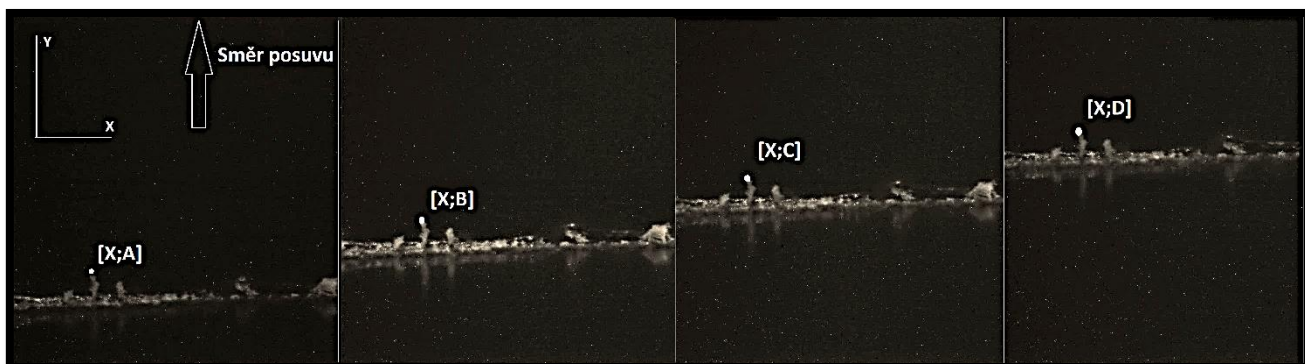


Obr. 3.3 Laserem osvětlená vyšetřovaná oblast

Kalibrace

Každému pixelu získaného obrázku ve skutečnosti odpovídá čtvereček určitých délkových rozměru s plochou v mm^2 .

Pro nalezení určitého rozměru čtverečku byly provedeny čtyři po sobě jdoucí snímky. Poloha kraje zkoumaného modelu se posouvala v ose Y s krokem 0.2 mm pomocí mikrometrického posuvu. Poloha v ose X byla zachována. Byl zvolen vrchol nerovnosti, který byl dobře viditelný na všech obrázcích a byly zjištěny souřadnice jeho vrcholu na každém snímku: [X; A], [X; B], [X; C], [X; D].



Obr. 3.4 Kalibrace měřítka pro Dynamic Studio

Byly odečteny hodnoty souřadnic dvou sousedních snímku v ose Y. Získaná hodnota odpovídala 0.2 mm posuvu. Pro zjištění, kolik mm odpovídá jednomu pixelu, se podělí posuv na získaný počet pixelů $\frac{0.2mm}{získana\ hodnota\ v\ px}$. Konečný výsledek se zprůměruje s ostatními výsledky.

Vzorec výpočtu:

$$\frac{mm}{pixel} = \frac{0.2}{B-A} + \frac{0.2}{C-B} + \frac{0.2}{D-C} \quad (42)$$

Kalibrace se využije ve vyhodnocovacím programu Dantec Dynamic Studio, na jejím základě se spočítá reálná rychlost proudění.

4. Analýza naměřených dat

Výstupy měření

Kamera snímá s frekvencí 75000 snímků za sekundu. Snímky se ukládají na paměťovou kartu.

Na snímcích jsou viditelné bílé částice (částice kouře) na černém pozadí.

Data z kamery (viz. Obr. 4.1) lze načíst do programu Dantec Dynamic Studio.

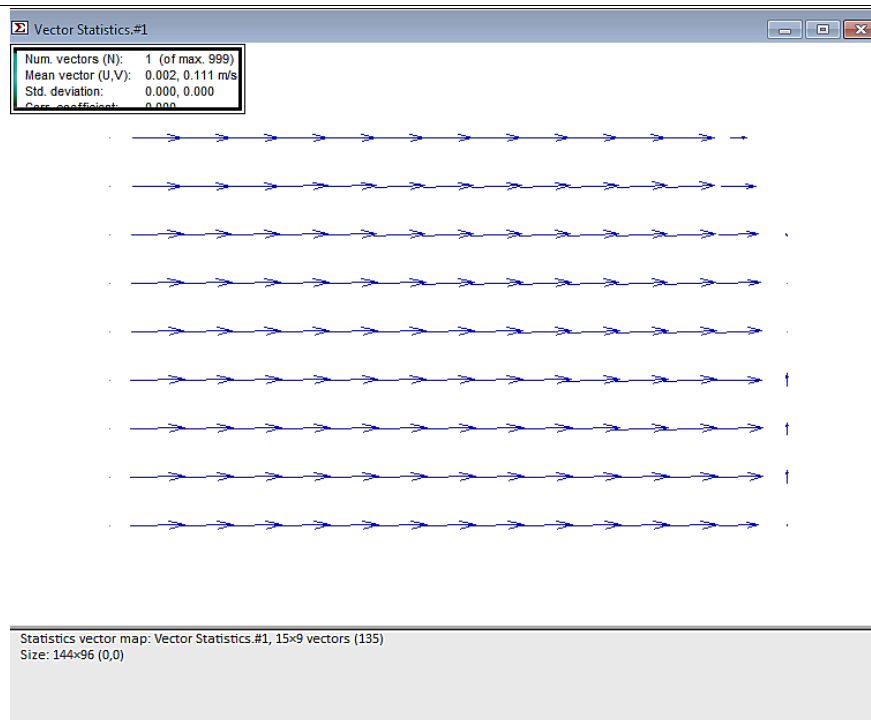


Obr. 4.1 Nezpracovaný snímek z kamery

Zpracování naměřených dat

Pro další práci s naměřenými daty bylo třeba převést výsledky z Dynamic Studio do numerického formátu.

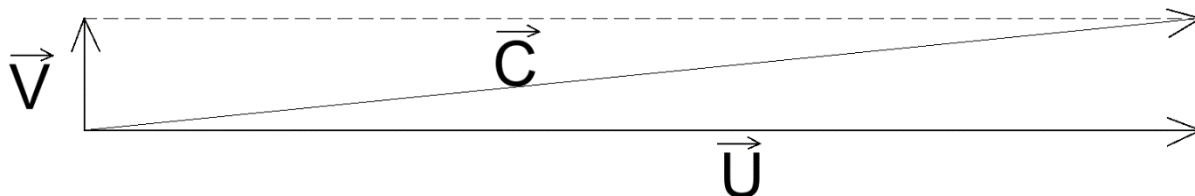
Po zpracovávání snímku byly získány obrázky viz obr. 4.2. Na obrázku jsou vyhodnoceny vektory rychlosti z určitých podoblastí obrázku. Velikost šípky by bez kalibrace ukazovala nevyovídající rychlost v px/s. Pro skutečnou rychlost byla třeba do adaptivní korelace aplikovat kalibraci.



Obr. 4.2 Výsledek analýzy snímku pomoci Dynamic Studio

Při vizuálním porovnání dvou výsledných snímků není vidět rozdíl. Ale lze rozlišit velikosti vektorů.

Na obrázku (Obr. 4.2) jsou absolutní vektory rychlosti \vec{C} . Vektor se skládá ze složek rychlosti ve směru svislém a vodorovném (\vec{U} , \vec{V}). Na obr. 4.3 je vidět, že vliv rychlosti \vec{V} je malý, přibližně o dva řády nižší.



Obr. 4.3 Rozložení celkové rychlosti

Aby se zviditelnil rozdíl rychlosti hladké a drsné desky, data s Dynamic Studio byla převedena do speciálního formátu pro program MatLab. V softwaru MatLab byl napsán kód, ve kterém jsou data dále zpracována a převedena do barevného obrázku. Na obrázku lze nastavit hranice a škály měřítka (μm) v osách X a Y.

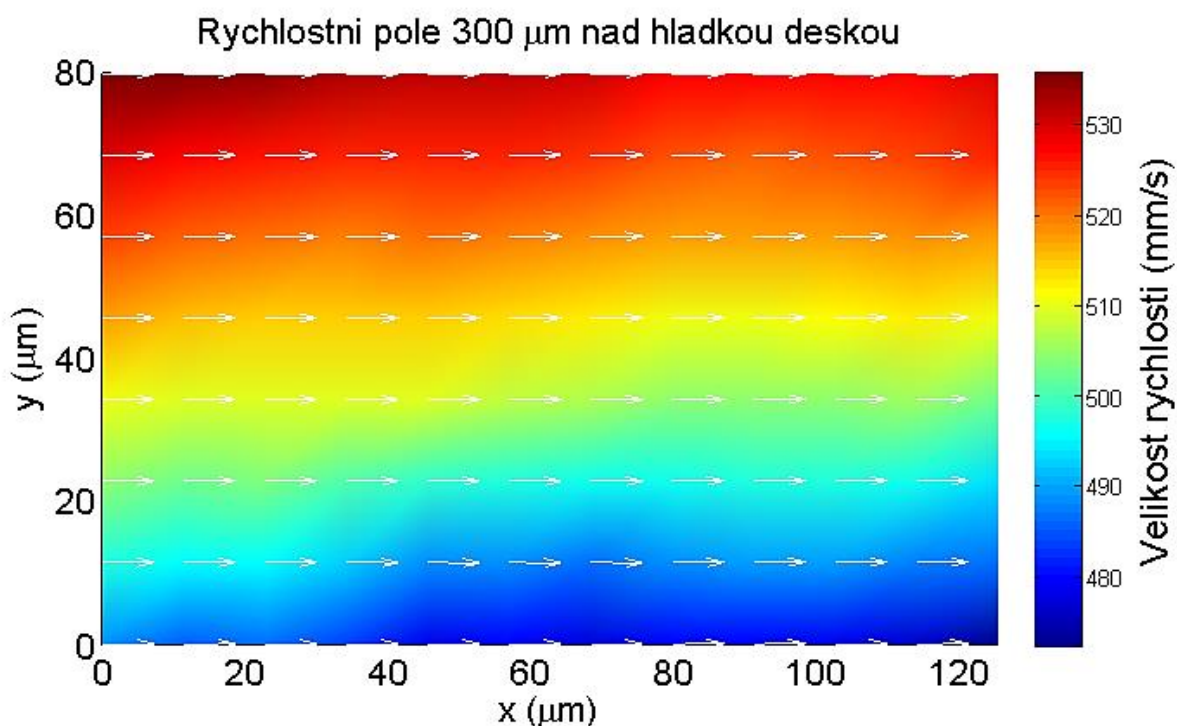
Pro maximální a minimální rychlosti se nastaví barva červená a modrá. Přechodným rychlostem se přeřadí zelená, žlutá a oranžová barvy. Pak program přiřadí jednotlivým vektorům příslušnou barvu.

5. Výsledky

Při měření rychlosti ve vyšetřované oblasti bez obtékaného objektu byla vyhodnocena průměrná rychlost nenarušeného proudu 948,5 mm/s.

5.1 Rychlostní pole pro hladkou desku

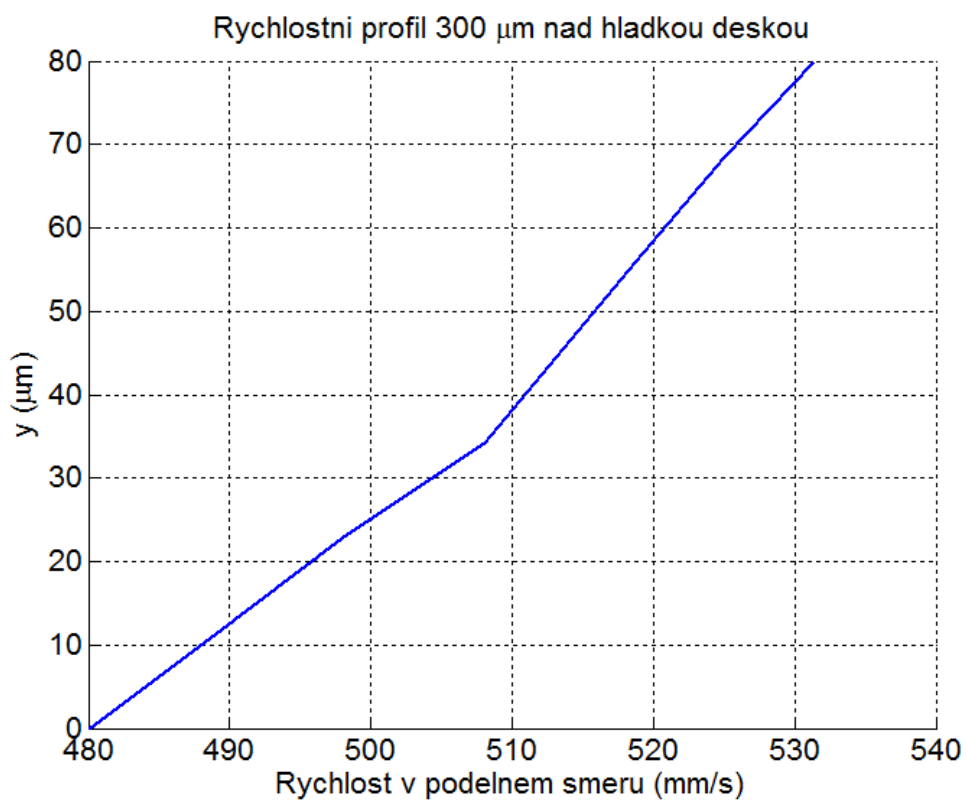
V případě hladké desky (Obr. 3.1) byly analyzovány tři polohy. Vlivem odlesků byla minimální možná naměřená vzdálenost od hladké desky 300 μm (Obr. 5.1). Další zvolené vzdálenosti byly 600 μm (Obr. 5.3) a 900 μm (Obr. 5.5).



Obr. 5.1 Rychlostní pole při obtékání hladké desky ve vzdálenosti 300 μm od povrchu

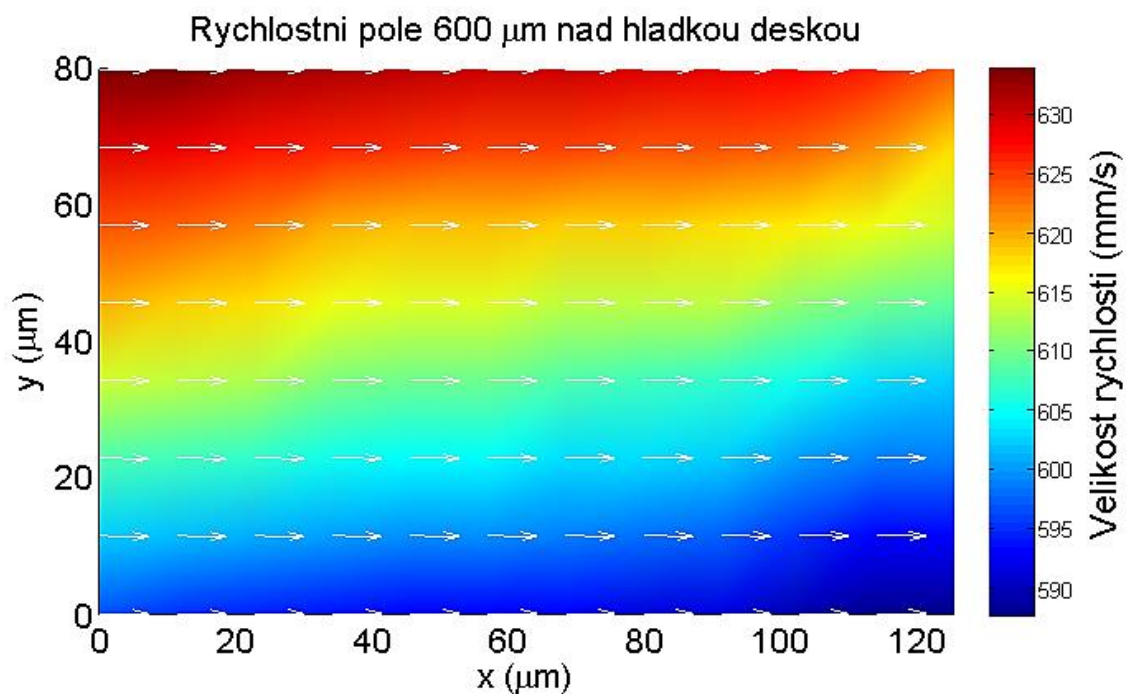
Rychlostní profil (Obr. 5.2) byl vyhodnocen z rychlostního pole na souřadnici 60 μm v ose X. Jedná se o průběh rychlosti v podélném směru v závislosti na souřadnici Y (vzdálenost od povrchu).

Na obr 5.2 je vidět, že ve výšce 300 μm nad povrchem se celková rychlost rovná 480 mm/s. S rostoucí vzdáleností od povrchu desky rychlost narůstá do hodnoty přibližně 532 mm/s ve vzdálenosti 380 μm .

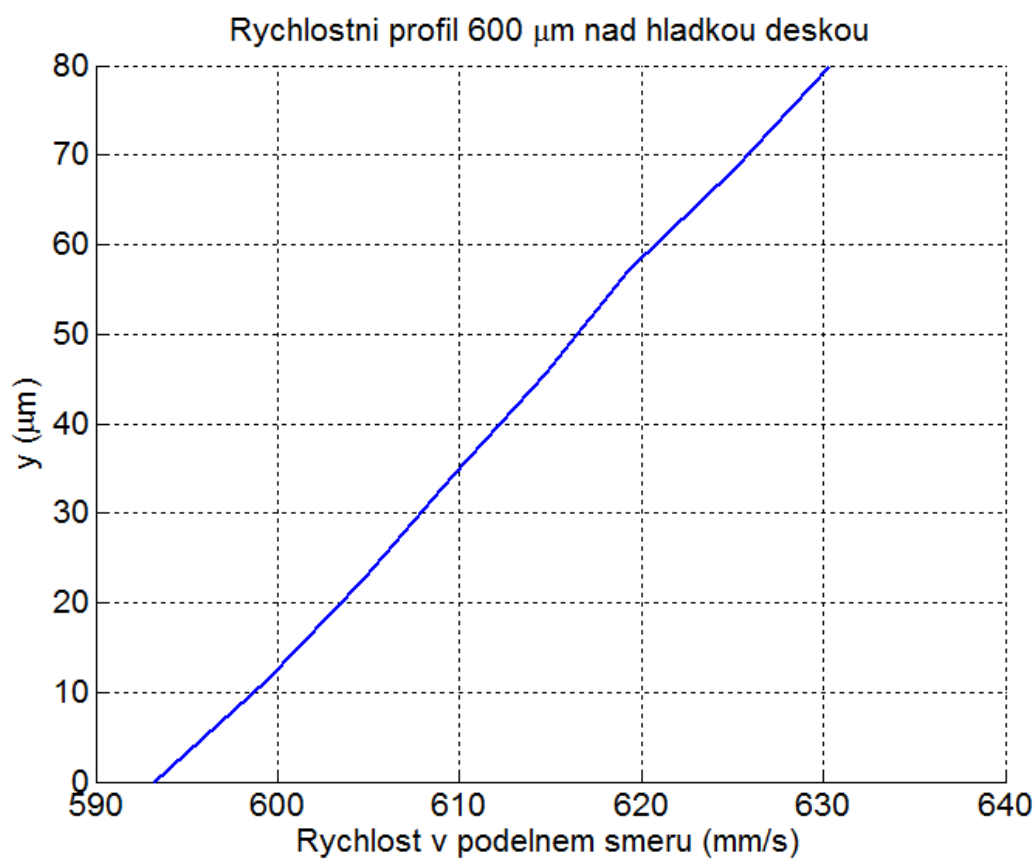


Obr. 5.2 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 300 μm od povrchu

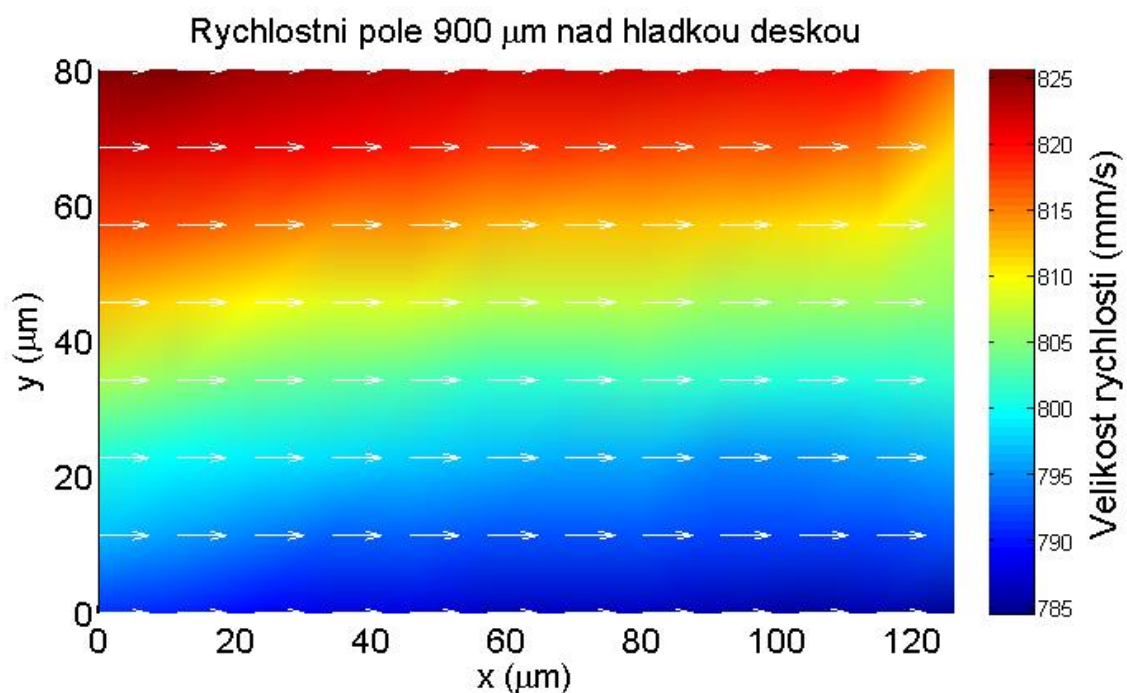
Stejně bylo měřeno ve vzdálenosti 600 μm nad povrchem.



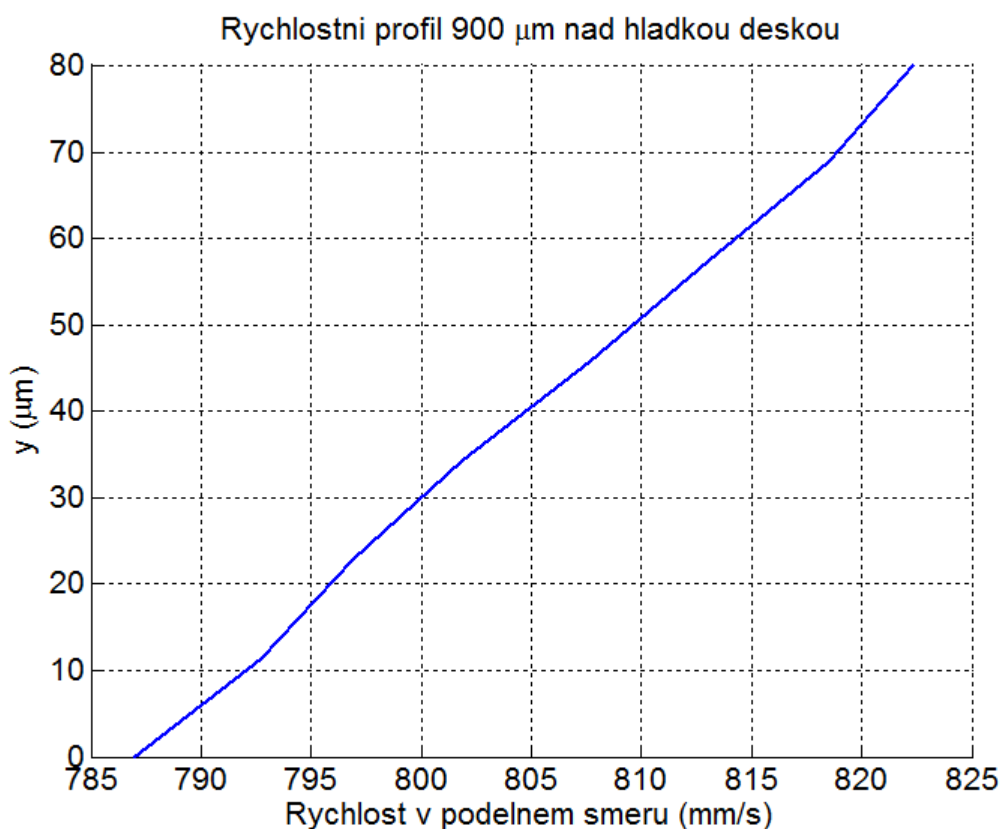
Obr. 5.3 Rychlostní pole hladké desky ve vzdálenosti 600 μm od povrchu



Obr. 5.4 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 600 μm od povrchu



Obr. 5.5 Rychlostní pole hladké desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu



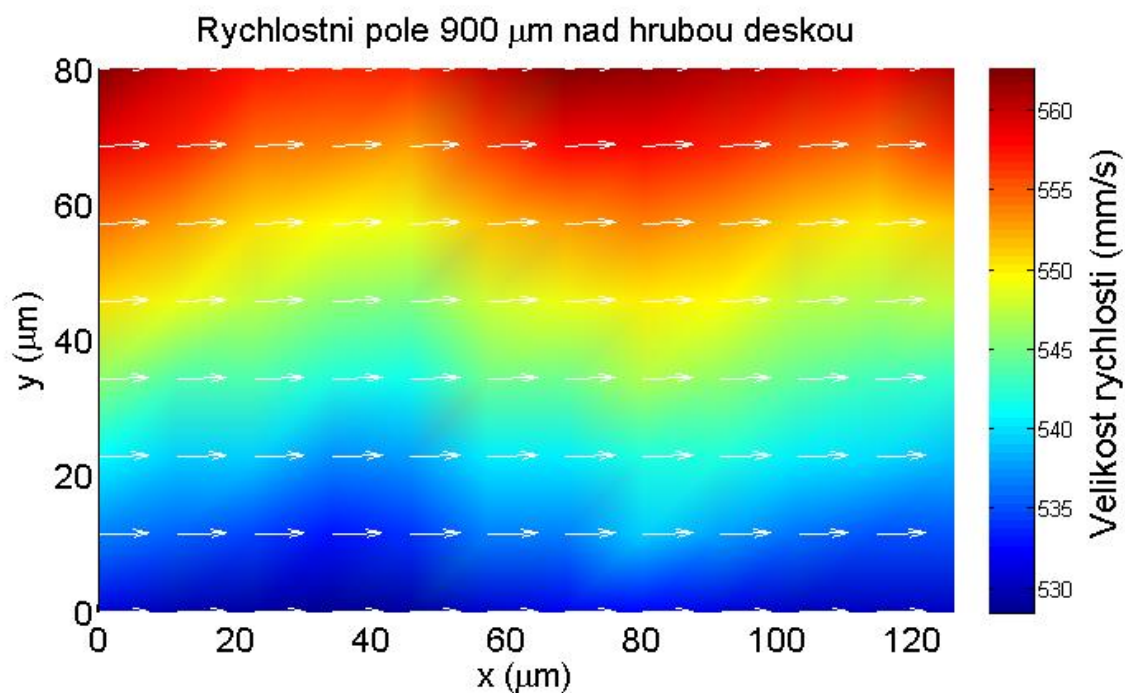
Obr. 5.6 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu

Na obrázcích (obr. 5.1, 5.3 a 5.5) je vidět jak postupné zvětšování mezní vrstvy po délce desky, tak i postupný nárůst velikosti rychlosti ve svislém směru. Jak bylo zmíněno v kapitole 3, jedná se o celkovou rychlost (skládá se z vektoru rychlosti ve vodorovném a svislém směru).

Výsledek vyhovuje teoretickým předpokladům v kapitole 3.

5.2 Porovnání rychlostního pole nad hladkou a drsnou deskou.

Také v případě drsné desky (Obr. 5.7) byla minimální možná vzdálenost od jejího povrchu ovlivněna odlesky. Tentokrát bylo možné dostat se při měření nejbližší 900 μm nad její povrch.



Obr. 5.7 Rychlostní pole drsné desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu

Při porovnání rychlostních polí hladké (obr. 5.5) a drsné (obr. 5.7) desky ve vzdálenosti 900 μm nad povrchem je vidět rozdíl mezi barevnými obrázky. V tab. 3 jsou výsledky všech měření dohromady.

Tab. 3 Výsledky experimentu

Povrch desky	Hladký			Drsný
Vzdálenost od povrchu (μm)	300	600	900	900
Min. rychlost (mm/s)	475	585	785	525
Max. rychlost (mm/s)	535	635	825	565
Přírůstek rychlosti (mm/s)	60	50	40	40

Největší přírůstek rychlosti byl u drsné desky ve vzdálenosti 300 μm od povrchu.

Rozdíl mezi maximální rychlostí proudu při obtékání hladké a drsné desky ve vzdálenosti 900 μm se rovnal 260 mm/s.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit vliv drsnosti povrchu na proudové pole.

Pro řešení daného úkolu byl navržen experiment pro měření metodou mikro PIV s použitím aerodynamického tunelu.

Jako zkoumané modely byly zvoleny dvě desky - hladká a drsná o rozměrech 90 x 35 mm.

Měření probíhalo ve vyšetřovací oblasti aerodynamického tunelu. Desky byly obtékány vzduchem s kouřovými částicemi, který byl poháněn ventilátorem.

Hladká deska byla změřena ve vzdálenostech 300 μm , 600 μm , 900 μm . Nejmenší vzdálenost 300 μm je minimální výška nad povrchem, kde měření neovlivňují odlesky. Drsná deska byla kvůli odleskům změřena pouze ve vzdálenosti 900 μm od povrchu.

Na základě výsledku jsou viditelné rozdíly mezi:

- a) Rychlostními profily
- b) Nárůstem mezní vrstvy
- c) Maximálními rychlostmi

V Tab.3 je shrnuta skutečnost, že při zvětšení vzdálenosti od kraje desky hodnota přírůstu rychlosti se zmenšuje. Důvodem toho děje je vliv desky na rychlostní profil. Čím blíže k desce, tím větší je její vliv na proudové pole a naopak.

Maximální rychlost při 900 μm nad krajem hladké desky byla 825 mm/s. To je blízko rychlosti nenarušeného proudu 948,5 mm/s. Lze odhadnout, že smluvní tloušťka mezní vrstvy hladké desky se bude pohybovat kolem 1 mm.

Pro drsnou desku nelze stanovit tloušťku mezní vrstvy. Ale tloušťka mezní vrstvy drsné desky byla větší než u hladké. To bylo vidět kvůli maximální velikosti rychlosti 565 mm/s.

Narůst mezní vrstvy a profil rychlosti hladké a drsné desky se výrazně lišily. Hladká deska měla parabolický nárůst mezní vrstvy. Oproti tomu, drsná deska měla přerušovaný nárůst mezní vrstvy. V různých intervalech délky buď klesala, nebo stoupala směrem vzhůru. Je to vizuálně viditelné na obrázcích 5.5 a 5.7.

Výsledky této práce ukazují, že metoda mikro PIV je aplikovatelná pro zkoumání mezní vrstvy a rychlostního profilu.

Použité zdroje

- [1] Nožička, Jiří. Mechanika tekutin. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
- [2] Noskiewič, Jaromír. Mechanika tekutin. Praha: SNTL, 1987.
- [3] Barlow Jewel, Rae William, Pope Alan. Low-speed wind tunnel testing ISBN: 0471557749
- [4] Meinhart C., Wereley S., Antiago. Experiments in Fluids:
<https://doi.org/10.1007/s003480050366>
dostupný: http://www.aere.iastate.edu/~huhui/teaching/2014_Summer/lecture-notes/reference/micro-PIV-1999.pdf
- [5] C. P. Gendrich, M. M. Koochesfahani, D. G. Nocera. Molecular tagging velocimetry and other novel applications of a new phosphorescent supramolecule. Dostupný: <http://www.aere.iastate.edu/~huhui/teaching/2011Fx/AerE545/lecture-notes/reference/MTV-1997-gendrich.pdf>
- [6] C.P.W. Geurts TNO Built Environment and Geosciences, Delft, The Netherlands. The use of Wind tunnel experiments for wind loads on structures. Dostupný: http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/asib/ws08_09/boundary_layer_windtunnel.pdf
- [7] Slavica Ristic, Jovan Isakovic, Biljana Ilic, Goran Ocokoljic. Review of methods for flow velocity measurement in wind tunnels. Dostupný: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2004/34-04/rist/rist.pdf>
- [8] Sylva Drábková a kolektiv. Mechanika tekutin. ISBN 978-80-248-1508-4
- [9] Jaroslav Janalík. Obtékání a odpor těles. VŠB-TU Ostrava. ISBN 978-80-248-1911-2
- [10] Nam-Trung Nguyen, Steve Wereley. Fundamentals and applications of microfluidics, second edition. ISBN 1-58053-972-6
- [11] Parametry kamery Olympus i-Speed DF:
http://www.nautiagene.com/products_view.php?PID=21&sn=44
- [12] Parametry objektivu Questar FR1 MKIII:
<http://www.company7.com/questar/microscope/fr1mkIII.html>
- [13] Hliníkový profil s T-drážkou a upínací úhel:
<https://www.askmt.com/>
- [14] Posuvná plošina:
https://b2b.partcommunity.com/community/public/document/e5/1b/03/315cd_fb2d.pdf
- [15] 3D tiskárna:
<https://shop.prusa3d.com/cs/17-3d-tiskarny>
- [16] <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Potenciální proudění [2]	8
Obr. 1.2 Vířivé proudění [2]	8
Obr. 1.3 Laminární proudění [2]	9
Obr. 1.4 Turbulentní proudění [2]	9
Obr. 1.5 Obtékání koule ideální tekutinou [2]	10
Obr. 1.6 Obtékání desky ideální tekutinou [2]	10
Obr. 1.7 Víry při obtékání zakřiveného tělesa [2]	11
Obr. 1.8 Obtékání desky kolmo k vektoru rychlosti [2]	11
Obr. 1.9 Silové účinky pro symetrické těleso obtékané pod úhlem větším než nula vzhledem k proudu [2]	12
Obr. 1.10 Vývoj mezní vrstvy [2]	13
Obr. 1.11 Vznik úplavu při obtékání profilu [2]	15
Obr. 1.12 Obtékání desky postavené paralelně vzhledem k obtékané tekutině [2]	16
Obr. 1.13 Závislost odporového součinitele hladké desky pro laminární a turbulentní proudění na Reynoldsově čísle [9]	18
Obr. 1.14 Závislost odporového součinitele hladké desky na Reynoldsově čísle pro turbulentní proudění [9]	19
Obr. 1.15 Obtékání desky kolmo na vektor rychlosti proudící tekutiny [2]	19
Obr. 1.16 Obtékání desky nakloněné vůči proudu pod úhlem α [2]	20
Obr. 1.17 Princip PIV metody [17]	22
Obr. 1.18 Zobrazení jedné vyšetřovací oblasti v různých časech. Je vidět posun částic mezi oběma snímky [10]	23
Obr. 1.19 Princip metody vzájemné korelace	23
Obr. 1.20 Vzájemné korelace dvou oblastí pomoci [16]	24
Obr. 1.21 Princip metody vzájemné korelace. Zpracování posuvu ve vyšetřovací oblasti, kde se zprůměruje rychlost částice a okolní šum. Z výsledku vychází vrchol. [10]	25
Obr. 1.22 Výsledek metody vzájemné korelace. Vektory ukazují směr. Jejich velikost je úměrná rychlosti.	25
Obr. 1.23 Schematické zobrazení principu long-distance mikro PIV metody	26
Obr. 1.24 Schematické zobrazení částice pohybující v tekutině	28
Obr. 1.25 Graf závislosti rychlosti pohybu částice na čase.	29
Obr. 1.26 Schématické zobrazení hloubky ostrožny [10]	31
Obr. 1.27 Otevřený aerodynamický tunel [3]	31
Obr. 1.28 Uzavřený aerodynamický tunel [3]	32
Obr. 2.1 Pohled shora na obtékanou desku	33
Obr. 2.2 Tvar lopatky použitý v experimentu [3]	34
Obr. 2.3 Model navrženého tunelu vytvořený v programu Autodesk	34
Obr. 2.4 Rozměry tunelu	35
Obr. 2.5 Tvar desky, ze které se skládá tělo tunelu	36
Obr. 2.6 Tvar desky, která se používá pro kolmý spoj.	36
Obr. 2.7 Segment tunelu	36
Obr. 2.8 Ukázka výkresu pro vypálení na laseru	37
Obr. 2.9 3D tiskárna Prusa i3 MKII [15]	38
Obr. 2.10 Pohled na trysku v programu 3D Slicer. Růžová oblast se skládá z jednotlivých vrstev.	38
Obr. 2.11 Spoje dvou segmentů jsou spojeny pomocí matic, podložek a šroubů.	39
Obr. 2.12 Samolepicí těsnění	39
Obr. 2.13 Posuvná plošina [14]	40
Obr. 2.14 Posuvná plošina ve vodorovné ose Obr. 2.15 Posuvná plošina ve svislé ose	40

Obr. 2.16 Hliníkový profil s T drážkami [13]	Obr. 2.17 Úhelníkový upínací prvek [13]	41
Obr. 2.18 Schéma experimentální trati		41
Obr. 2.19 Objektiv Questar FR-1 MKIII [12]		42
Obr. 2.20 Kamera Olympus i-Speed DF [11]		42
Obr. 2.21 Fotografie experimentální trati		43
Obr. 3.1 Hladká deska.....		45
Obr. 3.2 Drsná deska		45
Obr. 3.3 Laserem osvětlená vyšetřovaná oblast		46
Obr. 3.4 Kalibrace měřítka pro Dynamic Studio		46
Obr. 4.1 Nezpracovaný snímek z kamery		47
Obr. 4.2 Výsledek analýzy snímku pomocí Dynamic Studio		48
Obr. 4.3 Rozložení celkové rychlosti		48
Obr. 5.1 Rychlostní pole při obtékání hladké desky ve vzdálenosti 300 μm od povrchu		49
Obr. 5.2 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 300 μm od povrchu.....		50
Obr. 5.3 Rychlostní pole hladké desky ve vzdálenosti 600 μm od povrchu.....		50
Obr. 5.4 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 600 μm od povrchu.....		51
Obr. 5.5 Rychlostní pole hladké desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu.....		51
Obr. 5.6 Rychlostní profil hladké desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu.....		52
Obr. 5.7 Rychlostní pole drsné desky ve vzdálenosti 900 μm od povrchu		53