

# Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů

Disertační práce

Studijní obor:

Studijní program: P2301 – Strojní inženýrství 3901V003 – Aplikovaná mechanika

Autor práce: Vedoucí práce: Ing. Jan Hujer prof. Ing. Karel Fraňa, Ph.D.





# Study of the cavitation bubble collapse and the cavitation bubble structures collapse close to surfaces

Dissertation

Study programme:P2301 – Mechanical EngineeringStudy branch:3901V003 – Applied Mechanics

Author: Supervisor: **Ing. Jan Hujer** prof. Ing. Karel Fraňa, Ph.D.



# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

27.6.2019

Ing. Jan Hujer

# Poděkování

Bez konkrétního jmenování bych rád poděkovat všem, kteří mi byli vědomou a někdy i nevědomou oporou po celou dobu doktorského studia a při psaní disertační práce.

Jan Hujer

### Anotace

Disertační práce je zaměřena na experimentální výzkum kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Účinky kolapsu byly vyhodnocovány na základě měření impaktních sil pomocí piezoelektrických PVDF senzorů a na základě měření mikro-deformací (pitting testů) v inkubační fázi kavitační eroze. Kavitující proudění bylo generováno ve vysokorychlostním kavitačním tunelu. Zpracování záznamu signálu z piezoelektrických PVDF senzorů bylo provedeno metodou vyhodnocení maxim pulzů. Vyhodnocení bylo provedeno přímo na naměřeném signálu a na signálu po jeho dekompozici. Výsledkem zpracování jsou kumulovaná spektra maximálních sil. Z pitting testů na vzorcích slitiny hliníku EN AW-7075 byly zjištěny charakteristické parametry pitů. Výsledkem jejich zpracování jsou kumulovaná spektra průměrů pitů. V práci je provedena analýza kumulovaných spekter maximálních sil a kumulovaných spekter průměrů pitů a vztahů mezi nimi.

Klíčová slova: kavitace, kolaps, PVDF senzor, pitting test, kumulovaná spektra

# Annotation

The thesis is focused to the experimental investigation of cavitation bubble and cavitation bubble cloud collapse close to surfaces. The collapse effects were evaluated based on the measurement of impact forces by piezoelectric PVDF sensors and based on the measurement of microdeformations (pitting tests) during the incubation phase of the cavitation erosion. The cavitation flow was generated in the high-speed cavitation tunnel. Signals from the piezoelectric PVDF sensors were evaluated based on the peaks maximum values. The evaluation was realized on the pure signal and the signal after decomposition resulting in the cumulative histograms of maximum impact forces. The characteristic parameters of pits were obtained from pitting tests on aluminum alloy EN AW-7075 resulting in the cumulative histograms of pits diameters. The analysis of the pits diameters histograms and histograms of maximum impact forces and relations between them are given.

Keywords: cavitation, collapse, PVDF sensor, pitting test, cumulative rate

# OBSAH

Seznam zkratek a použitého značení9		
Úv	od a cíle disertační práce	12
1	Přehled o současném stavu problematiky	13
	1.1 Úvod do problematiky fyzikálního jevu kavitace	13
	1.2 Kavitační eroze	16
	1.3 Kolaps kavitační bubliny v blízkosti pevných povrchů	18
	1.4 Mechanismus kolapsu osamocené kulové kavitační bubliny	
	a související kavitační eroze	21
	1.5 Interakce kavitační bubliny a tlakové rázové vlny	24
	1.6 Kolaps kavitačních struktur a mraku kavitačních bublin	25
2	Generování kavitačního mraku a metody studia kavitace	27
	2.1 Kavitační tunel	27
	2.2 Vysokorychlostní kavitační tunel	30
	2.3 Ultrazvukový kavitační tester	30
	2.4 Kavitační jet	32
	2.5 Rotující disk	
3	Návrh vlastního řešení	35
	3.1 Výběr testovacího zařízení	35
	3.2 Volba testovací metody	35
	3.3 Návrh jednotlivých kroků vlastního řešení	36
4	Vysokorychlostní kavitační tunel	
	4.1 Konstrukce vysokorychlostního kavitačního tunelu	37
	4.2 Parametry proudění ve vysokorychlostním kavitačním tunelu	39
	4.3 Dynamika kavitačního mraku ve vysokorychlostním kavitačním tunelu	41
	4.4 Měření sil od impaktu kavitačních bublin ve vysokorychlostním kavitačním t	unelu44
	4.5 Pitting testy ve vysokorychlostním kavitačním tunelu	45
5	PVDF senzor a jeho kalibrace	46
	5.1 PVDF senzor a jeho vlastnosti	46
	5.2 Tištěný PVDF senzor	49
	5.3 PVDF senzor vyrobený fotolitografickou technikou	51

	5.4 Průmyslově vyráběný PVDF senzor	52
	5.5 Kalibrace PVDF senzoru	53
6	Testovací měření a optimalizace návrhu měření	60
	6.1 Testovací měření pro určení geometrie díry a metody přilepení PVDF senzoru	60
	6.1.1 První série testovacích měření	60
	6.1.2 Druhá série testovacích měření	62
	6.1.3 Třetí série testovacích měření	63
	6.2 Testovací měření pro určení oblasti eroze	66
	6.3 Testovací měření pro určení geometrie díry pro PVDF senzor	
	na rozdělené erodované oblasti	67
7	Měření kavitačního účinku PVDF senzory	73
	7.1 Experimentální sestava a nastavení	73
	7.2 Zpracování signálu z měření	76
	7.3 Vyhodnocení maxim sil signálu (metoda vyhodnocení A)	81
	7.3.1 Metoda vyhodnocení	81
	7.3.2 Kumulovaná spektra	82
	7.3.3 Průměrná maximální síla	84
	7.3.4 Vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil	85
	7.3.5 Vyšetřování vlivu rychlosti proudění na kavitační agresivitu	87
	7.4 Vyhodnocení maxim sil při dekompozici signálu (metoda vyhodnocení B)	92
	7.4.1 Metoda vyhodnocení	92
	7.4.2 Kumulovaná spektra	97
	7.4.3 Průměrná maximální síla	99
	7.4.4 Vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil	99
	7.4.5 Vyšetřování vlivu rychlosti proudění na kavitační agresivitu	100
	7.4.6 Měření zahrnující všechny oblasti	102
8	Pitting testy	105
	8.1 Význam pitting testů	105
	8.2 Výroba disků pro pitting testy	106
	8.3 Pitting testy ve vysokorychlostním kavitačním tunelu	107
	8.4 Skenování povrchu pitting testů	108
	8.5 Zpracování dat z profilometru	109
	8.6 Vyhodnocení průměru pitů	114
	8.6.1 Kumulovaná spektra průměrů pitting testů	114
	8.6.2 Vyhodnocení počtu pitů pro vybrané úrovně průměru pitu	116

	8.6.3 Faktor tvaru pitu	117
	8.7 Porovnání pitting testů a měření PVDF senzory	119
	8.7.1 Určení síly vytvářející pit na základě pitting testu	119
	8.7.2 Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil	120
	8.7.3 Charakteristické parametry pitting testů	124
	8.8 Odhad síly impaktu na základě pitting testu	127
9	Shrnutí a hlavní závěry disertační práce	134
9	Shrnutí a hlavní závěry disertační práce 9.1 Shrnutí disertační práce	<b>134</b> 134
9	<ul> <li>Shrnutí a hlavní závěry disertační práce</li> <li>9.1 Shrnutí disertační práce</li> <li>9.2 Zhodnocení výsledků pro vědní obor a pro praxi</li> </ul>	<b>134</b> 134 135
9	<ul> <li>Shrnutí a hlavní závěry disertační práce</li> <li>9.1 Shrnutí disertační práce</li> <li>9.2 Zhodnocení výsledků pro vědní obor a pro praxi</li> <li>9.3 Doporučení na pokračování práce</li> </ul>	<b>134</b> 134 135 
9 Sez	<ul> <li>Shrnutí a hlavní závěry disertační práce.</li> <li>9.1 Shrnutí disertační práce</li> <li>9.2 Zhodnocení výsledků pro vědní obor a pro praxi</li> <li>9.3 Doporučení na pokračování práce</li> <li>znam použité literatury.</li> </ul>	

# Seznam zkratek a použitého značení

a, b, c, d	parametry fitovacích funkcí	[dle jedn.]
<i>a</i> <sub><i>G</i></sub> , <i>b</i> <sub><i>G</i></sub> , <i>c</i> <sub><i>G</i></sub>	parametry Gaussovy funkce	[dle jedn.]
с	rychlost zvuku v prostředí	$[\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}]$
С	elektrická kapacita	[F]
$C_{f}$	elektrická kapacita senzoru	[F]
$C_H$	materiálový parametr Hollomonovy konstitutivní rovnice	[-]
$C_k$	elektrická kapacita kabelu	[F]
$C_0$	elektrická kapacita vstupního měřicího obvodu	[F]
D	průměr pitu	[m]
$D^{*}$	charakteristický průměr pitu (z fitování)	[m]
d	průměr	[m]
$d_{xy}$	piezoelektrická nábojová konstanta (význam indexů je uveden v textu)	$[C \cdot N^{-1}]$
е	šířka mezery mezi čelem trysky a testovacím diskem	[m]
f	frekvence vzniku kavitačních bublin	[Hz]
$f_0$	mezní frekvence RC článku (dolní filtr)	[Hz]
$f_r$	rezonanční frekvence senzoru	[Hz]
$f_{vz}$	vzorkovací frekvence (jednotka $S \cdot s^{-1} = Samples \cdot s^{-1} = vzorků \cdot s^{-1}$ )	$[S \cdot s^{-1}]$
F	síla (obecně)	[N]
$F_p$	impaktní síla od kavitačního kolapsu	[N]
$F_c$	střední kontaktní síla	[N]
$F_k$	střední hodnota síly impaktního tělesa	[N]
$F_{konst}$	konstantní zatěžující síla	[N]
$F_{max}$	maximální hodnota síly, maximální hodnota impaktu	[N]
F <sub>max,stř</sub>	průměrná maximální síla	[N]
$F^*$	charakteristická maximální síla	[N]
$g_{xy}$	piezoelektrická napěťová konstanta (význam indexů je uveden v textu)	$[V \cdot m \cdot N^{-1}]$
$h_k$	výška pozice impaktního tělesa nad kalibrovaným senzorem	[m]
h	hloubka pitu	[m]
k	citlivost PVDF senzoru	$[V \cdot N^{-1}]$
$k_i$	koeficient indentoru	[-]
Κ	materiálová konstanta Johnsonova-Cookova vztahu	[-]
l	délka struny závěsu	[m]
$l_{cav}$	délka kavitační struktury	[m]
$L_0$	počáteční vzdálenost bubliny od stěny	[m]
т	hmotnost	[kg]
$m_k$	hmotnost impaktního tělesa	[kg]
n	plošná frekvence pulzů	$[s^{-1} \cdot cm^{-2}]$
$n_z$	exponent zpevnění	[-]
$n_p$	plošná frekvence pitů	$[s^{-1} \cdot cm^{-2}]$
$n^*$	charakteristická frekvence pulzů	$[s^{-1} \cdot cm^{-2}]$
$n_p^*$	charakteristická frekvence pitů (z fitování)	$[s^{-1} \cdot cm^{-2}]$

n <sub>p,ref</sub>	referenční počet pitů	$[s^{-1} \cdot cm^{-2}]$
р	tlak	[Pa]
$p_{cav}$	tlak na kavitační struktuře	[Pa]
$p_d$	tlak za testovací sekcí kavitačního tunelu	[Pa]
$p_m$	střední kontaktní tlak	[Pa]
$p_s, p_v$	tlak na mezi sytosti	[Pa]
$p_{set}$	tlak tlakovacího systému kavitačního tunelu	[Pa]
$p_u$	tlak před testovací sekcí kavitačního tunelu	[Pa]
Q	objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_e$	elektrický náboj	[C]
r	poloměr výstupní části trysky	[m]
$r_c$	kontaktní poloměr	[m]
R	poloměr kavitační bubliny	[m]
$R_{el}$	elektrický odpor	$[\Omega]$
Rem	poloměr středu erodovaného mezikruží	[m]
$R_i$	vstupní odpor měřicího obvodu	$[\Omega]$
$R_{ind}$	poloměr indentoru	[m]
<b>R</b> <sub>max</sub>	maximální poloměr kavitační bubliny	[m]
<b>R</b> <sub>max,n</sub>	n-tý maximální poloměr aktivní bubliny	[m]
$R_0$	poloměr jádra kavitační bubliny	[m]
S	vzdálenost vzorku od trysky	[m]
<b>S</b> 50, <b>S</b> 80	šířka Gaussovy funkce v 50 % a 80 % její výšky	[m]
S	povrch válcového mezikruží na hraně trysky	[m <sup>2</sup> ]
St	Strouhalovo číslo	[-]
t	čas (obecně)	[ <b>s</b> ]
$t_s$	tloušťka senzoru	[m]
Т	termodynamická teplota	[K]
$T_s$	teplota na mezi sytosti	[K]
U	elektrické napětí	[V]
$U_{max}$	maximální elektrické napětí	[V]
$U_{st\check{r}}$	střední elektrické napětí	[V]
$U_z$	napětí na zdroji elektrického napětí	[V]
v	rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$V_{cav}$	rychlost proudění na kavitační struktuře	$[m \cdot s^{-1}]$
Vjet	rychlost jetu	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_k$	rychlost impaktního tělesa před dopadem	$[m \cdot s^{-1}]$
Vpol	rychlost zvuku v polymeru	$[m \cdot s^{-1}]$
$V_{S}$	střední rychlost proudění na válcovém mezikruží na hraně trysky	$[m \cdot s^{-1}]$
V <sub>u</sub>	rychlost proudění před testovací sekcí v místě měření p <sub>u</sub>	$[m \cdot s^{-1}]$
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	souřadnice souřadného systému, indexy souřadných os	[m]
1,2	Index počátku a konce	

$lpha_{f}$	úhel náběhu hydraulického profilu	[°]
β	míra zaplnění oblasti pitting testu	[s <sup>-1</sup> ]
γ	bezrozměrný parametr bubliny	[-]
γi	poloviční kontaktní úhel indentoru	[°]
$\delta$	charakteristický průměr pitu spektra	[m]
З	deformace	[-]
$\mathcal{E}_{xy}$	permitivita materiálu	$[F \cdot m^{-1}]$
ρ	hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
σ	kavitační číslo	[-]
$\sigma_m$	mechanické napětí	[Pa]
$ au_0$	časová konstanta senzoru s paralelní odporovou zátěží	[s]
$ au_s$	časová konstanta senzoru zahrnující elektrické kapacity obvodu	[s]
τ	charakteristický čas spektra pitů	[s]
$ au_k$	doba působení impaktního tělesa	[s]
Θ	úhel mezi strunou a plochou dopadu impaktoru	[°]
$\omega_r$	redukovaná úhlová frekvence	[-]
Φ	faktor omezení	[-]
AFM	mikroskopie atomárních sil - Atomic Force Microscopy	
CEA	výzkumná organizace - Le Commissariat à l'énergie atomique	
	et aux énergies alternatives	
CNRS	výzkumná organizace - Centre National de la Recherche Scientifiqu	ıe
FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií	
FWHM	šířka v polovině výšky – Full Width at Half Maximum	
LEGI	laborator - Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriel	ls

FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
FWHM	šířka v polovině výšky – Full Width at Half Maximum
LEGI	laborator - Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels
Liten	laboratoř - Le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies
	des Energies nouvelles et les Nanomatériaux
NI	výrobce měřicí techniky – National Instruments
PEDOT-PSS	polystyrenu sulfonátu (poly(3,4-ethylenedioxythiophenu)
PEN	polyester polyethylen naftalen
PMMA	polymer polymethylmethakrylát
PVDF	piezoelektricky aktivní fluoropolymer polyvinylidene fluoride
PVDF- TfFE	piezoelektricky aktivní fluoropolymer (polyvinylidenfluorid trifluoroethylen)
PXi	elektronická modulární platforma - PCI extensions for instrumentation
RG	označení koaxiálního kabelu – Radio Guide
RMS	kvadratický průměr – Root Mean Square
SEM	rastrovací elektronová mikroskopie – Scanning Electron Microscopy
SIMAP	laborator - Laboratoire de Science Ingénierie des Matériaux et Procédés
TUL	Technická univerzita v Liberci

# Úvod a cíle disertační práce

Kavitace je významným tématem mechaniky tekutin. Ve strojírenství se s kavitací setkáváme v hydraulických strojích a zařízeních, kde je původcem většinou nežádoucích jevů, jako je např. eroze povrchů či vibrace. V praxi se proto hledají způsoby, jak kavitačním efektům zabránit, či je alespoň minimalizovat, v neposlední řadě také jak kavitaci a případné následky predikovat. Současně s tím je snahou mechanismus kavitačního jevu a zejména interakci s blízkými povrchy popsat. Výzkum v této oblasti je z důvodu mnoha specifik kavitačního jevu dosti komplikován. Vyznačuje se totiž extrémními charakteristikami. Doba trvání každého elementárního kavitačního jevu je v řádu mikrosekund až nanosekund a je doprovázen tlaky v řádu megapascalů. Moderní vědecké přístupy a metody přinášejí potenciál současný stav znalostí prohloubit a přinést nové poznatky. Přispět má i tato disertační práce, zabývající se studiem kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů.

Předkládaná disertační práce obsahuje rešeršní část, stručně prezentující současný stav znalostí o kavitaci a jejích účincích, o možnostech generování kavitace a o výzkumných tématech blízkých této práci; dále pak oddíly, týkající se vlastního přístupu ke studiu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur, včetně popisu použitého senzoru, experimentu ve vysokorychlostním kavitačním tunelu pro několik režimů provozu a metody vyhodnocení měření. Závěrem jsou uvedeny výsledky experimentu a jejich možná interpretace.

Disertační práce přináší poznatky, týkající se všech následně uvedených cílů disertační práce, kterými jsou:

- experimentální výzkum účinku kolapsu kavitačního mraku ve vybraném zařízení generujícím kavitační mrak, zahrnující vliv podmínek daných provozními režimy tohoto zařízení;
- navržení vhodné měřicí metody pro studium účinku kolapsu kavitačního mraku;
- testování a optimalizace navržené metody (problematika kalibrace, stanovení omezujících faktorů měření, zajištění elektromagnetické kompatibility měření, atd.);
- měření účinku kolapsu kavitačního mraku optimalizovanou měřicí metodou;
- určení vhodné metody vyhodnocení provedených měření;
- vyhodnocení účinku kolapsu kavitačního mraku na základě naměřených dat, popisující účinek kolapsu kavitačního mraku pro měřené provozní režimy;
- stanovení závěrů výzkumu, včetně diskuze získaných výsledků.

### Kapitola 1

# Přehled o současném stavu problematiky

První kapitola disertační práce je rešerší na téma problematiky kavitace v blízkosti povrchů. V úvodních oddílech jsou představeny teoretické základy fyzikálního jevu kavitace a kavitační eroze. Na ně navazují oddíly, přinášející dostupné informace o mechanismu kolapsu osamocené kavitační bubliny, mraku kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Dále jsou zde podrobně rozebrány doprovodné jevy kavitačního kolapsu, které jsou považovány za původce kavitační eroze. Posledním tématem rešerše je interakce tlakové rázové vlny s kavitační bublinou.

#### 1.1 Úvod do problematiky fyzikálního jevu kavitace

Kavitace je fyzikální jev, kterým nazýváme existenci a aktivitu dutin v kapalině. Dutiny v kapalině nazýváme kavitační bubliny a za aktivitu kavitačních bublin považujeme jejich vznik, růst a zánik. S aktivitou kavitačních bublin souvisí další doprovodné efekty a interakce s okolím. Řídicím mechanismem kavitačního jevu je pokles tlaku v kapalině pod tlak sytých par  $p_s$  o dané termodynamické teplotě  $T_s$ , kdy dochází k porušení kontinuity tekutiny a vzniku kavitační bubliny. V reálných případech vznikají kavitační bubliny na tzv. jádrech, což mohou být malé stabilní bublinky či příměsi obsažené v kapalině. V těchto místech je totiž značně (až několikanásobně) porušena pevnost kapaliny v tahu. Stabilita bublinky této fáze existence a charakter jejího dalšího vývoje plyne z tzv. rovnice statické rovnováhy kavitační bubliny, jejíž detailní rozbor uvádí Brdička et al. (1981). V případě bubliny ve statické rovnováze bublina dále setrvává bez další aktivity v kapalině. Naopak v případě nestabilní kavitační bubliny dochází k jejímu růstu (explozi) a následnému zániku (implozi) s finální fází, nazývanou kolaps. Dynamika aktivní kavitační bubliny po porušení statické rovnováhy je popsána Rayleighovou - Plessetovou rovnicí (Rayleigh, 1917). I když se jedná o rovnici platnou za určitých zjednodušujících předpokladů, je považována za silný nástroj pro pochopení dynamiky kavitační bubliny. Rovnici lze užít i pro zjednodušenou analýzu chování kavitační bubliny, zahrnující vliv termodynamických vlastností. Podrobný rozbor Rayleighovy – Plessetovy rovnice uvádí Franc a Michel (2004). Řešením Rayleighovy – Plessetovy rovnice lze získat průběh závislosti poloměru kavitační bubliny R na čase t, jejímž příkladem může být závislost na obrázku 1.1, která představuje aktivitu kavitační bubliny, vznikající na jádru o poloměru  $R_0$ . Vznik bubliny je řízen poklesem tlaku v kapalině. Bublina se zvětšuje, roste (exploduje) až na mezní velikost, danou maximálním poloměrem  $R_{max1}$ . V tomto okamžiku je tlak uvnitř bubliny mnohokrát menší než okolní statický tlak a proto se bublinka zmenšuje (imploduje). Při dosažení minimální velikosti kolabuje. Při kolapsu dochází k doprovodným jevům, například k emisi tlakové vlny, mikroproudu (tzv. jetu), nárůstu teploty uvnitř bubliny až na hodnoty tisíců kelvinů, k sonoluminiscenci, rozkladu molekul vyskytujících se látek. Tím bublina ztrácí část své energie. Aktivita bublinky pak pokračuje obdobným způsobem, roste do druhé maximální velikosti, imploduje, dochází ke druhému kolapsu. Druhý maximální poloměr  $R_{max2}$  je menší než první, a to právě v důsledku uvolnění energie během prvního kolapsu. Obdobně se děj opakuje až do úplné disipace energie bubliny.



Obrázek 1.1: Průběh závislosti poloměru kavitační bublinky R na čase t

Kavitační děj můžeme znázornit ve fázovém diagramu uvedeném na obrázku 1.2. Lze v něm snadno odlišit mechanismus vzniku dutin v kapalině při kavitaci a při varu. U bublin vznikajících při varu je totiž řídícím mechanismem změna termodynamické teploty T, a proto nejsou považovány za kavitační bubliny. Pokud se zaměříme na změnu tlaku p (ve směru svislé osy), tak při setrvání nebo poklesu tlaku pod tlak sytých par  $p_s$ , daných křivkou nasycení, bubliny rostou. Naopak pokud tlak v kapalině nad tlak sytých par vzroste, dochází k zániku bubliny. Kavitační bubliny, vznikající dle znázorněného děje ve fázovém diagramu, jsou tvořeny parami okolní kapaliny. Často se ale setkáváme s kapalinou, v níž je obsažen rozpuštěný plyn a pak může být bublinka tvořena uvolněným rozpuštěným plynem či kombinacemi plynů, včetně par okolní kapaliny.



Obrázek 1.2: Fázový diagram většiny látek

V předchozím textu bylo zmíněno, jakými fázemi existence obecně kavitační bublinka prochází. V reálných případech je kavitační oblast tvořena více koexistujícími bublinami a tvoří tzv. mrak kavitačních bublin. Kavitační mrak během své existence prochází týmiž fázemi jako

jednotlivá kavitační bublina, jen může docházet k určitému ovlivnění v důsledku vzájemného působení koexistujících bublin na sebe. Ukázky osamocené kavitační bubliny a mraku kavitačních bublin jsou na obrázku 1.3. Na levém snímku je kulová bublinka o průměru cca 10 mm vygenerována teplem přechodového odporu na dotyku dvou vodičů (horizontální šedé čáry). Kulová bublinka byla vygenerována v blízkosti pevného povrchu, nacházejícího se ve spodní části (označen červenou přerušovanou čarou). Struktura na pravém snímku vznikla rozpadem osamocené kulové bublinky na mrak menších bublin.



Obrázek 1.3: Osamocená kavitační bublinka (vlevo) a "mrak" kavitačních bublin (vpravo)

Struktury kavitačních bublin se ve strojírenské praxi nejčastěji vyskytují v blízkosti obtékaných profilů hydraulických strojů a částí hydraulických zařízení. Ukázka vyvinutého mraku kavitačních bublin na hydraulickém profilu NACA 2412 je na obrázku 1.4. Umístěním profilu do proudící tekutiny dojde na jeho vrchní straně k místnímu nárůstu rychlosti proudění a souvisejícímu poklesu tlaku. Pokud míra poklesu tlaku splňuje podmínky pro vznik kavitace, vzniknou kavitační bubliny ve formě určitých struktur, které v místech nárůstu tlaku kolektivně kolabují a jsou doprovázeny dalšími efekty.



Hydraulický profil

Obrázek 1.4: Vyvinutý mrak kavitačních bublin na profilu NACA 2412

V oboru mechaniky tekutin a termodynamiky se s kavitací setkáváme v hydraulických strojích a zařízeních. Kavitace se přirozeně vyskytuje v čerpadlech, turbínách a armaturách, naopak uměle se generuje pro využití v ultrazvukových čističkách či homogenizátorech. V případě přirozeného výskytu kavitace se jedná o jev značně nežádoucí, protože je doprovázen

nepříznivými efekty. Z pohledu na provoz celého zařízení se jedná o erozi materiálu částí zařízení, hluk, vibrace, a tím snížení životnosti celého zařízení. Snahou proto je kavitaci se vyvarovat, či ji přímo zamezit. Pokud je tedy hydraulický stroj nebo zařízení dlouhodobě provozováno, k nepříznivým efektům by mělo docházet výjimečně, či zcela v minimální míře. S tím ale souvisí i značné hospodářské ztráty, neboť je zařízení provozováno za podmínek, kdy není energetický potenciál proudící tekutiny plně využit. Z tohoto důvodu se optimalizují hydraulické profily a hledají nové materiály, případně se modifikují stávající materiály za účelem zvýšení jejich kavitační odolnosti. Souběžně s tím se provádí výzkum jednotlivých doprovodných jevů, materiálový výzkum z hlediska kavitace a rovněž se zdokonalují diagnostické postupy a metody pro měření kavitace.

Informace uvedené v tomto oddílu představují pouze stručný přehled znalostí a pojmů, týkajících se fyzikálního jevu kavitace. Slouží hlavně pro stanovení základního rámce problematiky, které se disertační práce týká. Jedná se zejména o informace získané při studiu literárních zdrojů, ale jsou zde uvedeny i slovně předané informace od zkušenějších kolegů. Detailnější informace o problematice kavitace může čtenář nalézt v kvalitní odborné knižní literatuře, např. (Brennen, 1995; Franc a Michel, 2004; Kim et al., 2014; Leighton, 1994; Brdička et al., 1981; Noskievič, 1969, 1990). Na tento všeobecný oddíl plynule navazují oddíly, zabývající se už hlouběji specifickými tématy blízkými problematice disertační práce.

#### 1.2 Kavitační eroze

Za původce kavitačního poškození (kavitační eroze) jsou v odborných kruzích považovány některé z doprovodných jevů, které se vyskytují při kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur. Nejčastěji jsou ale uvažovány hlavní dva jevy, a to silná tlaková vlna (rázová vlna) a mikroproud (jet efekt). Existují však i další, dnes již starší teorie vzniku kavitačního poškození, které berou v potaz např. tepelný účinek vysoce zahřátého plynu v kavitační bublině během kolapsu, či elektrochemické proudy v materiálu. První z těchto alternativních teorií staví na poznatku Noltingka a Neppirase (1950), kteří pro vnitřek kavitační bubliny ve fázi imploze při jejím minimálním poloměru vypočítali teplotu obsahu až 10 300 K. Takto vysoké teploty pak ohřívají povrchové vrstvy, dochází k poklesu pevnosti materiálu a jeho rozrušení. Uvedená teorie získala oporu v experimentech na čele vlnovodu magnetostrikčního rezonátoru kmitů. Proti této teorii jdou hlavně názory, že dochází k přenosu jen malého množství tepla v důsledku krátké doby kolapsu a zároveň, že ohřevu povrchové vrstvy je zabráněno tenkou vrstvou kapaliny v blízkosti povrchu. Další z teorií vzniku kavitačního poškození, teorie poškození na základě elektrochemických jevů, je založena na poznatcích Petracchina (1949), který za příčinu kavitačního poškození považuje elektrochemické procesy v důsledku elektrických proudů v materiálu. Ty dle autora vznikají na základě rozdílných mechanických napětí a tím i rozdílných deformací v sousedních krystalech pevné látky, vyvolaných dynamickými účinky kavitačních bublin. Teorie Petracchina (1949) získala oporu v experimentech Nechleby (1955), prováděných v agresivním prostředí, ve kterém byly kavitační účinky sníženy katodickou ochranou. Dalším možným vysvětlením spojujícím obě alternativní teorie je jev, kdy v důsledku kolapsu dochází k místnímu ohřevu části povrchové vrstvy, která tvoří s okolním chladným materiálem termoelektrický článek, vyvolávající elektrochemickou korozi povrchu. Obě alternativní teorie v průběhu času ztrácí na významu, neboť byla provedena řada experimentů a teoretických studií, potvrzujících účinky rázových vln a jetů, z nichž některé jsou uvedeny v následujících oddílech. Právě dva zmíněné jevy se vyznačují velmi krátkou dobou trvání (v řádech mikrosekund) a vysoce intenzivním působením na okolní tělesa (v řádech desítek a stovek megapascalů). Zároveň jsou koncentrovány na velmi malých plochách (kruhové oblasti o průměru desítek mikrometrů) a během kolapsu se superponují (mluvíme obecně o impaktu od kolapsu kavitační bubliny či mraku kavitačních bublin). V důsledku lokálního působení takového extrémního charakteru pak dochází ke kavitačnímu poškození. Mechanismus eroze je dle této teorie následující (např. Brdička et al., 1981, s. 157; Kim et al., 2014, kap. 5). Tlak způsobuje namáhání materiálu, dochází k únavě materiálu a jeho plastické deformaci. Deformovaná místa tak mění své mechanické vlastnosti oproti základnímu materiálu. V důsledku toho dochází v další fázi procesu k odtržení deformovaných částí od povrchu a tím úbytku materiálu, který je popsán erozními křivkami. Erozní křivka závislosti rychlosti úbytku hmotnosti materiálu m v čase t je uvedena na obrázku 1.5. Na této křivce lze ukázat pět fází průběhu kavitační eroze. První je fáze inkubace, kdy je povrch materiálu plasticky deformován (a zpevňován) bez úbytku materiálu. Během této fáze vznikají na povrchu materiálu tzv. pity (důlky), ale nedochází k úběru materiálu. Kavitační testy v této fázi se proto nazývají pitting testy. Další fází je fáze akcelerace, je dosaženo maximálního zpevnění a dochází k prvnímu porušení a odtrhávání materiálu na hranicích zrn. Rychlost úbytku hmotnosti materiálu se zvětšuje, až dosáhne svého maxima. Při odebírání vrchní vrstvy se erodovaná oblast zdrsňuje. Přibývající drsnost povrchu začíná ovlivňovat průběh eroze. Plyn či kapalina v hlubších místech drsnosti zmenšují intenzitu silných tlakových účinků od kolapsů a rychlost úbytku hmotnosti materiálu se sníží. Tuto fázi nazýváme decelerace. Následuje fáze konstantního úbytku hmotnosti materiálu. Je dosaženo rovnováhy mezi účinky na materiál a reakcí materiálu na tyto účinky. U dlouhodobé kavitační eroze následuje fáze zeslabení s poklesem rychlosti úbytku hmotnosti materiálu.



Obrázek 1.5: Obecná erozní křivka

Průběh kavitační eroze závisí na provozních podmínkách hydraulického stroje či zařízení. Kavitační eroze vzniká na různých místech, erodovaná oblast může mít různý tvar a různou velikost. Příklad kavitačního poškození je na obrázku 1.6, představujícím tentýž axiální pohled na oběžné kolo odstředivého čerpadla. Na obrázku vlevo je vidět typický mrak kavitačních bublin, pohybující se relativně z levého dolního rohu do pravého horního rohu, kde jeho kolaps způsobuje kavitační erozi, viditelnou pak na pravém obrázku.



**Obrázek 1.6:** Mrak kavitačních bublin (vlevo) a jím způsobená kavitační eroze (vpravo) na oběžném kole odstředivého čerpadla (Soyama, Kato a Oba, 1992)

#### 1.3 Kolaps kavitační bubliny v blízkosti pevných povrchů

V úvodní kapitole byly uvedeny doprovodné jevy kolabující kavitační bubliny. Na některé z nich je třeba se v kontextu této práce zaměřit podrobněji, protože právě jejich interakce s přilehlým pevným povrchem vede ke kavitační erozi. Na počátku je důležité uvést skutečnost, že pokud kavitační bubliny nebo jejich mrak vznikají v blízkosti povrchů, v našem případě konkrétně v blízkosti povrchů částí hydraulických strojů či zařízení, je průběh kavitačního děje značně ovlivněn. Jedná se totiž o tzv. nesymetrický případ výskytu kavitační bubliny či struktury, kdy je její tlakové pole v interakci s okolními tělesy. Okolními tělesy mohou být nejen přilehlé povrchy těles, ale i další koexistující bubliny v případě mraku kavitačních bublin. Tím se situace značně komplikuje a nelze obecně definovat probíhající děj při kolapsu kavitační bubliny či mraku kavitačních bublin, který je rozhodující pro vznik kavitační eroze přilehlého pevného povrchu. Existuje však obecný popis mechanismu kolapsu pro zjednodušený případ, kterým je kolaps osamocené kulové kavitační bubliny v blízkosti pevné stěny, na němž lze ukázat jednotlivé doprovodné efekty. Jedná se sice o konkrétní a zjednodušený případ, ale právě proto ho lze využít pro demonstraci jednotlivých doprovodných efektů. Ty se totiž pro komplexnější kavitační struktury mohou různě ovlivňovat a kombinovat. V problematice mechanismu kolapsu v blízkosti pevné stěny se zavádí bezrozměrný parametr y, definovaný jako podíl počáteční vzdálenosti středu bublinky  $L_0$  od stěny a prvního maximálního poloměru bublinky  $R_{max,1}$ :

$$\gamma = \frac{L_0}{R_{max,1}}.$$
(1.1)

Kolaps kavitační bubliny s ohledem na vznik kavitační eroze bude v následujícím textu vysvětlen na základě vědeckých prací Philippa a Lauterborna (1998), Vogela et al. (1989), Tonga et al. (1999) a Franca a Michela (2004). Dále budou využity poznatky, získané při měřeních v laboratořích KEZ TUL. Nejdříve ale budou popsány doprovodné jevy. Prvním doprovodným

jevem kolapsu kavitační bubliny je silná tlaková vlna, označovaná rovněž jako rázová vlna (často označovaná anglicky přímo "shock wave"). Při kolapsu kavitační bubliny se její plynný obsah smršťuje, pára obsažená uvnitř bubliny kondenzuje a okolní kapalina se snaží prostor zaplnit. Dochází k velkému stlačení plynného obsahu, místnímu zvýšení teploty a tlakovému rázu. Tato tlaková vlna je emitována radiálně do okolí kavitační bubliny. Při emisi tlaková vlna dosahuje vysoké intenzity řádu stovek megapascalů, její trvání je v řádu mikrosekund a hodnota její amplitudy klesá prostorově s převrácenou hodnotou vzdálenosti od středu. Na obrázku 1.7 jsou technikou multiexpozice zaznamenané rázové vlny od několika kolapsů téže laserem generované kavitační bubliny.



Obrázek 1.7: Rázové vlny bublinky generované laserem (Müller, 2008, s povolením autora)

Dalším doprovodným jevem je tzv. jet (často označovaný anglicky přímo "jet", či "jet effect", někdy "microjet"; v přímém překladu proud, mikroproud; doporučeno užívat označení jet nebo jet efekt), jehož existence byla zpozorována Benjaminem a Ellisem (1966). Vznik jetu doprovází kolaps kavitační bubliny v případě, kdy se tato vyskytuje v blízkosti tělesa. Jet totiž vzniká pouze v nesymetrickém případě, kdy je rozložení tlaku v okolí kavitační bubliny nerovnoměrné právě v důsledku existence blízkého tělesa. Jet je tvořen mikroproudem tekutiny proudící z prostoru odlehlého k tělesu (prostoru za kavitační bublinou) skrz střed kavitační bubliny ve směru kolmém ke stěně. Formování jetu může být vysvětleno na základě různého zakřivení povrchu bublinky, kdy pro zakřivení určitého poloměru může být dopočítán různý čas kolapsu z tzv. Rayleighova vztahu (Franc a Michel, 2004, s. 39). Více zakřivený povrch kavitační bublinky kolabuje větší rychlostí než méně zakřivený plošší povrch, který je přilehlý k pevné stěně. Jet je potom výsledkem rychlejšího proudění v prostoru za kavitační bublinou. Vedle formování jetu navíc dochází k dalšímu důležitému jevu, a to přibližování kavitační bublinky ke stěně v důsledku Bjerknesových sil (Bjerknes, 1906). Po expanzi na maximální poloměr kavitační bublina kolabuje a v důsledku blízké stěny je radiální proudění do středu kavitační bubliny ovlivněno. U povrchu kavitační bubliny, který je blíže pevnému povrchu, dochází ke zpomalení proudění. Tlak v blízkosti povrchu kavitační bubliny přilehlého k pevné stěně je menší, než je tlak v blízkosti odvráceného povrchu a kulový tvar bublinky se deformuje. Tlakový gradient vede na odlišné hodnoty zrychlení přilehlého a odvráceného povrchu, z čehož plyne následný posun středu kavitační bublinky blíže k pevné stěně v průběhu kolapsu. Rychlost jetu je v řádu desítek až stovek metrů za sekundu. Tlakový pulz, působící na pevnou stěnu v důsledku impaktu, může být dopočítán ze Zhukovského vztahu (Zhukovsky, 1898) pro vodní ráz:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_{jet} , \qquad (1.2)$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny, *c* je rychlost zvuku v dané kapalině a  $v_{jet}$  je rychlost mikroproudu (jetu). Tak například pro rychlost jetu 100 m·s<sup>-1</sup> ve vodě teploty 20 °C o hustotě 998 kg·m<sup>-3</sup> a přibližně rychlosti zvuku 1481 m·s<sup>-1</sup> je nárůst tlaku od jetu 148 MPa. Ukázka výrazného jetu je na obrázku 1.8.



**Obrázek 1.8:** Kavitační bublinka v blízkosti pevné stěny s výrazným jetem (Lawrence Crum, s povolením autora)

Formování jet efektu je dokumentováno na obrázku 1.9, kde je série snímků z experimentu provedeného v rámci vlastní diplomové práce (Hujer, 2010). Kavitační bublina byla generována teplem přechodového odporu na dotyku dvou elektrod (na obrázku jako vodorovné čáry) v blízkosti pevné stěny (černá spodní část jednotlivých obrázků, v horní části je špička jehlového hydrofonu) pro hodnotu parametru  $\gamma = 1,01$ . Na obrázku je vidět aktivita kavitační bubliny o maximálním poloměru 5,9 mm v čase, kdy mezi jednotlivými snímky je interval 100 µs. Kolapsy jsou vyznačeny červenými tečkami. Zřetelně vidíme, že mikroproud se kavitační bublinou začíná provlékat v okamžiku blízkému obrázku těsně před jednou červenou tečkou. Zároveň vidíme, že dochází k přiblížení kavitační bubliny blíže ke stěně, jejímu "přisátí" na stěnu a rozpadu na mrak kavitačních bublin.



Obrázek 1.9: Formování jetu

# 1.4 Mechanismus kolapsu osamocené kulové kavitační bubliny a související kavitační eroze

Při popisu mechanismu kolapsu vyjdeme z experimentu provedeného Philippem a Lauterbornem (1998), kteří vyšetřovali dynamiku kolapsu osamocené kavitační bubliny generované laserem v blízkosti leštěných vzorků hliníku čistoty 99,999 %. Aktivita bubliny byla sledována pomocí vysokorychlostní kamery, hydrofonu a PVDF senzoru. Autoři v práci rozeznali vzor kavitačního poškození určitého mechanismu kolapsu pro různé hodnoty parametru γ. Došli k závěru, že pokud se bublinka nachází ve vzdálenosti od stěny větší jak dvojnásobek jejího poloměru, tj. pro hodnoty  $\gamma > 2$ , je během své aktivity přilehlou stěnou ovlivněna minimálně. Může docházet k její mírné deformaci (protažení) či vzniku jetu, ale pouze malého objemu tekutiny. Kavitační bublinka pro hodnoty  $\gamma > 2$  zůstává na témže místě a během kolapsů dochází k vyzařování tlakových rázových vln. Během prvního kolapsu je rázovou vlnou vyzářena většina energie bublinky a rázové vlny dalších kolapsů jsou již slabé. Naopak pro hodnoty  $\gamma < 2$ , tj. pro případ, kdy se bublina na počátku vyskytuje ve vzdálenosti menší dvojnásobku jejího maximálního poloměru, se už kavitační poškození objevuje. Pro oblast hodnot  $\gamma < 2$  autoři nalezli důležité intervaly a popsali pro ně dynamiku chování kavitační bubliny a vznikající kavitační erozi. Největších erozních sil, působících na blízký pevný povrch, bylo dosaženo kolabující bublinou v přímém kontaktu s pevným povrchem, kde působil tlak dosahující řádu několika gigapascalů. Proto je z pohledu kavitačního poškození důležité, kde se bublina během své aktivity nachází a pak, že v důsledku Bjerknesových sil dochází k jejímu přibližování k pevné stěně v průběhu kolapsu. Potom pro hodnoty  $\gamma < 2$  dochází k přiblížení bubliny k pevné stěně během prvního kolapsu a následně jejímu dotyku pevné stěny během druhého kolapsu. Pro hodnoty  $\gamma < 1$  dochází k dotyku bubliny pevné stěny již během prvního kolapsu. To souvisí s poškozením; pro oblast  $\gamma \le 0.7$  dochází k poškození během prvního kolapsu; pro oblast  $0.9 \le \gamma \le 2$  dochází k poškození během druhého kolapsu, kdy je po prvním kolapsu bublinka již přiblížena a "přisáta na stěně".

Při experimentech, které byly provedeny pro  $\gamma < 3$ , byl součástí kolapsu jet. Jet výrazně přispíval ke kavitačnímu poškození pro hodnoty  $\gamma \le 0.7$  v důsledku jeho vysoké rychlosti, dosahující až 83 m·s<sup>-1</sup>. Této rychlosti odpovídá tlak vodního rázu 0,1 GPa. Naopak pro hodnoty  $\gamma > 1$  dosahovala rychlost jetu pouze 25 m·s<sup>-1</sup>. Největší poškození pevného povrchu bylo zaznamenáno pro hodnoty  $\gamma = (1, 2 - 1, 4)$  a  $\gamma \le 0, 3$ . Naopak k výraznému snížení poškození docházelo pro  $0, 5 \le \gamma \le 1, 1, \text{ což bylo vyvoláno existencí dalšího důležitého jevu, tzv. splash efektu (anglicky "splash effect"; v přímém překladu stříknutí, či cáknutí tekutiny; doporučeno užívat označení splash, či splash efekt), objevujícího se po jetu směřujícího do stěny. To je ve shodě s experimenty autorů Vogela et al. (1989), kteří zjistili, že tlaková vlna je v rozsahu zmíněných hodnot parametru <math>\gamma$  nejslabší a na jejím základě se uvolní pouze 10 % z energie kavitační bubliny. Autoři v práci rovněž uvádí, že při sférickém kolapsu bubliny, tj. u bubliny nacházející se ve vzdálenosti od stěny větší jak dvojnásobek jejího poloměru, je rázovou vlnou uvolněno energie podstatně více, a to až 73 % počáteční energie bubliny.

Tong et al. (1999) se zabývali mechanismem vzniku a účinku splash efektu, který se vyskytuje v intervalu  $0.8 < \gamma < 1.2$ . Při provlékání jetu kolabující kavitační bublinou vede blízkost stěny k radiálnímu toku kapaliny od jetu, a to ve směru od jeho osy. Tento tok se střetává s tokem,

vznikajícím v důsledku imploze zmenšující se kavitační bubliny a výsledkem je splash efekt, který je vyslán směrem od stěny, tj. proti směru jetu. Splash proudí okolo kavitační bubliny, může působit na její povrch a přitom ji deformovat až i rozdělit. V místech povrchu kavitační bubliny na straně odléhající od stěny se proud splashe střetává s jetem stále proudícím středem kavitační bubliny. Při setkání jetu a splashe, tj. dvou proudů velkých rychlostí, dochází k emisi tlakových vln. Kavitační bublina se v tomto okamžiku v důsledku tlakového pole přibližuje ke stěně. Přitom kavitační bublina dosahuje svého minimálního objemu a následuje její expanze s dalším zrychlením proudění skrz střed toroidu. Z pohledu na impakt na přilehlou stěnu autoři zjistili, že tlak měřený na stěně při prvním kolapsu dosahuje minim, ale zároveň dochází k nárůstu doby jeho působení. Současně dochází k nárůstu tohoto tlaku s klesající hodnotou parametru  $\gamma$  ve sledovaném intervalu. Z energetického pohledu na mechanismus splash efektu autoři vyvodili závěr, že velká část kinetické energie radiálního toku dovnitř bubliny je transformována na kinetickou energii rotujícího proudění okolo bubliny. Obsah bublinky se pak stává méně stlačeným a emitovaná tlaková vlna během prvního kolapsu je zeslabena. Naopak dochází ke vzniku hydrodynamických tlaků v důsledku proudění okolo toroidální kavitační bubliny, které jsou silnější než tlaky v důsledku jetu. Kombinace splash efektu a rázové vlny, společně s expanzí bubliny vedoucí k proudění okolo toroidální kavitační bubliny, vede na superpozici tlaků od jednotlivých jevů. Je vhodné podotknout, že totožný mechanismus poklesu intenzity tlakové vlny je uplatněn i u bubliny, která je v přímém kontaktu s pevnou stěnou v momentu prvního kolapsu. Na obrázku 1.10 je ukázka modelování formování splash efektu v čase pro  $\gamma = 0.92$ . Na obrázku jsou deformované kavitační bubliny a působící splash, prezentovaný ve formě vektorů rychlosti. Další podrobnosti zde pro svou složitost nejsou uvedeny, lze je najít v původní práci.



Obrázek 1.10: Formování splash efektu (Tong et al., 1999)

Se znalostí mechanismu kolapsu kavitační bubliny lze pokročit k odpovídajícímu kavitačnímu poškození. Philipp a Lauterborn (1998) experimentálně studovali i erozi na vzorcích hliníku čistoty 99,999 %, mosazi a korozivzdorné oceli. Z pohledu na tvar elementárního

poškození (deformace) ve formě pitů v inkubační fázi kavitační eroze autoři odlišili dva vzory. V rozsahu hodnot  $\gamma = (1,7 - 2)$  bubliny kolabovaly v jednom bodě a pod jejich středem byl pozorován vznik jednoho mělkého pitu. Pro hodnoty  $\gamma \le 1,7$  se kulová bublina měnila v toroid v důsledku jetu proudícího skrz bublinu ke stěně. Zároveň se bublina rozpadla na mnoho menších bublin, které následně kolabovaly odděleně v okolí toroidu a způsobily poškození ve tvaru mezikruží. Na dvou následujících snímcích obrázku 1.11, které byly vybrány z původní práce, jsou ukázky kavitačního poškození na vzorcích hliníku čistoty 99,999 %, způsobeného účinkem 100 laserem generovaných kavitačních bublin. Pro každý vzorek byly generovány identické kavitační bubliny o prvním maximálním poloměru  $R_{maxI} = 1,45 \pm 0,03$  v různé vzdálenosti od povrchu vzorku, tedy pro různé hodnoty parametru  $\gamma$ . Snímky jsou získány z optického mikroskopu s různým interferenčním kontrastem a jejich šířka odpovídá ve skutečnosti 2,6 mm.



**Obrázek 1.11:** Kavitační poškození po účinku 100 kavitačních bublin pro různou hodnotu parametru γ (Philipp a Lauterborn, 1998)

Z obrázků lze vidět, že při zmenšování hodnoty parametru  $\gamma$  dochází ke zvětšení erodované oblasti a přesunu pitů z centrálního shluku do mezikruží o poloměru 1,9 mm. Pro  $\gamma$  = 1,91 bylo dosaženo největší hloubky pitu 7 µm, pro  $\gamma$  = 1,21 (snímek není na obrázku ukázán) pak největší hloubky pitu 3,4 µm. Pro kavitační bubliny generované blíže povrchu, zde konkrétně při hodnotách  $\gamma$  = 0,31, bylo dosaženo výrazné globální deformace povrchu vzorku (hloubky až 130 µm), doplněné o dva velké pity (hloubky 8,4 µm) a množství menších mělkých pitů vyskytujících se v celé této oblasti. Tento případ je na obrázku 1.12.

Experiment, ve kterém byl zkoumán účinek jednoho sta kavitačních bublin, byl doplněn o výzkum účinku jedné kavitační bubliny opět v blízkosti vzorků hliníku čistoty 99,999 %. Autoři zjistili, že ke kavitačnímu poškození dochází pouze v případě hodnot  $\gamma \le 2$ . Z této části experimentu rovněž vyplynulo dříve řečené, že největší poškození povrchu nastává při hodnotách  $\gamma = (1, 2 - 1, 4)$  a  $\gamma \le 0, 3$ , což bylo stanoveno na základě objemu pitu, který odpovídá deformační energii. Poškození při účinku 100 kavitačních bublin je výrazně větší než při kolapsu jedné kavitační bubliny v důsledku superpozice, jak je vidět na obrázku 1.12 pro  $R_{maxI} = 1,45$  a  $\gamma = 0,31$ . Šířka obrázku je opět 2,6 mm. Maximální hloubka pitu pro jednu bublinku je 7,1 µm a maximální hloubková penetrace při účinku 100 kavitačních bublin je 130 µm.



**Obrázek 1.12:** Poškození od 1 kavitační bubliny (vlevo) a 100 kavitačních bublin (vpravo) pro  $\gamma = 0,31$  (Philipp a Lauterborn, 1998)

Autoři dále studovali vliv velikosti kavitačních bublin na velikost kavitačního poškození a potvrdili předpoklad, že pro větší kavitační bubliny dochází k většímu kavitačnímu poškození. Poslední z provedených testů měl za cíl zjistit kavitační poškození u materiálů různé tvrdosti pro  $\gamma = 1,28$  a při účinku 100 kavitačních bublin. U vzorků z hliníku byla hloubka deformace oblasti 43 µm, u mosazi 1,27 µm a u korozivzdorné oceli 0,1 µm. Vzor eroze zůstal ve všech případech totožný.

#### 1.5 Interakce kavitační bubliny a tlakové rázové vlny

Tomita a Shima (1986) si při studiu tlaku a kavitačního poškození vznikajícího v důsledku kolapsu kavitační bubliny povšimli, že dochází k interakci rázové vlny generované během kolapsu s neexcitovanými bublinami vyskytujícími se v blízkém okolí. Autoři sestavili experiment se zdrojem tlakových vln o amplitudě 5 MPa, umístěným v ose symetrie neexcitované vzduchové bubliny, vyskytující se v blízkosti pevné stěny. Materiálem pevné stěny bylo indium. Bylo zjištěno, že interakce rázové vlny vede na vznik jetu a to i v případě, kdy se v okolí bubliny nenachází žádné těleso. V případě interakce kavitační bubliny, připojené k pevnému povrchu, s rázovou vlnou, dochází ke vniku jetu, kolapsu a kavitačnímu poškození přilehlé stěny. Příkladem může být série následujících snímků s intervalem 0,5  $\mu$ s na obrázku 1.13. Vzduchová bublina o poloměru R = 0,42 mm interaguje s rázovou vlnou v blízkosti vzorku india (v horní části snímků). Na pravé části obrázku je odpovídající kavitační poškození.



**Obrázek 1.13:** Kolaps vzduchové bubliny v důsledku interakce s rázovou vlnou vyslanou symetricky (upraveno, Tomita a Shima, 1986)

Autoři dále zjišťovali, jak bude ovlivněn mechanismus kolapsu v případě rázové vlny, vyslané pod obecným úhlem k ose symetrie neexcitované bubliny v blízkosti pevné stěny. Na následujících snímcích s intervalem 0,5  $\mu$ s na obrázku 1.14 je ukázka interakce tlakové rázové vlny se vzduchovou bublinou o poloměru R = 0,41 mm. Vzniká jet, který není kolmý na

přilehlou pevnou stěnu vzorku, ale svírá s ní ostrý úhel. Odpovídající kavitační poškození je na pravé části obrázku.



**Obrázek 1.14:** Kolaps vzduchové bubliny v důsledku interakce s rázovou vlnou vyslanou nesymetricky (upraveno, Tomita a Shima, 1986)

V praktických případech interakce rázové vlny a kavitační bubliny získává na významu v důsledku toho, že kavitační oblast je tvořena velkým množstvím různých kavitačních bublin a jejich strukturami. V kavitačních oblastech se často objevují i bubliny tvořené nerozpuštěnými plyny, či bubliny vzniklé rozpadem původní kavitační bubliny, které dále v oblasti setrvávají, a tak i ony mohou interagovat s rázovými vlnami od kolapsů dalších bublin a podílet se na kavitačním poškození.

#### 1.6 Kolaps kavitačních struktur a mraku kavitačních bublin

Kavitační oblast může být tvořena kavitačními strukturami různých tvarů a velikostí. Příkladem může být kavitace v turbínách, u nichž se setkáváme s různými tvary vírového copu v sací troubě. Studiu kavitační oblasti vznikající na hydraulickém profilu NACA 4412 pro různé úhly náběhu se věnoval Kermeen (1956). Na obrázku 1.15, pro úhel náběhu profilu 0 °, rychlost proudění 13,7 m·s<sup>-1</sup> a kavitační číslo  $\sigma = 0,3$  vidíme kavitační strukturu tvořenou velkými kavitačními bublinami (dutinami) a mraky kavitačních bublin. Jejich množství a rozměry nabývají širokého rozsahu hodnot. Tvary mohou být rovněž různé a ovlivněné okolní asymetrií.



Obrázek 1.15: Kavitační oblast na hydraulickém profilu NACA 4412 (Kermeen, 1956)

Kolaps kavitačních struktur je i v tomto případě ovlivněn vyskytující se asymetrií, která se výrazně projevuje v případě kolapsu mraku kavitačním bublin. U nich totiž dochází ke

společnému (kolektivnímu) kolapsu velkého množství bublin, který je více intenzivní a zároveň narůstá potenciál kavitačního poškození (Bark a Berlekom, 1978; Soyama et al., 1992; Reisman et al. 1994). Mechanismus se snažil vysvětlit Morch (1980, 1981) a numericky později Wang a Brennen (1995) na základě teorie fokusování tlakových vln od kolapsů jednotlivých bublin, tvořících mrak bublin. Wang a Brennen (1995) se zabývali numerickou studií dynamiky a kolapsu kulového mraku kavitačních bublin v nestlačitelné tekutině. V tomto případě byl kulový kavitační mrak tvořen rovnoměrně rozloženými vzduchovými bublinkami o počátečním poloměru  $R_0 = 100 \,\mu\text{m}$  o jejich různých objemových zlomcích a pro různá kavitační čísla. Výsledky ukázaly, že růst kulového mraku bublin je podobný růstu odpovídajícímu růstu osamocené kulové bubliny, nicméně s tím, že bubliny uvnitř mraku jsou chráněny bublinami na povrchu, proto rostou pomaleji a dosahují menších maximálních poloměrů. Při velkých objemových podílech je růst jednotlivých bublin silně ovlivněn přítomností okolních bublin a dochází k rovnoměrnému růstu vnitřních bublin na podobné maximální rozměry. Bubliny na povrchu kulového mraku obecně dosahovaly větších maximálních poloměrů než bubliny uvnitř mraku. Rozložení velikostí bublin, objemový podíl bublin v mraku bublin a délkové měřítko oblasti nízkého tlaku, představující buzení mraku bublin, vede na rozdílný mechanismus kolapsu. První typ mechanismu kolapsu nastává v případě velkých objemových zlomků bublin uvnitř mraku bublin a pro délkové měřítko oblasti nízkého tlaku blízkého velikosti mraku bublin. Při prvním typu mechanismu kolabují nejdříve bubliny na povrchu mraku a kolaps se fokusuje směrem do středu kulového mraku a emitovaná tlaková vlna značně zesiluje. Druhý typ mechanismu kolapsu nastane v případě malého objemového zlomku bublin uvnitř kulového mraku a pro velké hodnoty délkového měřítka oblasti nízkého tlaku oproti velikosti mraku bublin. V tomto případě dosahují bublinky uvnitř mraku opět menších maximálních poloměrů a zároveň v důsledku délkového měřítka oblasti nízkých tlaků kolabují dříve než bublinky na okrajích. Kolaps se šíří směrem od středu a nedochází k zesílení tlakové vlny. Výsledný účinek je proto menší než v prvním případě. Třetí typ mechanismu kolapsu je charakteristický pozicí počátku kolapsu, která se nachází v oblasti mezi středem a okrajem mraku bublin a šíří se v tentýž okamžik radiálně do středu a ven od středu. Tyto dvě oblasti kolabují, ale jen pro vnitřní oblast dochází k zesílení účinku, nicméně slabšího než pro první vzor.

#### Kapitola 2

# Generování kavitačního mraku a metody studia kavitace

Kavitační bubliny, mraky kavitačních bublin a jejich struktury přirozeně vznikají v hydraulických strojích a zařízeních, ale lze je generovat i uměle v testovacích zařízeních. Kavitace a doprovodné jevy je potom možné studovat přímo v hydraulickém stroji či zařízení, nebo v testovacím zařízení. Přirozeně vznikající kavitace se studuje hlavně v kavitačních tunelech. Pro testování kavitační odolnosti materiálů existuje celá řada testovacích zařízení, ve kterých se generuje kavitace uměle a to o extrémních parametrech. Některá z testovacích zařízení jsou, včetně charakteru generovaného kavitačního mraku a kavitační eroze, popsány v této kapitole. Jsou zde rovněž uvedeny některé přístupy a metody, které byly užity ke studiu kavitace na uvedených testovacích zařízeních a které se týkají problematiky disertační práce.

#### 2.1 Kavitační tunel

Kavitační tunel je základní testovací zařízení pro výzkum různých vývojových forem kavitace (vznikající, vyvinutá, ...) pro různé provozní podmínky a geometrie hydraulického profilu. Příkladem může být kavitační tunel společnosti Sigma Group a.s. v Lutíně, jehož testovací sekce, ve které je mrak kavitačních bublin generován a studován, je na obrázku 1.4. Další části tunelu nejsou na obrázku ukázány, ale většinou je kavitační tunel dále tvořen čerpadlem, zásobníkem kapaliny, uklidňovacím zásobníkem kapaliny, uzavíracími ventily, prvky pro řízení turbulence a měřidly (průtokoměry, termočlánky, senzory tlaku). Tunel může být připojen k vývěvě či kompresoru. Ve spolupráci s naší katedrou byl v uvedeném kavitačním tunelu studován vliv různého úhlu natočení lopatky hydraulického profilu NACA 2412 vůči proudu tekutiny na vznik a účinek kolabující kavitační struktury. Na lopatce bylo umístěno několik piezoelektrických senzorů tlaku a za lopatkou byl umístěn hydrofon (měřidlo akustického tlaku v kapalině, na obrázku hnědočervený). Prvním možným přístupem ke studiu kolapsů kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů je tedy měření jejich účinků senzoricky (dále např. Reisman et al. 1998, Okada et al. 1995, Momma a Lichtarowitz, 1995 a další). Do oblasti, kde dochází ke kolapsům, je umístěn senzor vhodných vlastností a měří se jím účinek od kavitace.

Rijsbergen et al. (2012) studovali kavitaci na hydraulickém profilu NACA 0015 v kavitačním tunelu. Cílem experimentu bylo vyšetřit mechanismus kolapsu vznikajících kavitačních struktur včetně potenciální eroze a jí odpovídající akustické emisi. Při experimentu byly použity dvě vysokorychlostní kamery. První kamera sloužila pro sledování kavitačního mraku z boční strany, druhá kamera pak pro sledování kavitačního mraku shora a zároveň pro sledování poškození tenké vrstvy nátěru, kterou byl hydraulický profil opatřen. Testovací sekce a profil byly osazeny akustickými senzory pro měření akustické emise od kolapsu kavitačního mraku. Autoři získali

záznam kolapsu pro určité podmínky proudění, akustický signál a snímky poškození a na jejich základě popsali studovaný děj.

Reisman et al. (1998) vyšetřovali experimentálně tlakové vlny generované mrakem kavitačních bublin v blízkosti hydraulického profilu NACA 0021 s drobnými úpravami geometrie. Schéma měřicí sestavy je na obrázku 2.1. Popisky jsou v anglickém jazyce a nebudou pro svou jednoduchost překládány. Hydraulický profil byl umístěn v hydraulickém tunelu (water tunel, LTWT, Caltech) a osazen piezoelektrickými tlakovými snímači PCB 105B02 (#1 - #4). Za hydraulickým profilem byl umístěn piezoelektrický tlakový snímač PCB HS113A21 (#F) a v téže vzdálenosti byl ve stropu kavitačního tunelu byl umístěn další tlakový snímač PCB HS113A21 (#F) a v téže vzdálenosti byl ve stropu kavitačního tunelu byl umístěn další tlakový snímač PCB HS113A21 (#C, na obrázku nevyznačen). Okolí hydraulického profilu bylo snímkováno vysokorychlostní kamerou s frekvencí 500 Hz. Autoři v práci popisují kavitační struktury a jejich aktivitu v blízkosti hydraulického profilu pro různá kavitační čísla.



Obrázek 2.1: Hydraulický profil a pozice snímačů tlaku (Reisman et al., 1998, s povolením autora)

Autoři dále vyhodnotili tlaková měření a synchronizované záznamy z vysokorychlostní kamery pro různé kavitační struktury. Na následujícím obrázku 2.2, na levé části, jsou snímky a záznam ze snímačů tlaku pro rychlost proudění  $v = 8,5 \text{ m.s}^{-1}$ , kavitační číslo  $\sigma = 0,95$ , úhel náběhu  $\alpha_f = 7^{\circ}$  a redukovanou úhlovou frekvenci  $\omega_r = 0,71$ . Voda proudí zprava doleva a náběžná hrana začíná na svislé hraně obrázku. Mezi snímky je časový interval 2 ms. Na pravém obrázku je signál ze snímačů tlaku udávající závislost tlaku v čase. Vertikální osa tlaku je bez počátku s dělením 1 MPa na dílek stupnice. Kolaps kavitační struktury nastal mezi okamžiky (b) a (c), v záznamu signálů v oblasti vyznačenými svislými čarami. Kolaps vygeneroval silný tlakový pulz, zaznamenaný všemi snímači. Zpoždění pulzu v případě snímače #1 a #2 může být vysvětleno přítomností bublin, vyskytujících se na náběžné hraně, které způsobují pokles lokální rychlosti zvuku. Nejsilnější účinek zaznamenal senzor #F. Jedná se o kolektivní kolaps kavitačního mraku. Autoři dále obdobně popisují další režimy, které zahrnují řadu specifických mechanismů kolapsu. Autoři rovněž vyhodnocují akustické impulzy v závislosti na změně parametrů režimů.



**Obrázek 2.2:** Kavitující struktura a odpovídající záznam signálů (Reisman et al., 1998, s povolením autora)

Druhý možný přístup ke studiu kolapsů kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů plyne ze skutečnosti, že tato problematika je svou podstatou i výzkumem kavitační eroze, úzce spojené s materiálovými vědami. Samotný průběh kavitační eroze určuje metody výzkumu kavitační eroze, a to na základě významných fází kavitační eroze. Začněme fází s konstantním úbytkem materiálu. V tomto případě se jedná o tzv. test kavitační odolnosti materiálu, kdy je testovaný vzorek vystaven účinkům kavitace po delší dobu (i vícekrát), je silně erodován, dochází k odebírání materiálu a zjišťuje se např. úbytek materiálu v čase (např. Osterman et al., 2009; Soyama, 2013 a celá řada dalších autorů, neboť se jedná o jeden ze základních kavitačních testů materiálu), nebo profil erodované oblasti (Franc, 2009). Testy kavitační odolnosti materiálu se v kavitačních tunelech většinou z důvodu nízké agresivity kavitačního proudění neprovádějí. Existují pro ně vhodnější testovací zařízení, jejichž popis bude následovat v dalších oddílech. Druhou významnou fází kavitační eroze je fáze inkubace, při níž se provádějí pitting testy. Vzorek je v tomto případě vystaven účinkům kavitace po velmi krátkou dobu, během níž vznikají jednotlivé pity (důlky), které se následně analyzují. Materiál přitom není odebírán a tak jednotlivé pity představují pouze jeho plastickou deformaci. Carnelli et al. (2012) z pohledu na individuální geometrii pitu zjistili tlak, který daný pit vytvořil. Reverzně tedy přešli od materiálové deformace k účinku kolapsu. Franc et al. (2012) analýzou spektra pitů na určité zájmové oblasti stanovili vliv materiálu a rychlosti proudění na vznik pitů. Dular a Petkovšek (2015) se věnovali výzkumu kavitačního mraku a vzniku pitu na Venturiho trysce v kavitačním tunelu při různých provozních režimech. Geometrie trysky, kterou Dular a Petkovšek (2015) ve své práci použili, je na levé části obrázku 2.3. Směr proudění je vyznačen šipkou s popiskem "Flow". Na Venturiho trysce byla oboustrannou páskou přilepena 10 µm tenká hliníková folie pro provedení pitting testu. Pomocí záznamu z vysokorychlostních kamer autoři určili tři vzory kolapsu a k nim přiřadili kavitační erozi ve smyslu určení velikosti plochy pitu a odhadu odpovídajícího tlaku pro jeho vytvoření. Jedním ze vzorů je tzv. "twister" kolaps, jehož mechanismus je ukázán na pravé části obrázku 2.4. Pro tento kolaps je typické oddělení dvou osově rotujících struktur, které kolabují v zadní části Venturiho trysky (nejdále ze všech vzorů) na místech označených "PITS". Střední hodnota plochy pitu je 0,081 mm<sup>2</sup>, který je vytvořen odhadnutým tlakem 142 MPa.



**Obrázek 2.3:** Testovací část kavitačního tunelu a ukázka vzoru "twister" a místa vzniku pitů pro tento vzor (upraveno, Dular a Petkovšek, 2015, s povolením autora)

#### 2.2 Vysokorychlostní kavitační tunel

Dalším významným zařízením je vysokorychlostní kavitační tunel, který byl použit při experimentu ke studiu účinku mraku kavitačních bublin v rámci této disertační práce. Tomuto zařízení a rešerši na něm provedeném výzkumu kavitace je proto věnována celá kapitola.

#### 2.3 Ultrazvukový kavitační tester

Další skupinou zařízení generujících kavitační mrak jsou zařízení sloužící pro dlouhodobé testování odolnosti různých materiálů vůči kavitační erozi. Do této skupiny patří ultrazvukový kavitační tester standardizované metody dle normy ASTM G32-16 (2016). Hlavní částí testeru je kmitající trn, který generuje vysokofrekvenční tlakové akustické pole opakujících se maxim a minim tlaku. V minimech dochází ke vzniku kavitace, kterou označujeme jako akustickou kavitaci. Nevýhodou je, že kavitační mrak v tomto případě obsahuje bubliny úzkého intervalu poloměrů a současně buzeného konstantní frekvencí kavitačního trnu. Ve skutečném případě jsou bubliny širšího spektra poloměrů a jsou buzeny různými frekvencemi. Tato metoda zároveň ve svém principu nezahrnuje vliv proudění. Posledním důležitým znakem metody je výskyt kavitačního mraku při určitém nastavení stále v téže pozici. Na obrázku 2.4 vybraného z práce Znidarcice et al. (2014) jsou příklady kavitačního mraku vznikajícího pro různé trny kmitající frekvencí 20 kHz. Na prvních dvou snímcích jsou trny o průměru 3 mm pro plný (a) a poloviční (b) výkon úměrný výchylce trnu a vznikající kavitační mrak. Na dalších dvou navazujících snímcích (Kim et al., 2014) na témže obrázku 2.4 jsou ukázky erozních testů provedených metodou ASTM G32-16. Erozní testy probíhaly na materiálu Al 7075 po dobu 900 minut, první z nich pak na válcovém vzorku průměru 12,7 mm a druhý na destičce (vpravo).



**Obrázek 2.4:** Mrak kavitačních bublin generovaný ultrazvukovým testerem (Znidarcic et al., 2014) a poškození vzorků vystavených působení ultrazvukového testeru (Kim et al., 2014)

Okada et al. (1995) ukázali korelaci mezi pity a pulzy měřenými piezoelektrickým senzorem pro Venturiho trysku a ultrazvukový vibrační tester. Měření prováděli tlakovým detektorem, jehož výstupem bylo elektrické napětí, odpovídající tlakovému účinku kavitace. Tlakový detektor je znázorněn na levé části obrázku 2.5. Je tvořen testovaným vzorkem (1) vedeným v podpěře (2), která je oddělena od zbývající části detektoru gumovým těsněním (3). Čidlem je piezokeramický disk (5) s rezonanční frekvencí 10 MHz o průměru 3 mm a tloušťce 0,2 mm. Čidlo je dále umístěno mezi měděnou destičkou (4), ke které je připevněn testovaný vzorek, a měděnou reflexní tyči (6); tyto části jsou spojeny šrouby M2. Sestava je uložena v misce z akrylového lepidla. Prostor mezi miskou a měděnou tyčí je vyplněn epoxydovým lepidlem.



Obrázek 2.5: Tlakový detektor s piezokeramickým čidlem a spektrum sil (Okada et al., 1995)

Kalibrace detektoru byla provedena metodou pádu kuličky (bude vysvětleno později) a jeho citlivost pro testovaný měděný vzorek čistoty 99,96 % byla 1,41 N·V<sup>-1</sup>. Na základě kalibrace byly určeny síly z naměřených napěťových pulzů od kavitačních kolapsů. Z nich bylo následně vytvořeno spektrum sil, které je znázorněno na pravé straně obrázku 2.5. Jedná se o kumulované spektrum sil, získané za dobu testu 5 minut dvěma metodami, a to ultrazvukovým kavitačním testerem (označeno kroužkem) a ve Venturiho trysce (označeno kroužkem se začerněnou půlkou).

Na svislé ose je uveden kumulovaný počet naměřených událostí (označeno Counts) v závislosti na amplitudě síly pulzu, uvedené na vodorovné ose (Impact load). Maximální naměřená síla byla 30,2 N. Podrobný popis a vysvětlení tohoto diagramu bude následovat v dalších kapitolách této práce.

### 2.4 Kavitační jet

Dalším testovacím zařízením je "kavitační jet". Jedná se o proud tekutiny vysokého tlaku, usměrněného přes trysku/clonku, v níž v důsledku poklesu tlaku vzniká kavitační mrak. Tato metoda je standardizovaná v normě ASTM G134-17, ale lze se setkat s celou řadou modifikací částí okruhu testovacího zařízení. Modifikacemi typu jetu, geometrie trysky/clonky, rychlosti proudění apod., ale i modifikací vzdálenosti od trysky/clonky lze dosáhnout velké flexibility nastavení a tím ovládání intenzity kavitace. Takto generovaný kavitační mrak je více podobný kavitačnímu mraku v reálných zařízeních, než mrak generovaný ultrazvukovým kavitačním testerem. Kavitační mrak je hustě tvořen bublinkami různých rozměrů, zahrnuje proudění tekutiny a kolabuje přímo na vloženém vzorku. Na levé části obrázku 2.6 je ukázka z experimentů Soyamy a Asahary (1999), kteří generovali kavitační mrak za tryskou o průměru hrdla d = 0,4 mm. V práci zjišťovali jeho účinek na vzorek uhlíkové oceli označeného "Target", který byl umístěn v normalizované odstupové vzdálenosti od trysky s/d = 42 (s označuje vzdálenost vzorku od trysky). Tlak před tryskou byl 15 MPa a za tryskou 0,21 MPa, což odpovídalo hodnotě kavitačního čísla 0,014. Na pravé části obrázku 2.6 je ukázka erodované oblasti (velikost kráteru je cca 10 mm), představující erozní test v testovacím zařízení CaviJet na nerezové oceli po dobu 80 minut při nominálním tlaku 40 MPa.



**Obrázek 2.6:** Kavitační mrak kavitačního jetu (Soyama a Asahara, 1999) a eroze vytvořená zařízením CaviJet (Kim et al., 2014)

Účinek kavitačního mraku generovaného kavitačním jetem podle ASTM G134-95 ve vzdálenosti 10 mm od trysky byl studován Hattorim et al. (2010). Vedle erozních testů provedli i měření účinku kavitačního kolapsu speciálním senzorem. Čidlo bylo tvořeno piezokeramickým kroužkem o průměru 5 mm a tloušťky 0,2 mm, na který byla přilepena z vrchní strany detekční tyč z titanu a ze spodní strany tyč z mědi. Tyto tyče tvořily elektrody, ke kterým byly připevněny elektrické vodiče senzoru. Všechny uvedené části senzoru byly uloženy v akrylové trubičce a zalité epoxydovým lepidlem. Obdobně jako u práce Okady et al. (1995) bylo výstupem elektrické napětí, odpovídající účinku kavitačního kolapsu. Kalibrace senzoru byla provedena metodou pádu

kuličky. Kalibrací získaná citlivost senzoru 2,22 N·V<sup>-1</sup> byla následně využita pro zjištění síly z naměřených napěťových pulzů. V rámci práce Hattoriho et al. (2010) bylo zjištěno kumulované spektrum sil pro několik rychlostí proudění tryskou. Momma a Lichtarowitz (1995) použili pro obdobné měření PVDF senzor (detailnější popis senzoru je uveden v kapitole o kalibraci) a rovněž získali spektrum maximálních sil a spektrum průměrů pitů pro tři režimy kavitačního jetu (80 bar, 100 bar, 120 bar), které jsou uvedeny na obrázku 2.7. V levé části je uvedeno spektrum průměrů pitů v zájmové oblasti, tedy závislost kumulovaného počtu pitů na jednotce plochy milimetru čtverečního za jednotku času (označeno accumulated count) na průměru pitu (diameter). Na pravé části je uvedeno spektrum maximálních sil, tedy závislost kumulovaného počtu maximálních sil na jednotce plochy senzoru o velikosti milimetru čtverečního a za jednotku času na maximální síle (označeno Pulse height). Na základě znalosti těchto spekter se pokusili odhadnout, jak velkou silou byl vytvořen daný pit. Odhad byl založen na sjednocení svislé osy, což lze slovně při pohledu na obrázek 2.8 a šipky určující směr myšlenkového pochodu vyjádřit následovně. Pro pit o průměru 100 µm, který se vyskytuje 0,1 krát na jednom milimetru čtverečním za sekundu, je potřeba maximální síly 47 N, určené ze spektra naměřených sil.



Obrázek 2.7: Spektrum sil a průměrů pitů (Momma a Lichtarowicz, 1995)

#### 2.5 Rotující disk

V menší míře se používá testovací zařízení nazývané rotující disk. Na čele speciálního rotujícího disku jsou umístěny testované vzorky a před každým vzorkem je důlek, který generuje kavitační mrak, způsobující erozi testovaných vzorků. Detailní popis testovacího zařízení lze nalézt v normě ASTM G73-10 2017 (2017). Další podrobnosti uvádí Osterman et al. (2009), z jejichž publikace pochází ukázka upnutí vzorků z čisté mědi a jejich poškození po 220 hodinách, viz obrázek 2.8.



**Obrázek 2.8:** Ukázka vnitřního disku pro zařízení rotující disk a poškození vzorku z čisté mědi po 220 hodinách (upraveno, Ostreman et al., 2009)

# Kapitola 3

### Návrh vlastního řešení

Třetí kapitola podává stručné informace o návrhu vlastního řešení problému v rámci disertační práce. Je zde komentován výběr testovacího zařízení, volba testovací metody a jednotlivé kroky navrženého řešení. Návrh vlastního řešení vychází nejen z provedené rešerše a předchozích zkušeností, ale je do značné míry ovlivněn okolnostmi průběhu studia, kdy se naskytla možnost provádět experimenty ve vysokorychlostním kavitačním tunelu. Návrh vlastního řešení proto vychází zejména z této skutečnosti.

#### 3.1 Výběr testovacího zařízení

Obecným cílem této disertační práce je studium kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Nejdříve tak bylo nutné vybrat vhodné zařízení pro generování kavitačních bublin a jejich struktur. Při tom bylo potřeba pamatovat na dostupnost prostoru, ve kterém je kavitace generována. V počátcích bylo zvažováno použít ultrazvukový kavitační tester, který je k dispozici na Katedře energetických zařízení TUL. Kavitační mrak, generovaný ultrazvukovým kavitačním testerem, má ze své podstaty určité nevýhody. Obsahuje totiž bubliny úzkého intervalu poloměrů, které jsou zároveň buzeny pouze konstantní frekvencí kavitačního trnu. V reálných případech je ale spektrum velikostí bublin širší. Navíc tato metoda ve svém principu nezahrnuje vliv proudění tekutiny. Nejedná se tedy o hydrodynamickou kavitaci, která je někdy nazývána "pravou" kavitačních tunelech a právě během studia se naskytla možnost měření ve vysokorychlostním kavitačním tunelu. Z této nabídky vyplynula volba testovacího zařízení.

#### 3.2 Volba testovací metody

V úvodu tohoto oddílu je vhodné připomenout, že kolaps kavitačních bublin a jejich struktur, vyskytujících se v blízkosti povrchů a související doprovodné jevy jsou původci kavitační eroze. Kavitační kolaps je tedy v přímé vazbě na účinek na blízký povrch. Prvním navrženým přístupem proto bylo změřit účinek kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur na blízký povrch vhodným senzorem. Druhým navrženým přístupem bylo stanovení účinku kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur nepřímo, a to studovat deformaci blízkého povrchu v počáteční fázi kavitace (ve fázi inkubace) provedením pitting testů. Dlouhodobé kavitační testy nebyly zvažovány, protože nejsou pro studium kavitačního kolapsu, který trvá velmi krátce, vhodné. Z uvedeného návrhu vyplynula zajímavá otázka vzájemného porovnání obou metod.

#### 3.3 Návrh jednotlivých kroků vlastního řešení

Pro řešení cílů této disertační práce byly voleny dvě metody, pro něž byly navrženy jednotlivé kroky s respektováním specifik testovacího zařízení. V první fázi bylo nutné detailně prostudovat testovací zařízení, hlavně pak jeho testovací sekci, a charakter generované kavitace. V dalším kroku se počítalo s návrhem vhodného senzoru pro měření kavitačního účinku na přilehlý povrch a měřicí sestavy s tímto senzorem. Součástí tohoto kroku byla rovněž volba vhodné metody kalibrace senzoru. Následně bylo navrženo provést testovací měření s vybraným senzorem pro různé provozní režimy, s cílem optimalizace návrhu pro stanovení finální podoby celého experimentu. V dalším kroku se počítalo s provedením kalibrace senzoru a vlastním experimentem. Po získání dat z měření se počítalo s návrhem metody pro jejich zpracování a vlastním zpracováním. Poslední krok této části pak počítal s analýzou a interpretací získaných výsledků a stanovení závěrů z měření pomocí vybraného senzoru. Pro druhou metodu, tj. pro studium kavitačního účinku na základě pitting testů, byly navrženy následující kroky. Nejdříve bylo nutné vybrat vhodný materiál pro testované vzorky a určit metodu opracování jejich povrchu. V dalším kroku provést testovací měření a návrh finální podoby pitting testů. Následně pak výběr a osvojení dostupné metody pro měření geometrie povrchu a zpracování výsledku tohoto měření. V dalším kroku by následovalo vlastní měření v testovacím zařízení a zpracování výsledku měření. Poslední krok druhé metody by se týkal analýzy a interpretace získaných výsledků a stanovení závěrů z pitting testů.
## Kapitola 4

# Vysokorychlostní kavitační tunel

Ve druhé kapitole bylo popsáno několik testovacích zařízení, která jsou nejčastěji používána ke generování kavitačního mraku. Existují ale i další unikátní testovací zařízení, jejichž konstrukce vychází právě z nich. Ve všech testovacích zařízeních uvedených ve druhé kapitole (vyjma metody využívající ultrazvukový kavitační tester), se jedná o tzv. hydrodynamickou kavitaci, tj. případ, kdy ke snížení tlaku v tekutině dochází vlivem zvýšení rychlosti proudění. Tato testovací zařízení jsou vhodnější, neboť charakter generované kavitace se blíží reálným podmínkám. Jejich nevýhodou jsou vysoké náklady na pořízení a složitý provoz. Takovým zařízením je i vysokorychlostní kavitační tunel laboratoře LEGI, univerzity Université Grenoble Alpes v Grenoblu ve Francii. Protože se jedná o unikátní testovací zařízení, které bylo použito pro experiment této disertační práce, věnuje se mu celá následující kapitola.

#### 4.1 Konstrukce vysokorychlostního kavitačního tunelu

Studium účinku kolapsů kavitačních bublin a jejich struktur v rámci této disertační práce bylo provedeno ve vysokorychlostním kavitačním tunelu (v kontextu této práce někdy označovaného pouze jako kavitační tunel či testovací zařízení) laboratoře LEGI (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels) univerzity Université Grenoble Alpes a výzkumného centra CNRS UMR 5519 (Centre national de la recherche scientifique, Unité Mixte de Recherche 5519) v Grenoblu ve Francii. Vysokorychlostní tunel je na obrázku 4.1. Jedná se o vodní tunel s možností nastavení extrémních provozních podmínek, které se využívají pro krátkodobé i dlouhodobé kavitační erozní testy. Kavitační tunel se nachází v přízemí a dvou etážích laboratoře. V provozní místnosti v přízemí budovy je umístěno odstředivé čerpadlo, poháněné elektromotorem o výkonu 80 kW a maximálním dodávaném objemovém průtoku 11 l·s<sup>-1</sup>. Provozní tekutinou je kohoutková voda bez dalších úprav. Veškeré potrubí a armatury jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli. Součástí je i uklidňovací zásobník tekutiny o objemu 1 m<sup>3</sup>, včetně tlakovacího systému s dusíkem, zajišť ujícího stálé kavitační číslo. Požadavek konstantní teploty tekutiny u dlouhodobých testů, při kterých dochází k jejímu zahřívání, je zajištěn tepelným výměníkem, tvořeným 85 trubkami o vnitřním průměru 11 mm, umístěným v první etáži. Nominální výkon výměníku je 80 kW. Testovací sekce tunelu je umístěna ve druhé etáži, cca 6 m nad čerpadlem pro zamezení kavitace čerpadla, v místnosti akusticky izolované od okolí laboratoře. Detail testovací sekce je na obrázku 4.2 a její řez na obrázku 4.3. Kavitační tunel je osazen senzory tlaku, teploty a elektromagnetickým průtokoměrem. Detailnější popis zařízení uvádí Kim et al. (2014) a Franc (2009).



Obrázek 4.1: Vysokorychlostní kavitační tunel



Obrázek 4.2: Detail testovací sekce vysokorychlostního kavitačního tunelu



Obrázek 4.3: Řez testovací sekcí

### 4.2 Parametry proudění ve vysokorychlostním kavitačním tunelu

Na obrázku 4.3 je vyobrazena osově symetrická testovací sekce kavitačního tunelu, jejíž axiální vtok je připojen ke dvěma konvergentním tryskám o poměru průřezů 2,86 : 1 a 2,12 : 1 a délkách 178 mm a 80 mm, sloužícím pro urychlení proudu tekutiny. Proud tekutiny vstupuje do testovací sekce axiálně výstupní částí trysky o průměru 16 mm. Za hranou se zaoblením 1 mm se proud ohýbá a pokračuje radiálně mezerou tloušťky 2,5 mm mezi čelem trysky a testovacím diskem. Přitom dochází k poklesu tlaku a vzniku kavitační struktury. Při kavitačních podmínkách se struktura periodicky tvoří a kolabuje na stěně trysky a testovacím disku. Místo kolapsu kavitační struktury a zároveň oblast eroze jsou dány délkou kavitační struktury, která je určena bezrozměrným kavitačním číslem:

$$\sigma = \frac{p_d - p_v}{p_u - p_d} , \qquad (4.1)$$

kde  $p_d$  je tlak za testovací sekcí,  $p_v$  je tlak sytých par a  $p_u$  je tlak před testovací sekcí. Pro běžně používané kavitační číslo  $\sigma = 0.9$  je střední délka kavitační struktury přibližně 25 mm od osy testovací sekce. Pro zabezpečení vzniku kavitační eroze v určité zájmové oblasti je nutné hodnotu kavitačního čísla před experimentem řádně nastavit a během experimentu trvale udržovat. Pro některé režimy kavitačního tunelu o určitých kavitačních číslech je nutné kavitační tunel navíc přetlakovat inertním dusíkem. Přetlakování se pro určité kavitační číslo provádí nastavením regulátoru tlakovacího systému na hodnotu empirický zjištěné hodnoty tlaku dusíku  $p_{set}$ . Předchozí vztah zároveň definuje pokles tlaku na testovací sekci:

$$p_u - p_d \cong \frac{1}{1 + \sigma} \cdot p_u \,. \tag{4.2}$$

Následující obrázek 4.4 ukazuje další parametry experimentu.



Obrázek 4.4: Poloviční řez testovací sekcí a související parametry proudění

Jedná se o střední rychlost proudění *v*<sub>s</sub>, definovanou na válcovém mezikruží na hraně na výstupu trysky:

$$v_s = \frac{Q}{S},\tag{4.3}$$

kde Q je objemový průtok a S je povrch pláště válcového mezikruží na výstupní části trysky (řez pláštěm válce je zobrazen jako červená silná horizontální čára):

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot e , \qquad (4.4)$$

kde *r* je poloměr výstupní části trysky a *e* je šířka mezery mezi čelem trysky a testovaným diskem. Poslední dvě zmiňované hodnoty jsou fixní, dané geometrií testovacího zařízení a to r = 8 mm a e = 2,5 mm. Posledním parametrem je rychlost proudění vody o hustotě  $\rho$  na kavitační struktuře  $v_{cav}$ , vycházející z Bernoulliho rovnice pro místo před testovací sekcí, a místo na kavitační struktuře:

$$p_u + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_u^2 = p_{cav} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{cav}^2 \,. \tag{4.5}$$

Tlak na kavitační struktuře  $p_{cav}$  je roven tlaku sytých par  $p_v$ , který je v porovnání s tlakem před testovací sekcí v řádu barů zanedbatelný (pro 20 °C je  $p_v = 2337$  Pa). Rovněž rychlost proudění v místě před testovací sekcí může být zanedbána, protože v tomto místě je velký průměr potrubí a tím rychlost proudění malá. Pak lze jednoduchou úpravou z předchozí rovnice získat vztah pro rychlost na kavitační struktuře:

$$v_{cav} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_u}{\rho}} . \tag{4.6}$$

Pro představu o extrémních parametrech vysokorychlostního kavitačního tunelu uvedeme jejich hodnoty při nastavených maximálních hodnotách tlaku před testovací sekcí. Pro maximální možný tlak před testovací sekcí  $p_u = 40$  bar a pro kavitační číslo  $\sigma = 0.9$  (při přetlakování dusíkem  $p_{set} \approx 17$  bar pomocí tlakovacího systému) jsou parametry následující: objemový tok  $Q = 8.2 \, 1.s^{-1}$ , střední rychlost  $v_s \approx 64 \, m.s^{-1}$ , rychlost na kavitační struktuře  $v_{cav} \approx 90 \, m.s^{-1}$  a pokles tlaku na testovací sekci  $p_u - p_d \approx 21$  bar.

Kavitační eroze ve vysokorychlostním kavitačním tunelu probíhá na stěně disku i na stěně trysky, která je proto vyrobena ze speciálního velmi odolného materiálu, zajišťujícího její větší životnost. Oblast eroze na straně disku se využívá pro testování. Buď se zde z testovaných materiálů umisťují a vyměňují celé disky, nebo se do děr na exponovaných pozicích v disku upevňují menší kruhové vzorky a provádí se na nich kavitační erozní testy. Při erozních testech lze nastavit vysoce agresivní režimy, pro které byl kavitační tunel navržen. Erodovaná oblast má tvar mezikruží. V případě testovacího disku o poloměru 100 mm se erodované mezikruží nachází mezi poloměry 19 mm a 32 mm. Ukázka erodovaného mezikruží je na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Erodovaný disk

# 4.3 Dynamika kavitačního mraku ve vysokorychlostním kavitačním tunelu

Vizualizaci dynamiky kavitačního mraku v testovací sekci vysokorychlostního kavitačního tunelu provedli Gavaises et al. (2015). Při experimentu nahradili testovaný vzorek transparentním diskem z Perspexu (PMMA) a pomocí zrcadel, osvětlující techniky a vysokorychlostní kamery sledovali aktivitu kavitačního mrak ve 2D pro různá kavitační čísla ve směru normály disku z Perspexu. Autoři zjistili, že kavitační oblast je tvořena mraky kavitačních bublin různých velikostí, jejich pozice netvoří osovou symetrii s testovací sekcí a navíc nenalezli pravidelnost jejich výskytu a to navzdory stabilním provozním podmínkám kavitačního tunelu a symetrii testovací sekce. Na následujícím obrázku 4.6 je ukázka formování a dynamiky mraku kavitačních bublin v testovací sekcí vysokorychlostního kavitačního tunelu pro kavitační číslo  $\sigma = 0,92$ 

(objemový tok Q = 8,6 l.s<sup>-1</sup>, tlak za testovací sekcí  $p_{down} = 19$  bar). Mrak kavitačních bublin je generován periodicky za výstupem z trysky (černý půlkruh na obrázku vlevo), kde narůstá ve směru proudění, až jeho délka naroste do maximální vzdálenosti od středu, oddělí (odtrhne) se, pokračuje ve směru proudění a kolabuje v určité oblasti (v tomto případě je střed erozní oblasti – mezikruží na poloměru  $R_{em} = 25$  mm vyznačen bílou čarou). Na obrázcích je zaznamenán vznik červeného kavitačního mraku, který maximální vzdálenosti od středu dosáhl v čase 0,117 ms. Před ním je bezkavitační zónou oddělený modrý, už rozvinutý kavitační mrak. Za ním vzniká další, zelený kavitační mrak, opět od červeného oddělený bezkavitační zónou. Takto se děj periodicky opakuje s určitou frekvencí, tzv. frekvencí odtrhávání kavitačního mraku.



**Obrázek 4.6:** Dynamika kavitačního mraku ve vysokorychlostním kavitačním tunelu (Gavaises et al., 2015, s povolením autora)

Autoři rovněž určili frekvenci kolapsů velkých kavitačních struktur. Platí, že se vzrůstajícím kavitačním číslem frekvence roste. Zároveň platí, že se vzrůstajícím tlakem (zde vyjádřeno tlakem za testovací sekcí) frekvence roste. Ze zjištěné frekvence kolapsů bylo dopočítáno Strouhalovo číslo, které se blíží konstantní hodnotě pro všechny testované režimy. Na obrázku 4.7 jsou závislosti frekvence kolapsu (označeno  $f_{cloud}$ ) na kavitačním čísle (označeno  $\sigma$ ) a Strouhalova čísla (označeno St) na kavitačním čísle (označeno  $\sigma$ ).



Obrázek 4.7: Frekvence odtrhávání kavitační struktury (Gavaises et al., 2015, s povolením autora)

Dále bylo na základě vyhodnocení záznamu z kavitačního tunelu potvrzeno, že kavitační číslo určuje rozsah kavitační struktury a oblasti, kde dochází k jejímu kolapsu. Platí, že se vzrůstajícím kavitačním číslem jsou oblasti kolapsu menší a vyskytují se na menších poloměrech. Pro vysoká kavitační čísla jsou kavitační oblasti tvořené kavitačními mraky prořídlé a nesoudržné. Naopak pro klesající kavitační čísla jsou kavitační struktury více soudržné, oblasti kolapsu jsou větší a vyskytují se na větších poloměrech. Vyhodnocením záznamů pro různá kavitační čísla byly rovněž zjištěny velikosti mezikruží, na kterých se vyskytují kolapsy. Například pro kavitační číslo  $\sigma = 1,5$  je oblast kolapsů na mezikruží mezi poloměry cca 9 mm a 20 mm a pro kavitační číslo  $\sigma = 0,9$  je oblast kolapsů na mezikruží mezi poloměry cca 17 mm a 29 mm.

Autoři dále provedli CFD simulaci pomocí hybridního RANS/LES modelu pro stejné podmínky proudění jako při vizualizaci, tj. pro kavitační číslo  $\sigma = 0.92$  a tlak na výstupu testovací sekce  $p_{down} = 19$  bar. Na základě provedené simulace je vidět odtrhávání kavitačního mraku a jeho řídící mechanismus. Kavitační mrak je při svém růstu doprovázen formováním zpětného proudění u stěny (tzv. re-entrant jetu), který oddělí kavitační mrak od místa připojení ke stěně. Kavitační mrak pak putuje ve směru proudění a kolabuje. Na obrázku 4.8 je řez polovinou testovací sekce, detail její oblasti za hranou trysky a cyklus odtrhávání kavitační struktury. Barevná stupnice určuje podíl parní složky (označeno vapour). Kavitační oblast je tvořena parami okolní kapaliny. Střed erozní oblasti - mezikruží je vyznačen svislou černou čarou. Výsledky simulací jsou ve shodě s experimentem. Radiální pozice vzniku a zániku kavitačního mraku jsou si blízké. Porovnání objemového zlomku parní fáze nebylo možné, protože záznamem z vysokorychlostní kamery byl získán pouze 2D pohled ve směru normály disku z Perspexu.



Obrázek 4.8: Zpětné proudění v oblasti za hranou trysky (Gavaises et al., 2015, s povolením autora)

# 4.4 Měření sil od impaktu kavitačních bublin ve vysokorychlostním kavitačním tunelu

První měření impaktních sil ve vysokorychlostním kavitačním tunelu (pro provozní režimy 10 bar, 15 bar, 20 bar, 30 bar a 40 bar a při kavitačním čísle  $\sigma = 0,9$ ) provedli Franc et al. (2011). Do oblasti maximální eroze na testovacím disku zabudovali průmyslový piezoelektrický senzor PCB 108A02, který měl výrobcem deklarovanou rezonanční frekvenci 250 kHz a čas náběhu 2 µs. Citlivá část senzoru měla průměr 3,6 mm a její krycí část byla během experimentu poškozena. Na obrázku 4.9 je disk s erodovaným mezikružím (a), senzor umístěný v oblasti eroze (b) a detail senzoru poškozeného během měření (c). Výrobce sice udával citlivost 74,05 mV·MPa<sup>-1</sup> (přes plochu činné části přepočtenou na citlivost 7,27 mV·N<sup>-1</sup>), ale byla provedena i kalibrace metodou pádu kuličky, díky níž byla zjištěna citlivost 7,3 mV·N<sup>-1</sup>.



**Obrázek 4.9:** Umístění senzoru do oblasti maximální eroze a detail poškozeného senzoru (Franc et al., 2011, s povolením autora)

Výsledkem měření byla kumulovaná spektra maximálních sil pro dříve uvedené provozní režimy, která jsou uvedena na obrázku 4.10. Graf udává závislost kumulovaného počtu maximálních sil, které se staly na jednotkové ploše senzoru (cm<sup>2</sup>) za jednotku času (označeno Peak rate), na amplitudě elektrického napětí (označeno Amplitude) a pomocí citlivosti senzoru

dopočítané maximální síly (označeno Load). Během měření se autoři setkali s řadou problémů (poškození senzoru, malá rezonanční frekvence, tvar senzoru).



Obrázek 4.10: Kumulovaná spektra maximálních sil (Franc et al., 2011, s povolením autora)

#### 4.5 Pitting testy ve vysokorychlostním kavitačním tunelu

Franc et al. (2012) provedli ve vysokorychlostním kavitačním tunelu rovněž pitting testy pro režimy 10 bar, 15 bar, 20 bar a 40 bar při kavitačním čísle  $\sigma = 0.9$ . Každý pitting test byl superpozicí 3 oblastí o rozměru 2 mm × 4 mm a jejich poloha byla vybrána v místech erodovaného mezikruží, ale nebyla přesně definována. Ukázka jednoho z výsledků pro nerezovou ocel 2205 je na obrázku 4.11, kde je dokumentována závislost kumulovaného počtu pitů, které se vyskytly na jednotkové ploše (cm<sup>2</sup>) za jednotku času (označeno Cumulative pitting rate), na průměru pitu (označeno Diameter) pro testované režimy.



**Obrázek 4.11:** Výsledek pitting testu – kumulovaná spektra průměrů pitů (Franc et al., 2012, s povolením autora)

## Kapitola 5

## PVDF senzor a jeho kalibrace

Kapitola o PVDF senzoru obsahuje základní informace o foliovém piezoelektrickém PVDF senzoru a metodách jeho kalibrace. V úvodních oddílech jsou uvedeny základní vlastnosti tohoto typu senzoru a stručný rozbor aspektů týkajících se jeho zapojení do měřicího obvodu, hlavně pak z pohledu časové konstanty a rezonanční frekvence senzoru. Další oddíly přinášejí informace o třech druzích PVDF senzorů, jejich výhodách a nevýhodách a následně o výběru určitého druhu. Závěrečné oddíly zahrnují problematiku kalibrace z pohledu podobnosti s kavitačním jevem. Jsou zde uvedeny tři metody, z nichž byla nakonec vybrána metoda pádu kuličky, pro kterou jsou uvedeny některé výsledky kalibrace v rámci této práce a jejich porovnání s výsledky kalibrací z jiných zdrojů.

## 5.1 PVDF senzor a jeho vlastnosti

Pro studium kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů ve vysokorychlostním kavitačním tunelu bylo rozhodnuto použít senzor ze skupiny piezoelektrických senzorů. Piezoelektrické senzory totiž splňují určité vlastnosti, z nichž nejdůležitější jsou velká rezonanční frekvence, (tzn. že tyto senzory jsou vhodné pro měření velmi rychlých kavitačních dějů) a velký rozsah hodnot měřené veličiny. Dalšími požadavky při volbě senzoru byla dobrá manipulovatelnost, ochrana proti poškození a zároveň nízká cena, neboť při kavitaci lze předpokládat jeho časné poškození. Na základě těchto požadavků byl zvolen piezoelektrický PVDF senzor ve formě tenké folie. PVDF (polyvinylidene fluoride) je piezoelektricky aktivní fluoropolymer patřící do skupiny termoplastů. V základním stavu, v tzv.  $\alpha$ -fázi se jedná o běžně používaný dobře zpracovatelný plast, vyznačující se vysokou čistotou, nízkou hustotou, dobrou chemickou odolností, malou vodní absorpcí a nízkou akustickou impedancí blízkou vodě. Po technologických operacích a expozici silnému elektrickém poli se získá PVDF fluoropolymer v tzv. β-fázi, vyznačující se navíc piezoelektrickými a pyroelektrickými vlastnostmi, které jsou cca 10 krát výraznější než u ostatních polymerů. Všechny zmíněné vlastnosti předurčily PVDF polymer pro použití v senzorech. PVDF polymer ve formě tenké folie poskytuje ještě další důležitou vlastnost, a to velkou citlivost. Malá tloušťka folie představuje malý příčný řez a tak i malé zatížení vytváří ve struktuře materiálu velká mechanická napětí. Citlivost folie v tloušťkovém módu oproti délkovému módu je potom typicky v poměru 1000 : 1.

Z hlediska piezoelektrického jevu, na kterém je senzor založen, se omezíme pouze na základní popis a definování piezoelektrických vlastností materiálu. Piezoelektrický jev (přímý) je fyzikální jev, při kterém dochází k polarizaci dielektrik podrobených mechanickému namáhání a generování náboje na elektrodách dielektrika. Rozhodující je stavba krystalické mřížky a poloha středu symetrie základní buňky, které zároveň určují počet piezoelektrických koeficientů.

Piezoelektrická nábojová konstanta  $d_{xy}$  je konstantou úměrnosti vzniklého elektrického náboje při deformaci piezoelementu a je rovna podílu mechanického přetvoření a intenzity elektrického pole, případně podílu plošné hustoty náboje a mechanického napětí. Index *x* značí směr, ve kterém je generovaný elektrický náboj měřen. Index *y* značí směr působení mechanického namáhání. Další důležitou konstantou je piezoelektrická napěťová konstanta  $g_{xy}$  a je rovna podílu mechanického přetvoření a intenzity elektrického pole, případně podílu intenzity elektrického pole a mechanického napětí  $\sigma_m$ . Udává, jaké elektrické napětí se generuje ve směru x působením mechanického napětí působícího ve směru y. Konstantu  $g_{xy}$  je možné dopočítat ze vztahu:

$$g_{xy} = \frac{d_{xy}}{\varepsilon_{xy}},\tag{5.1}$$

kde veličina  $\varepsilon_{xy}$  je permitivita piezoelektrického materiálu. Tenké PVDF filmy se vystavují zatížení kolmo na plochu elektrod a elektrický náboj (elektrické napětí) měříme ve směru působení mechanického napětí. Jedná se o tzv. podélný jev s indexy os 33. V tomto případě, tj. zatížení v ose 3, lze na elektrodách kolmých ke směru zatížení ve směru 3 dopočítat elektrické napětí na senzoru o tloušťce vrstvy piezoelektrického polymeru *t*<sub>s</sub> z následujícího vztahu:

$$U = g_{33} \cdot \sigma_{m,3} \cdot t_s. \tag{5.2}$$

Náhradní obvod piezoelektrického filmu je tvořen zdrojem napětí U řízeného deformací a sériově připojeným kondenzátorem kapacity C. Elektrické napětí zdroje U je svázáno s generovaným elektrickým nábojem  $Q_e$  senzoru vztahem:

$$U = \frac{Q_e}{C}.$$
(5.3)

Každá paralelně připojená odporová zátěž  $R_{el}$  (např. vstupní odpor osciloskopické karty) vytvoří jednoduchý RC článek představující filtr "horní propust" s mezní frekvencí:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{el} \cdot C} \tag{5.4}$$

a časovou konstantou:

$$\tau_0 = R_{el} \cdot C. \tag{5.5}$$

Mezní frekvence  $f_0$  představuje nominální hodnotu frekvence oblasti, pod kterou je výstupní signál zeslaben a nad kterou je výstupní signál propuštěn beze změny až do blízkosti rezonanční frekvence  $f_r$  senzoru dané vtahem:

$$f_r = \frac{v_{pol}}{2 \cdot t_s},\tag{5.6}$$

kde  $v_{pol}$  je rychlost zvuku v polymeru (pro PVDF  $v_{pol} = 2200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Pro rezonanční frekvenci senzoru na základě tohoto vztahu platí, že čím je vrstva polymeru tenčí, tím je rezonanční

frekvence vyšší. Časová konstanta udává dobu, po které dochází k poklesu elektrického napětí vygenerovaného konstantní silou na 63,2 % hodnoty původního elektrického napětí. Trojnásobek časové konstanty udává dobu pro pokles na 95 % původní hodnoty elektrického napětí. Příkladem může být závislost zatěžující konstantní síly v čase a odpovídajícího průběhu elektrického napětí v čase, která je na obrázku 5.1. Při zatížení konstantní silou  $F_{konst}$  dochází na senzoru k vygenerování elektrického napětí  $U_1$ . Ačkoliv je senzor nadále zatížen konstantní silou, na jeho elektrodách dochází v důsledku svodových jevů k postupnému poklesu elektrického napětí na hodnotu  $U_2$ . Pak je senzor odlehčen a dochází k poklesu elektrického napětí do záporných hodnot a opětovnému vybíjení k nulové hodnotě elektrického napětí.





Proto se piezoelektrické senzory nepoužívají pro sledování statických veličin a je u nich nutno do obvodu zařadit např. nábojový integrující zesilovač. Kavitace je ale děj výrazně dynamický, jeho časové měřítko je v řádku mikrosekund a nanosekund, a k výraznému poklesu elektrického náboje během této doby nedochází. Proto je piezoelektrický senzor vhodný pro měření kavitačních efektů.

Ve skutečnosti by měl být náhradní obvod tvořen vedle zdroje napětí  $U_z$  paralelně připojeným svodovým odporem kabelu a vstupním odporem měřicího obvodu  $R_i$  a kapacitami senzoru  $C_f$ , kabelu  $C_k$  a vstupu  $C_o$ , jak je zobrazeno na obrázku 5.2. Vnitřní odpor senzoru je obrovský a může být opominut.



Obrázek 5.2: Náhradní obvod piezoelektrického senzoru se zdrojem napětí

V našem případě zanedbáme odpor koaxiálního kabelu RG-58, neboť je nepatrný vzhledem ke vstupnímu odporu osciloskopické karty. Budeme uvažovat pouze vstupní odpor měřicího obvodu osciloskopické karty, který byl nastaven  $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ . Přídavný odpor v sériovém zapojení spolu s kapacitou piezoelektrického senzoru tvoří dělič elektrického napětí, kdy se napětí rozdělilo mezi odpor a kapacitu. Protože měříme právě na odporu obvodu osciloskopické karty, bude měřený signál zeslaben. V našem případě se ale nejedná o výrazné zeslabení a není třeba se jím zabývat. Plošná kapacita senzoru je 380 pF·cm<sup>-2</sup>, což pro činnou plochu senzoru 12 mm × 1,5 mm činí kapacitu  $C_f = 68,4$  pF. Kapacita osciloskopu je  $C_o = 50$  pF. Měrná délková kapacita koaxiálního kabelu RG-58 je 82 pF·m<sup>-1</sup>, což pro použitý 5 metrů dlouhý kabel činí  $C_k = 410$  pF. Přídavná kapacitní zátěž koaxiálního kabelu a osciloskopu navýší hodnotu časové konstanty, což je výhodné, a zároveň zeslabí mírně měřený signál, ale bez nutnosti provedení dalších opatření. V dalším přiblížení pak časová konstanta nabývá tvaru:

$$\tau_s = R_i \cdot (C_f + C_o + C_k) \tag{5.7}$$

a odpovídající mezní frekvence tvaru:

$$f_{0s} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_s}.$$
(5.8)

V přípravné fázi experimentů v rámci disertační práce byly zvažovány tři typy foliových PVDF senzorů, a to senzoru průmyslově vyráběného, tištěného a vyrobeného fotolitografickou metodou. U průmyslově vyráběného senzoru je výhodou jeho nízká cena a vysoká výrobní kvalita, nevýhodou pak určité omezení tvarem a rozměry senzoru daných výrobní řadou. U tištěného a fotolitograficky vyrobeného senzoru je nespornou výhodou možnost definování tvaru a rozměru senzoru. Pro tištěný senzor je značnou nevýhodou jeho výrobní cena. V současné době se vyrábí pouze v sériové výrobě a výroba senzoru na základě požadavku zákazníka je velice nákladná. Fotolitograficky vyrobený senzor zase přináší komplikace při své výrobě, jedná se o kusovou, vícekrokovou, velmi přesnou výrobu z metalizované folie PVDF materiálu. V následující části budou jednotlivé typy senzoru detailněji popsány.

#### 5.2 Tištěný PVDF senzor

Při testování byl použit tištěný senzor, poskytnutý organizací CEA (Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), vyrobený v laboratořích Liten (Le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux) v Grenoblu ve Francii.

Testovaný typ tištěného senzoru byl tvořen několika vrstvami, vrstvenými na základním substrátu různými technologiemi. Na základním substrátu z PEN (polyethylen naftalen) tloušťky 125 μm je k čidlu senzoru přivedena vrstva stříbra tloušťky 7 μm, tvořící vývody senzoru. V dalším kroku výroby senzoru je vytvářeno čidlo vrstvou vodivého PEDOT-PSS (poly (3,4-ethylenedioxythiophenu) polystyrenu sulfonátu) tloušťky 800 nm tvořící spodní elektrodu, vrstvou elektroaktivního polymeru PVDF-TfFE (polyvinylidenfluoridu trifluoroethylenu)

tloušťky 2,5 μm, vrstvou vodivého PEDOT-PSS tloušťky 800 nm tvořící vrchní elektrodu a ochrannou vrchní vrstvou tloušťky 3 μm z organických polymerů.

Poskytnuté senzory byly obdélníkového a kruhového tvaru a větší než velikost díry v testovacím disku. Proto byla část senzoru odříznuta ostrou nožovou planžetou. Řez byl očištěn, aby nedošlo k elektrickému spojení vrstev metalizace. Dále bylo třeba senzor doplnit o spojovací vodiče, které se k vývodům senzoru přinýtovaly. Postup a specifika nýtování jsou uvedeny u výroby senzoru fotolitografickou technikou. Ukázka senzoru a přinýtování přívodních vodičů jsou na obrázku 5.3. Senzor, resp. substrát z PEN, byl k disku přilepen kyanoakrylátovým lepidlem. Lepený spoj byl funkční. Naopak vrchní ochranná vrstva epoxydového lepidla k povrchu senzoru dostatečně nepřilnula. Při testovacích měřeních pak došlo k jejímu odlepení a tak byly změřeny pouze méně agresivní režimy. Izolace kontaktů byla provedena izolační páskou Kapton tape 70 AC, ale již při manipulaci došlo k částečnému odlepení pásky i s ochrannou vrstvou a elektrodou, jak je ukázáno na obrázku 5.4.

Protože je výroba senzoru, resp. návrh a příprava výroby senzoru finančně nákladná, bylo rozhodnuto tento senzor pro měření v rámci této práce nepoužívat.



Obrázek 5.3: Detail tištěných PVDF senzorů a vytvořených kontaktů



Obrázek 5.4: Izolace kontaktů páskou a odlepení pásky i s ochrannou vrstvou senzoru a elektrodou

#### 5.3 PVDF senzor vyrobený fotolitografickou technikou

Pro výrobu PVDF senzoru fotolitografickou technikou byl použit list metalizovaného PVDF filmu od výrobce TE Connectivity. Byl zvolen PVDF film tloušťky 28 µm s oboustrannou Cu-Ni metalizací tloušťky 800 Å, tvořené vrstvou 700 Å mědi a vrstvou 100 Å niklu, bránícího oxidaci. Následně byl v laboratoři Nanofab Institutu Néel v Grenoblu z tohoto polotovaru připravován fotolitografickou technikou senzor pro aplikaci při měření účinků kavitace. Fotolitografická technika totiž dovoluje selektivní opracování metalizací PVDF filmu. Část metalizace je touto technikou odstraněna a zůstávají z ní pouze vodivé cesty a aktivní plocha senzoru, tj. plocha generující náboj. Princip měření piezoelektrickým filmem je totiž takový, že aktivní (náboj generující) je na senzoru pouze to místo, kde se metalizace spodní a vrchní strany senzoru překrývají. Tak lze připravit senzor s čidlem libovolné velikosti a tvaru, případně matici čidel.

Vlastní výrobní postup sestává z několika kroků, navržených a optimalizovaných ve spolupráci s pracovníky Nanofabu a kolegou doktorandem Jeanem-Bastienem Carratem z laboratoře LEGI. Prvním krokem byla příprava masek - negativu vodivých cest pro obě strany senzoru. Geometrie masky se připravila v CAD softwaru a vytiskla na plastovou folii, nebo na skleněnou destičku. Následně byl z listu PVDF filmu vyříznut polotovar pro výrobu o rozměrech daných senzorem. Tento polotvar byl připevněn lepicí páskou Ruban Isolant 3M na křemíkovou destičku. Následně byla destička s polotovarem vložena do odstředivky Spin 150. Nejdříve byl polotovar potřen fotorezistem Microposit S1818 v tekutém stavu, pak byl přebytečný fotorezist z povrchu odstředěn za dobu 30 s při nastavených otáčkách 4000 ot min<sup>-1</sup> a zrychlení 4000 ot min<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Na povrchu tak zůstala pouze tenká vrstva fotorezistu, která se vložením destičky na povrch vařiče JFP Microtechnic o teplotě 115 °C po dobu 1 min vytvrdila. Dalším krokem bylo připevnění masky na senzor a jejich osvětlení UV lampou MJB3 při 20 mW.cm<sup>-2</sup> po dobu 68 s. Následoval krok odstranění UV světlem exponovaných ploch fotorezistu v kádince s roztokem MICRO DEV a deionizované vody v poměru 1 : 1 po dobu cca 1 min. Pak byl připravovaný senzor omyt v deionizované vodě a usušen tlakovým dusíkem. Stejným způsobem se vytvoří vodivá cesta na druhé straně připravovaného senzoru. Navazujícím krokem bylo odleptání metalizace kryté osvětleným fotorezistem v roztoku FeCl<sub>3</sub> a omytí v deionizované vodě. V tomto kroku je nutné dbát zvýšené opatrnosti z důvodu chemické agresivity chloridu a možného naleptání okrajů metalizace chráněné neosvětleným fotorezistem. Posledním krokem je odstranění zbývajícího fotorezistu v lázni acetonu, omytí senzoru v ethanolu a osušení tlakovým dusíkem. Dále bylo nutno k senzoru přinýtovat vodiče. Nejdříve byla do senzoru na vývodech metalizace výsečníkem vyseknuta kruhová díra o průměru 1 mm pro nýt. Dále bylo vyseknutím připraveno mezikruží z mosazného plechu a plastové folie s vnitřní dírou o průměru 1 mm. Jako poslední byl připraven jednožilový vodič, jehož konec byl zakroucen do kruhové smyčky s ponecháním vnitřní díry pro nasazení na nýt. Konec byl pokryt cínem elektrickou pájkou. Následovalo sestavení všech vytvořených komponent. Na nýt bylo nasazeno plastové mezikruží, senzor, zakroucený konec vodiče a mosazné mezikruží. Válcový konec nýtu byl nejdříve rozklepnut důlčíkem a pak plochou kladiva. Tím došlo k těsnému stáhnutí komponent v ose nýtu a vodivému spojení vývodů metalizace a vodičů.

Výroba tohoto typu senzoru není nákladná, nicméně vyžaduje zručnost a dovedení techniky výroby k dokonalosti. Řešilo se mnoho problémů, např. nedokonalá maska s průsvitnými oblastmi (viz obrázek 5.5 vlevo ukazující senzor s přinýtovanými vodiči, kde jsou vidět průsvitná místa), překryv masek, optimalizace času při leptání, narušení hraniční vrstvy metalizace, vytvoření vodivého spojení vodiče a metalizace a podobně. Zatím nebyly vyřešeny všechny problémy, týkající se senzoru a jeho praktického použití. Jeho prototypy byly testovány pouze pomocí kalibrace metodou pádu kuličky, nicméně senzor v Laboratoři výroby desek plošných spojů FM TUL stále vyvíjíme. Počítá se s jeho budoucím využitím a případným porovnáním měření provedených různými druhy senzorů. Obrázek skupiny senzorů vyrobených na TUL je na obrázku 5.5 vpravo.



Obrázek 5.5: Senzor vyrobený fotolitograficky v Nanofabu (vlevo), senzory vyrobené na TUL (vpravo)

### 5.4 Průmyslově vyráběný PVDF senzor

Měření v rámci této disertační práce byla provedena pomocí průmyslového, sériově vyráběného PVDF senzoru ze skupiny DT elementů od výrobce TE Connectivity (dříve Measurement Specialties, Inc). Podrobný popis senzoru a související informace jsou uvedeny v Piezo Film Sensors Technical Manual (1999). Výhodou tohoto typu senzoru je jeho nízká cena v řádu jednotek dolarů a související standardní kvalita výrobku, dále připojení vodičů nýty k senzoru již při výrobě a ochranné krytí senzoru vrstvou urethanu. Další výhodou je dobrá manipulovatelnost a možnost jednoduchého krácení po délce senzoru. Nevýhodou při krácení je fixní šířka, obdélníkový tvar činné části senzoru a rovněž vznik řezu, který vyžaduje elektrickou izolaci. Senzor je vyráběn i ve variantě s laminací na vrstvě polyesteru Mylaru, která by sice poskytla větší ochranu proti erozi, ale zároveň přináší problém při jejím ohýbání a lepení. Proto byla zvolena varianta bez laminace. Další volitelným parametrem je rozměr senzoru, kdy byl volen senzor s nejmenší šířkou (pro lepší prostorové rozlišení) a nejmenší délkou (senzor byl vždy krácen). Poslední volitelný parametr je tloušťka PVDF vrstvy ve dvou variantách, a to 28 μm a 52 µm. Pro zajištění co nejvyšší rezonanční frekvence senzoru byla volena tenčí varianta o tloušťce 28 µm, které dle dříve uvedeného výpočetního vztahu odpovídá rezonanční frekvence senzoru 39,2 MHz. Na základě zde uvedených úvah byl volen senzor DT1-028K W/TH LEADS/RIVET, který je na obrázku 5.6. Senzor je tvořen tenkým filmem PVDF polymeru tloušťky 28 µm, jehož plochy jsou z obou stran metalizovány stříbrem a představují elektrody činnou plochu senzoru o rozměrech 12 mm × 30 mm. Elektrody jsou vyvedeny na nýty

s výstupními vodiči. Tato sendvičová struktura je na obou stranách pokryta ochrannou vrstvou urethanu, zabraňující oxidaci elektrod, v tloušťkách 40 – 50 nm na vrchní straně a 20 nm na spodní straně. Celková tloušťka senzoru je 40 µm. Při znalosti kapacity senzoru 68,4 pF, celkové kapacity náhradního obvodu 528,4 pF a vstupního odporu osciloskopické karty 1 M $\Omega$ , byla dopočítána mezní frekvence 301,2 Hz a časová konstanta 528,4 µs zvoleného senzoru. Ačkoliv se jedná o polymer, definujeme u něho tytéž vlastnosti jako u běžně známých piezoelektrických monokrystalů či polykrystalů. Piezoelektrická nábojová konstanta senzoru je  $d_{33} = 33 \cdot 10^{-12} \,\mathrm{C} \cdot \mathrm{N}^{-1}$ piezoelektrická а napěťová konstanta senzoru ie  $g_{33} = 330 \cdot 10^{-3} \,\mathrm{V \cdot m \cdot N^{-1}}$ . Poslední důležitý údaj je rozsah teplot použití senzoru, a to v intervalu teplot 0 °C až + 70 °C.



Obrázek 5.6: Průmyslově vyráběný PVDF senzor

### 5.5 Kalibrace PVDF senzoru

Kalibraci PVDF senzoru pro měření dynamických účinků od kavitačních efektů lze provést třemi základními metodami – metodou pádu kuličky, kyvadlovou metodou a metodou zlomení tuhy. Volba těchto metod vychází z pohledu na časovou podobnost kalibrace a kavitačního děje. Je totiž nutné, aby se časové měřítko kalibrace přibližovalo kavitačním efektům, majících velice krátkou dobu trvání v řádech mikrosekund a nanosekund. Z tohoto důvodu je nejvhodnější poslední zmíněná metoda, kdy je doba náběhu při skokové změně zatížení 7 - 8 µs oproti 40 – 80 µs u zbývajících metod (Soyama et al., 1998). Naproti tomu však metoda zlomení tuhy vyžaduje složitější kalibrační zařízení a rovněž přináší značné problémy s kvalitou použitých uhlíkových tuh. Další její podstatnou nevýhodou je malá působící síla během kalibrace, a to v řádu jednotek až desítek newtonů. Při kalibraci senzoru s přidanou ochrannou vrstvou, která snižuje jeho citlivost, je potom kalibrovaný rozsah při použití této metody ještě menší. V některých případech je metoda až nevhodná.

Metoda zlomení tuhy je založena na postupném zatěžování kalibrovaného senzoru statickou silou až do bodu zlomení tuhy, kdy dochází k jeho skokovému odlehčení a následně nábojové (napěťové) odezvě na toto odlehčení, odpovídající maximálnímu statickému zatížení. Před zlomením se zaleštěná kontaktní plocha tuhy, která je připevněna v rameni, dotýká senzoru konstantní silou. Protože je PVDF senzor vhodný pro měření dynamických sil, je náboj vygenerovaný touto konstantní silou na vývodech senzoru po určité době nulový (určitá procentuální hodnota vybití je dána násobkem časové konstanty  $\tau$ ). Zatížení konstantní silou je realizováno nádobou připojenou k rameni, do které se přilévá voda a tím se zvyšuje zatížení senzoru. Při zlomení tuhy je piezoelektrická struktura uvolněna, je generován elektrický náboj a jemu úměrné elektrické napětí na vývodech. Tomuto elektrickému napětí lze přiřadit zatěžující

sílu a získat tak kalibrační závislost elektrického napětí na síle. Schéma metody je ukázáno na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Metoda zlomení tuhy

Kyvadlová metoda a metoda pádu kuličky jsou založeny na impulsové větě, tj. tvrzení, že časová derivace celkové hybnosti soustavy je rovna výslednici vnějších sil působících na soustavu. Impulsová věta tak umožňuje vypočítat střední hodnotu síly impaktního tělesa  $F_k$  na základě změny rychlosti impaktního tělesa během impaktu. Pokud budeme uvažovat hmotnost impaktního tělesa  $m_k$  působícího na senzor mezi okamžikem dopadu (1) a odrazu (2), tj. mezi časy  $t_1$  a  $t_2$  po dobu  $\tau_k = t_2 - t_1$ , a rychlosti před dopadem  $v_{k,1}$  a po odrazu  $v_{k,2}$ , lze střední hodnotu síly  $F_k$ vypočítat následovně:

$$F_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \frac{m_k}{\tau_k} \left( v_{k,1} + v_{k,2} \right).$$
(5.9)

Dále je nutné vyjádřit rychlosti před dopadem a po odrazu pro obě metody. U kyvadlové metody se používá impaktního tělesa ocelové kuličky hmotnosti  $m_k$ , spojené se strunou délky l a zavěšené na pevnému bodě nad kalibrovaným senzorem. Při kalibraci se kulička nechá volně kývnout z natažené polohy o počátečním úhlu  $\theta_1$ , dopadá na kalibrovaný senzor, odráží se a vystoupá zpět do pozice o koncovém úhlu  $\theta_2$ . Během dopadu a odrazu, tj. po dobu dobu  $\tau_k$  kulička působí silou  $F_k$  na kalibrovaný senzor a na vývodech senzoru se měří elektrické napětí U. Rychlost před dopadem a po odrazu lze vypočítat z bilance polohové a pohybové energie a je rovna:

$$v_{k,i} = \sqrt{2 \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \theta_i)}, \qquad i = 1,2.$$
 (5.10)

Schéma kalibrace kyvadlovou metodou je na následujícím obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Kalibrace kyvadlovou metodou

Kalibrace kyvadlovou metodou může být ovlivněna vnesením struny do systému (tuhost, napnutí, připevnění ke kuličce, …) a proto byla v našem případě zvolena metoda pádu kuličky, jejíž schéma je na obrázku 5.9. Při metodě pádu kuličky se ocelová kulička o hmotnosti  $m_k$  nechá volně padat trubičkou z výšky  $h_{k,1}$ . Dopadá na kalibrovaný senzor, silově na něho působí po dobu  $\tau_k$  a na kontaktech senzoru je měřeno elektrické napětí *U*. Kulička se odrazí a stoupá do výšky  $h_{k,2}$ . Pro tuto metodu lze z bilance polohové a pohybové energie vypočítat rychlost kuličky před dopadem  $v_{k,1}$  a po odrazu  $v_{k,2}$  následovně:

$$v_{k,i} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{k,i}}$$
,  $i = 1,2$ . (5.11)

Na základě znalosti těchto rychlostí lze vypočítat střední hodnotu impaktní síly  $F_k$ .



Obrázek 5.9: Kalibrace metodou pádu kuličky

Při kalibraci metodou pádu kuličky je interval možných hodnot impaktních sil a jim odpovídajících elektrických napětí určen velikostí kuličky (hmotností kuličky) a její počáteční polohou (délkou vodící trubice). Proto bylo rozhodnuto použít pouze jednu vodící trubici nominální délky 400 mm a pět kuliček různých velikostí, uvedených v tabulce pod tímto textem. Dále bylo rozhodnuto pro každou velikost kuličky provést pět kalibračních testů. Signál z kalibrovaného senzoru byl měřen pomocí osciloskopické karty NI USB 5132, která byla ovládána pomocí virtuálního měřicího přístroje v programu NI Signal Express. Ukázka signálu z kalibrace s kuličkou o hmotnosti 0,7 g a počáteční startovací pozicí 400 mm je na obrázku 5.10. Záznamy signálů z jednotlivých kalibračních pokusů byly uloženy v počítači, kde byly zpracovány v programu Matlab v několika krocích. V prvním kroku se v záznamu signálu z kalibrace vyhledala maximální hodnota elektrického napětí. V následujícím kroku se dopočítal 2% podíl maximální hodnoty, který sloužil jako limitní hodnota pro zjištění počátku a konce signálu. V dalším kroku byl nalezen čas dopadu  $t_1$  a čas odrazu  $t_2$ . Jejich rozdíl na časové ose představuje dobu trvání impaktu  $\tau_k$ . Pro úplnost je vhodné uvést, že proběhlo testování vlivu hodnoty procentuálního podílu druhého kroku zpracování. Při podílech menších jak 2 % docházelo k chybnému vyhodnocení z důvodu šumu. V posledním kroku zpracování byl signál integrován. Vydělením integrálu plochy dobou trvání impaktu byl zjištěn poměr mezi maximálním a středním elektrickým napětím, který byl použit pro odhad maximální síly. Pozice kuličky byla snímána kamerou v nastavení "slow motion" a vyhodnocena v prohlížeči Windows Media Player. Kalibrace byla provedena jak před experimentem, tak i po experimentu ve vysokorychlostním kavitačním tunelu, aby bylo zjištěno, zda nedošlo při měření ke změnám (porušení senzoru, odlepení senzoru, vodivé spojení metalizací, ...).

V průběhu působení kuličky na senzor se síla mění, čemuž odpovídá i průběh elektrického napětí. Proto je vhodné kalibraci vztáhnout k hodnotám maximálního elektrického napětí a maximální síly a získat tak závislost  $U_{max} = U_{max}$  ( $F_{max}$ ). Maximální napětí lze přímo odečíst z naměřeného signálu. Maximální sílu dovoluje odhadnout naměřený průběh elektrického napětí. Střední hodnotu elektrického napětí  $U_{str}$  lze získat integrováním celého signálu elektrického napětí mezi časy  $t_1$  a  $t_2$  a jeho následným vydělením dobou působení síly  $\tau_k$ . Tak byl získán poměr mezi střední hodnotou elektrického napětí a maximální hodnotou elektrického napětí pro každý provedený kalibrační test. Pro námi vybraný soubor provedených kalibračních testů na pozici č. 3 je průměrná hodnota tohoto poměru po zaokrouhlení 0,56. Uvedenou skutečnost konstatuje i Franc (2011), který se při kalibraci setkal s hodnotou zmíněného poměru 0,59. Analogicky byl zjištěný poměr použit pro odhad maximální síly z vypočítané střední hodnoty síly pro každý kalibrační test. U každé série kalibračních testů určitého kalibrovaného senzoru pak byly přiřazeny hodnoty maximálního elektrického napětí hodnotám maximální působící impaktní síly. Následně byla pomocí lineární regrese zjištěna citlivost senzoru *k*.



Obrázek 5.10: Ukázka signálu kalibrace (kulička 0,7 g; startovní pozice 400 mm)

Ukázka kalibrace senzoru na pozici č. 3 (pozn. poloha pozic na disku je uvedena v oddílu 6.3) před experimenty a po experimentech v kavitačním tunelu trvajících 75 minut jsou na obrázku 5.11. Funkční závislost maximální síly na maximálním napětí této kalibrace před experimenty byla  $F_{max}$  [N] =  $U_{max}$  [V] / 0,017 a po experimentech byla  $F_{max}$  [N] =  $U_{max}$  [V] / 0,018. Pro další použití kalibrační závislosti pro vyhodnocení měření byla uvažována střední hodnota jmenovatele tohoto vztahu, označovaného za citlivost senzoru. Rovněž je vhodné upozornit na rozsah kalibrace. V grafu pro pozici č. 3 jsou maximální impaktní síly v rozsahu od cca 90 N do 240 N. Pro zjištění maximální síly z měřeného maximálního elektrického napětí mimo rozsah kalibrace bylo uvažováno pokračující lineární chování. Pak byla i pro tuto oblast použita citlivost zjištěná v kalibrovaném rozsahu. Popsaným způsobem byly provedeny i kalibrace ostatních pozic. Zjištěné hodnoty citlivostí jsou uvedeny v tabulce 5.1.



Obrázek 5.11: Kalibrační závislost před a po měření v kavitačním tunelu na pozici č. 3

(a)		_	(b)	
Průměr kuličky	Hmotnost kuličky	-	Pozice č.	Citlivost
[mm]	[g]		[-]	$[V \cdot N^{-1}]$
4.74	0.440	_	1	0.019
5.54	0.700		2	0.019
6.32	1.046		3	0.018
6.98	1.398		4	0.020
7.94	2.040		5	0.018
		-	6	0.017
			7	0.020

**Tabulka 5.1:** Použité kuličky (a) a zjištěné citlivosti senzorů (b)

Kalibraci typově shodného PVDF senzoru, ale kyvadlovou metodou, prováděli ve své práci Wang a Chen (2007). PVDF senzor byl v jejich práci z důvodu zvýšení odolnosti překryt polypropylenovou páskou tloušťky 50 µm. Autoři provedli korelaci střední hodnoty elektrického napětí a střední hodnoty impaktní síly o maximální velikosti 90 N a zjistili citlivost 0,013 V·N<sup>-1</sup>. Tato hodnota se neodlišuje od citlivosti mechanicko-elektrické konverze 0,013 V·N<sup>-1</sup>, uváděné výrobcem (*Piezo Film Sensors Technical Manuals*, 1999, p. 4). Na základě tohoto výsledku lze usoudit, že jedna vrstva polypropylenové pásky neovlivňuje citlivost senzoru. Wang a Chen (2007) rovněž zjišťovali frekvenční rozsah měření a rezonanční frekvenci pomocí plynové trubice generující tlakové vlny (PCB Model 901A10, PCB Piezotronics Inc.). Autoři uvádějí, že uvažovaný PVDF senzor má plochou frekvenční odezvu do 1 MHz, rezonanční frekvenci 3,1 MHz a výrazné zeslabení signálu pro frekvence vyšší než 10 MHz. Soyama et al. (2011) ve své práci použili dva PVDF senzory tloušťky 110 µm ve dvou variantách přilepení na ocelovou destičku. PVDF senzory byly podlepeny kaptonovou páskou tloušťky 60 µm, která tvořila podkladovou izolační vrstvu mezi ocelovou destičkou a PVDF senzorem. V prvním případě byl PVDF senzor s kaptonovou páskou přilepen na horní stranu ocelové destičky a pak překryt kaptonovou páskou tvořící vrchní ochrannou vrstvu. Ve druhém případě byl PVDF senzor s kaptonovou páskou přilepen na spodní stranu ocelové destičky, opět překryt kaptonovou páskou, na níž byl následně přilepen blok akrylového lepidla. Autoři provedli kalibraci metodou zlomení tuhy na vrchní straně destičky a zjistili citlivost pro první případ 0,012 V·N<sup>-1</sup> a citlivost 0,0025 V·N<sup>-1</sup> pro druhý případ. Momma a Lichtarowicz (1995) použili PVDF senzor tloušťky 110 µm, který podlepili kaptonovou páskou tloušťky 25 µm a jako celek přilepili na kovovém terči testovacího zařízení. Senzor dále překryli dvěma vrstvami polyimidové pásky, každé o tloušť ce 70 µm. Následně provedli kalibraci metodou pádu kuličky (rozsah sil 5 - 40 N) a metodou zlomení tuhy (rozsah sil 6 - 15 N). Obě metody při spojení vedou na kalibrační konstantu cca 0.04 V $\cdot$ N<sup>-1</sup> (Momma a Lichtarowicz, 1995, p. 8, odečet z grafu č. 18). Představení metody kalibrace - metody zlomení tuhy a její porovnání a metodou pádu kuličky provedli Soyama et al. (1998). Ve své studii použili PVDF senzor tloušťky 110 µm, který byl podlepen kaptonovou páskou a následně spolu s ní přilepen na ocelovou destičku. Vrchní strana PVDF senzoru byla překryta dalšími vrstvami kaptonové pásky. V práci není uvedena tloušťka kaptonové pásky. Autoři ukázali časovou podobnost mezi signálem od kolapsu kavitační bubliny a signálu získaného při kalibraci metodou zlomení tuhy. Rovněž ukázali, že z hlediska doby trvání se metoda pádu kuličky do jisté míry odlišuje od doby trvání kolapsu kavitační bubliny. Soyama et al. (1998) testovali zároveň i vliv tloušťky ochranné vrstvy senzoru tvořené 2, 3, 4 a 6 vrstvami polyimidové pásky, pro něž zjistili v odpovídajícím pořadí citlivosti 0,096 V·N<sup>-1</sup>; 0,087 V·N<sup>-1</sup>;  $0.087 \text{ V} \cdot \text{N}^{-1}$ ;  $0.086 \text{ V} \cdot \text{N}^{-1}$ . Platí tedy, že se zvětšující se tloušťkou ochranné vrstvy klesá citlivost senzoru, nejedná se však o výrazný pokles. Autoři dále testovali vliv různých typů tuh o průměru 2 mm na kalibraci. Zjistili, že průměrná kalibrační konstanta zůstává neměnná, ale že je lepší pro kalibraci volit tvrdé tuhy, protože mají menší odchylky. Autoři také provedli kalibraci metodou zlomení tuhy na vzduchu a pod vodou a nenalezli mezi jednotlivými citlivostmi výrazný rozdíl.

## Kapitola 6

## Testovací měření a optimalizace návrhu měření

Pro studium mechanismu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur ve vysokorychlostním kavitačním tunelu byly zvoleny dva přístupy. Prvním přístupem bylo měření silového účinku od kolapsů pomocí PVDF senzorů, druhým pak provedení erozních testů v počáteční fázi kavitační eroze, tzv. pitting testů. Šestá kapitola se věnuje testování první metody - měření silového účinku pomocí PVDF senzoru, umístěného v oblasti eroze. Cílem bylo zjistit použitelnost PVDF senzoru v kavitačním tunelu a možná omezení. Zároveň byla optimalizována geometrie díry a technologický postup při lepení PVDF senzoru. Jednalo se hlavně o výběr vhodného lepidla, zvětšení tloušťky vrstvy lepidla chránící PVDF senzor, vytvoření obvodové drážky či použití podpůrné destičky.

# 6.1 Testovací měření pro určení geometrie díry a metody přilepení PVDF senzoru

#### 6.1.1 První série testovacích měření

Pro testovací měření byl vyroben testovací disk z nerezové oceli s dírou hloubky 0,2 mm pro přilepení PVDF senzoru. Díra byla vyfrézována na pozici mezikruží mezi poloměry 21 mm a 26 mm, kde kavitační eroze dosahuje extrémních hodnot. Před lepením bylo nutné díru zbavit nečistot a odmastit. PVDF senzor byl zkrácen odříznutím části činné plochy. Činná plocha senzoru pak činila už pouze 12 × 5 mm na měřicí ploše disku. V díře pro nýty a vodiče senzoru, kam byl senzor zapuštěn, pak zůstával zbytek činné plochy, avšak kolmé k erodované ploše. Po zkrácení byla část senzoru s nýty a vodiči zalita v díře pro vodiče univerzálním epoxidovým lepidlem Bison Epoxy 5 min. Následně byla činná část senzoru přilepena univerzálním sekundovým kyanoakrylátovým lepidlem Loctite Power Flex Gel (dále jen kyanoakrylátové lepidlo) k ploše díry v disku. Obě lepidla splňují požadavek na delší manipulační dobu před vytvrdnutím (u epoxydového lepidla 5 minut, u kyanoakrylátového lepidla byla volena varianta gel) a na transparentnost nutnou pro zacílení kuličky při kalibraci. Posledním krokem bylo vytvoření vrchní ochranné vrstvy kyanoakrylátového lepidla pro ochranu senzoru před kavitační erozí. Umístění PVDF senzoru v zájmové oblasti a geometrie díry je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Umístění PVDF senzoru v erodované oblasti a detail přilepení pro první testovací měření



Obrázek 6.2: Detail přilepení a poškození prvního testovacího měření

Při prvním testu v kavitačním tunelu pro režim 40 bar byl senzor odlepen od disku, a to již během spuštění tunelu. Následně byl tentýž senzor opět přilepen, ale již s mírným zdrsněním plochy na disku. Pokračovalo se dalším testem v kavitačním tunelu za původních podmínek. Senzor vydržel déle, nicméně se i tak se jednalo o velmi krátkou dobu. Na obrázku 6.2 jsou dvojice snímků senzorů, levý snímek ukazuje stav před testem a pravý snímek ukazuje stav po testu. V první řadě jsou snímky prvního testu, ve druhé řadě druhého testu. Na základě prvního testu bylo rozhodnuto více zdrsnit plochu na disku pomocí ostří nožové planžety pro lepší přilepení činné části senzoru. Další změnou bylo použití epoxidového lepidla Bison Epoxy 5 min pro vytvržení vrchní ochranné vrstvy pro ochranu senzoru. Uvedené epoxydové lepidlo má po vytvrzení lepší povrch, kyanoakrylátové lepidlo totiž při vytvrzování vytvoří drsný povrch. Během následujícího testu

v kavitačním tunelu pro režim 40 bar senzor odolal po delší dobu, nicméně byl opět poškozen. Snímky přilepení a poškození pro testovací měření po zdrsnění plochy jsou na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Testovací měření po zdrsnění plochy pro přilepení činné části senzoru

## 6.1.2 Druhá série testovacích měření

Po 1. sérii testovacích měření bylo rozhodnuto provést dvě úpravy. Zvětšit hloubku díry z původních 0,2 mm na 0,8 mm a vytvořit obvodové drážky okolo plochy pro přilepení senzoru. Úpravy byly provedeny ručním nářadím Dremel. Plocha pro přilepení senzoru byla zdrsněna ostřím nožové planžety. Při testu v kavitačním tunelu při režimu 30, 35 a 40 bar byl senzor okamžitě porušen, jak vidíme na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Disk po zvětšení hloubky díry a s obvodovou drážkou

Dalším testovaným návrhem byla výměna univerzálního epoxydového lepidla Bison Epoxy 5 min nejprve za epoxidové lepidlo Araldite Standard, a po neúspěšném testu v kavitačním tunelu za konstrukční lepidlo Loctite 3450 A&B Hysol s obsahem ocelového prachu pro lepší spojení s povrchem disku. Lepidlo obsahující ocelový prach však přináší nevýhodu ve své neprůhlednosti. Povrch lepidla byl v okrajových částech mírně zabroušen, jak je vidět na levé fotografii následujícího obrázku 6.5. Test v kavitačním tunelu byl proveden pro režim 40 bar. Senzor byl poškozen. Ukázka poškození je na pravé části obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Použití konstrukčního lepidla s ocelovým prachem

#### 6.1.3 Třetí série testovacích měření

Po 2. sérii testovacích měření bylo rozhodnuto zvětšit hloubku díry z 0,8 mm na 1,2 mm a ponechat obvodové drážky okolo plochy pro přilepení senzoru. Plocha pro přilepení senzoru byla opět zdrsněna ostřím nožové planžety. Při testu v kavitačním tunelu při režimu 40 bar byl senzor okamžitě poškozen. Na obrázku senzoru před poškozením lze rozpoznat značné množství bublinek v lepidle. Bublinky vznikají nevhodným mícháním složek lepidla. Bylo zjištěno, že bublinky se tvoří méně při zmenšení úhlu mezi míchadlem a povrchem, na kterém je lepidlo mícháno. Přilepení a poškození této série testovacích měření je na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Třetí série testovacích měření

Po posledním uvedeném testovacím měření bylo rozhodnuto provádět testování vzestupně od méně agresivních režimů. Dále bylo navrženo použít podpůrnou destičku, sloužící pro přesné definování činné plochy senzoru. Na předchozím obrázku je vidět část PVDF senzoru za hranou plochy na disku, která nemá ostrý přechod mezi činnou částí a zbytku PVDF senzoru. I tato nepatrná část PVDF senzoru by mohla generovat signál a ovlivnit měření. Z tohoto důvodu bylo provedeno testování vlivu ohnutí PVDF filmu na měření. Byl vyroben testovací H element se zaoblením 3 mm na jedné straně a sražením  $0,3 \times 45^{\circ}$  na druhé straně. Na element byl přilepen PVDF senzor a tato sestava byla přilepena k základové desce a pak jako celek vložena do rámu. Prostor byl vyplněn epoxidovým lepidlem Bison Epoxy 5 min, čímž vznikla ochranná vrstva lepidla 1,1 mm nad PVDF senzorem. Po délce řezu bylo voleno 7 pozic, na kterých probíhalo měření síly metodou kalibrace padající kuličky. Měření bylo pro každou pozici provedeno třikrát kuličkou hmotnosti 0,7 g o počáteční pozicí 400 mm nad vrstvou lepidla. V pozicích č. 1 a č. 7, které jsou mimo PVDF senzor, byla při testu síla nulová. V pozicích č. 1, 2, 3 dochází k ovlivnění

měřené síly. V pozicích č. 4, 5, 6 není měřená síla ovlivněna. Na základě tohoto měření bylo rozhodnuto používat podpůrnou destičku a zabezpečit ostrý přechod mezi činnou plochou PVDF senzoru a zbývající částí PVDF senzoru v díře disku. Geometrie destičky, proměřovaná místa a výsledky jsou na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Ověření vlivu ohnutí PVDF senzoru

Při testu vlivu ohnutí PVDF senzoru vyvstala otázka, zda při měření v kavitačním tunelu nedochází k reflexím tlakových vln uvnitř díry s lepidlem a zvláště pak v dírách pro nýty a vodiče PVDF senzoru. V díře totiž zůstává část činné plochy PVDF senzoru (cca 2 × 12 mm), která by mohla být reflektovanými tlakovými vlnami ovlivněna. Proto byl proveden test, kdy se do díry v disku vložil PVDF senzor na podpůrné destičce z PMMA a jeho část běžně používaná pro měření byla uříznuta. V díře zůstala pouze vertikální část PVDF senzoru, která byla testována, zda bude registrovat účinky od kavitačního působení při provozu tunelu. Během testu bylo zjištěno, že i vertikální část PVDF senzoru částečně registruje účinek od kavitace a může tak ovlivnit měření. Tentýž experiment byl proveden s lepidlem Bison Epoxy 1,5 hod s obdobným závěrem. Z výsledku testů plyne, že je nutné PVDF senzor ohýbat hned za nýty, v místě, kde začíná metalizace a tím se vyvarovat činné části senzoru ve vertikální poloze. Obrázek 6.8 ukazuje vertikální část PVDF senzoru, přilepenou na podpůrné destičce a testovací disk s touto destičkou.



Obrázek 6.8: Testování vertikální části PVDF senzoru na podpůrné destičce

Následující senzory již nemají činnou vertikální část. Při jejich testování se začalo od nejméně agresivního režimu 2,41 bar a úspěšně pokračovalo až k režimu 25 bar. Při režimu 30 bar byl senzor poškozen. Na obrázku 6.9 je geometrie díry při měření s podpůrnou destičkou a detail senzoru před a po testu při režimu 30 bar. Na základě tohoto testovacího měření bylo rozhodnuto provádět měření ve vysokorychlostním kavitačním tunelu pouze do režimu 25 bar.





Obrázek 6.9: Měření s podpůrnou destičkou

#### 6.2 Testovací měření pro určení oblasti eroze

Na základě zkušeností pracovníků laboratoře LEGI se oblast extrémní kavitační eroze disku nachází na mezikruží mezi poloměry 21 mm a 26 mm. Protože se jednalo o přibližný údaj a zájmová oblast pro studium mechanismu kolapsu kavitačního mraku může být i vně uvedené oblasti, bylo rozhodnuto provést erozní test a na základě získaného erodovaného profilu stanovit zájmovou oblast. Pro výrobu testovacího disku pro erozní test byl volen materiál EN AW-7075 T651. Doba testu byla 10 hodin při režimu 40 bar. Na obrázku 6.10 je erodovaný disk. Na všech poloosách, tj. ve směrech 1 – 4, byl změřen profil eroze. Na obrázku 6.11 je pak profil v poloose č. 1, kde vodorovná osa představuje radiální vzdálenost od středu disku a svislá osa hloubku profilu. Ačkoliv zde nejsou uvedeny profily v dalších osách, na obrázku erodovaného disku je vidět, že se eroze v jednotlivých osách liší (profil v poloose č. 3 byl ovlivněn zásekem do trysky). Proto bylo rozhodnuto, že veškerá měření budou probíhat pouze v jedné poloose, a to v poloose č. 1. Z grafu erodovaného profilu pro poloosu č. 1 byla stanovena zájmová oblast dalších měření na mezikruží mezi poloměry 20 mm a 30,5 mm.



Obrázek 6.10: Erozní test pro určení oblasti eroze na vzorku EN AW-7075 T651 po 10 hodinách



Obrázek 6.11: Erozní profil v poloose č. 1

# 6.3 Testovací měření pro určení geometrie díry pro PVDF senzor na rozdělené erodované oblasti

Na základě předchozího testovacího měření byla zjištěna skutečná erodovaná oblast. Tato oblast byla dále rozdělena na podoblasti s cílem získat prostorové rozložení účinků od kolapsu kavitačního mraku ve vysokorychlostním kavitačním tunelu. Zájmová oblast na mezikruží mezi poloměry 20 mm a 30,5 mm, tj. oblast délky 10,5 mm, byla rozdělena na 7 podoblastí délky 1,5 mm. Tyto podoblasti jsou v textu disertační práce označovány jako pozice s uvedeným pořadovým číslem, jak je uvedeno v tabulce 6.1.

Pozice č.	Délka senzoru	Šířka senzoru	Interval radiální pozice
[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1			(20,0 - 21,5)
2			(21,5 - 23,0)
3			(23,0 - 24,5)
4	1.5	12	(24,5 - 26,0)
5			(26,0 - 27,5)
6			(27,5 - 29,0)
7			(29,0 - 30,5)

Tabulka 6.1: Měřené pozice

Zároveň byl vytvořen nový návrh geometrie díry, do které se vkládá destička z polykarbonátu (Quinn Plastic Derrylin Co Fermanagh BT92 9 AU N) tloušťky přesně 1,5 mm, tvořící podkladovou plochu pro PVDF senzor. Nová geometrie díry je na obrázku 6.12 a 6.13. Testovací měření byla provedena pro druhou pozici, tj. na ploše o vzdálenosti od středu mezi 21,5 mm a 23 mm. Na polykarbonátovou destičku o rozměrech  $16 \times 1.5 \times 10.3$  mm, do které byly dříve vybroušeny díry pro nýty a drážky pro vodiče pomocí ruční brusky Dremel, byl přilepen pomocí kyanoakrylátového lepidla PVDF senzor tak, aby činná plocha začínala na hraně destičky. Pak byl film seříznut ostřím nožové planžety na hraně destičky, čímž bylo dosaženo činné plochy o rozměrech 1,5 × 12 mm. Hranu řezu PVDF filmu nebylo nutné odizolovat, naopak vývody PVDF senzoru byly pro zamezení vodivého spojení s materiálem disku obaleny izolační bužírkou. Následně byla destička vlepena do díry pomocí kyanoakrylátového lepidla a zbývající prostor díry v disku vyplněn epoxidovým lepidlem Bison Epoxy 1,5 hod. Tím byla zároveň vytvořena vrstva chránící senzor. Zaplnění díry uvedeným epoxidovým lepidlem bylo provedeno ve dvou krocích. Nejdříve byl vyplněn prostor pod činnou plochou senzoru a pak nanesena vrchní vrstva nad činnou plochu senzoru. Tento postup plynul ze smrštění lepidla během vytvrzení. Finální povrch lepidla měl potom méně prohlubní. Hloubka prohlubní byla kontrolována úchylkoměrem a jednalo se o hloubky v řádu desítek mikrometrů vůči ploše disku.

Při testovacích měřeních byly provedeny testy pro režim 20 bar a 30 bar. Při režimu 30 bar byl senzor velmi rychle, cca po 5 sekundách poškozen. Poškození se projevilo v signálu jako zákmity a následný nulový signál. Charakter poškození (lesklý, hladký kráter) neodpovídal dosud známým vzorům poškození a tak bylo rozhodnuto test opakovat.



Obrázek 6.12: Geometrie díry pro PVDF senzor na destičce pro měření na podoblastech



Obrázek 6.13: První test s PVDF senzorem šířky 1,5 mm a lepidlem Bison Epoxy 1,5 hod

Následně byl připraven další testovací disk. Pro výplň díry bylo použito epoxidové lepidlo Bison Epoxy 5 min a vzdálenost činné plochy PVDF senzoru od plochy disku byla 1,2 mm. Specifické poškození bylo přisuzováno existenci bublin, vyskytujících se v lepidle Bison Epoxy 1,5 hod. Lepidlo Bison Epoxy 1,5 hod je oproti lepidlu Bison Epoxy 5 min více viskózní a při míchání u něho dochází snáze ke vzniku bublinek. Během krátkodobého testu při 25 bar došlo ke spojení metalizací PVDF senzoru a získaný signál byl proto nulový. Spojení metalizací nastalo v důsledku nevhodného odříznutí části PVDF senzoru, kdy na hraně řezu zůstaly otřepy. Film je proto nutné řezat ostrým nožem a kolmo na činnou plochu PVDF senzoru. Po řezání je vhodné hranu PVDF senzoru jemně očistit. Ačkoliv nebylo možné z důvodu nulového signálu provést měření, bylo rozhodnuto polovinu vrchní vrstvy lepidla zdrsnit a polovinu ponechat v původním stavu a provést dlouhodobý test odolnosti ochranné vrstvy lepidla při 25 bar. Na levé části obrázku 6.14 je testovací disk s dírou vyplněnou transparentním lepidlem Bison Epoxy 5 min. Na pravé části obrázku 6.14 je vidět poškození podobného charakteru jako v předchozím případě. Erodovaný povrch je hladký a lesklý a vznikl hlavně na nezdrsněné polovině lepidla. Proto byla při dalším testu vrchní vrstva zdrsněna.



Obrázek 6.14: Test s ochrannou vrstvou lepidla Bison Epoxy 5 min

Testování pokračovalo přípravou disku jako v předchozím případě, ale se vzdáleností činné části PVDF senzoru 1,5 mm od plochy disku. Ochranná vrstva lepidla byla zdrsněna lapovacím papírem SIA 3/0 a pak SIA 6/0. Touto úpravou došlo k částečné ztrátě transparentnosti v důsledku zdrsnění plochy lepidla a "mazání" hliníku, kdy vznikla černá směs zrn hliníku a brusných zrn. Tuto nečistotu je možno očistit vlhčeným ubrouskem. Po očištění lze bez problémů lokalizovat polohu senzoru při kalibraci.

Testovací měření proběhlo pro režim 30 bar. Krátce po rozběhu byl senzor poškozen v celé oblasti, jak je vidět na obrázku 6.15. Byla nadnesena hypotéza, že k poškození dochází v důsledku interakce tlakových vln od kolapsů uvnitř lepidla. Lepidlo a polykarbonát mají podobné akustické vlastnosti blízké akustickým vlastnostem vody. Naopak akustické vlastnosti metalizace jsou od nich různé. Pravděpodobně tak docházelo k odrazu na hranici s metalizací a stěn díry a k jejich setkání a soustředění energie v ochranné vrstvě lepidla, kde mohlo docházet až k jeho natavení. Problém byl diskutován i na konferenci CAV 2015 s Prof. Matevzem Dularem, který uvedl, že se s podobným případem setkal u jezu v Německu. V místech výskytu kavitace byla umístěna deska z PMMA, ale kavitační poškození se vyskytovalo až pod touto deskou, pravděpodobně interakcí různých tlakových vln. Přesné vysvětlení jevu není známé.



Obrázek 6.15: Poškození ochranné vrstvy lepidla

Na základě zjištěných skutečností bylo navrženo použít destičku z hliníku o rozměrech  $16 \times 1,5 \times 11$  mm. Přilepení bylo provedeno obdobným způsobem jako v předchozích případech, jen bylo nutné dbát na odizolování senzoru a naopak vodivé spojení destičky s materiálem disku pomocí hliníkové folie. Ochranná vrstva lepidla byla po zatvrdnutí zabroušena a zaleštěna do roviny s plochou disku lapovacími papíry SIA 3/0 a SIA 6/0. Při dlouhodobých testech (v řádu jednotek minut) při režimu 15 bar došlo opět k poškození ochranné vrstvy lepidla. Jednalo se pravděpodobně o podobný mechanismus poškození jako v předchozích případech. Vzniklé

poškození vidíme na pravé části obrázku 6.16. Bylo opraveno odvrtáním, které je na obrázku 6.17 nalevo a vyplněním odvrtaných děr původním druhem lepidla. U dalších testů při režimu 20 bar došlo ke vzniku dutiny uvnitř ochranné vrstvy a jejímu vyboulení nad povrch disku. Zdá se, že opět došlo k natavení v místech opravy a to s ještě větším účinkem, jak lze vidět na pravé části obrázku 6.17.



Obrázek 6.16: Disk s PVDF senzorem na hliníkové destičce



Obrázek 6.17: Oprava a následné poškození ochranné vrstvy

V důsledku neustále se opakujícího poškození bylo navrženo provést test bez PVDF senzoru a s vyplněním díry epoxidovým lepidlem Bison Epoxy 5 min. Následoval několikaminutový test při režimu 20 bar. Opět došlo k poškození. Ukázka disku před testem a poškození lepidla jsou vidět na obrázku 6.18.



Obrázek 6.18: Test bez PVDF senzoru

V předchozích testech docházelo k poškození ochranné vrstvy lepidla. Bylo rozhodnuto více nepoužívat podpůrných destiček a zároveň vytvořit nový návrh geometrie díry pro PVDF senzor.

V novém návrhu byla vzdálenost činné plochy PVDF senzoru od plochy disku rovna 1 mm. Návrh je na obrázku 6.19. Byl vyroben nový testovací disk pro pozici č. 4, u něhož byla dále ručním nářadím Dremel pomocí kotoučku vybroušena drážka po obvodu díry v hladině PVDF senzoru, pro lepší zapuštění ochranné vrstvy lepidla a tím zvýšení životnosti PVDF senzoru. Plocha pro přilepení PVDF senzoru byla zdrsněna brusnými papíry. V tomto návrhu byl PVDF senzor zkrácen na rozměr  $1.5 \times 16$  mm a přilepen přímo na plochu připravenou pro senzor v díře disku. Izolování řezu PVDF senzoru od disku bylo řešeno nanesením tenké vrstvy kyanoakrylátového lepidla na místo řezu. Vývody PVDF senzoru byly izolovány bužírkou, na nýty byla nanesena vrstva kyanoakrylátového lepidla a metalizace na spodní straně PVDF senzoru byla zakryta přilepenou izolační páskou Kapton tape 70 AC. Proces přípravy disku sestával ze tří kroků. Nejdříve byl přilepen PVDF senzor na plochu disku pomocí kyanoakrylátového lepidla Loctite Power Flex Gel, následně byly zality díry pro vodiče a prostor mezi dnem oválné díry a plochou pro PVDF senzor epoxidovým lepidlem Bison Epoxy 5 min. Posledním krokem bylo vytvoření ochranné vrstvy senzoru pomocí epoxidového lepidla. Již dříve bylo zjištěno, že během vytvrzování lepidla dochází k jeho smrštění a souvisejícímu zvlnění povrchu. Vyplňování díry epoxidovým lepidlem proto bylo rozděleno na dva kroky s tím, že vrchní vrstva lepidla byla vytvořena s přesahem nad plochu disku. Po vytvrzení byla přesahující část seříznuta nožovou planžetou, zabroušena, postupně zaleštěna lapovacím papírem SIA 3/0 a pak SIA 6/0. Následně byla zaleštěná plocha přetažena tenkou vrstvou kyanoakrylátového lepidla Loctite Power Flex Gel, neboť po odříznutí mohly být odkryty malé bubliny, případně mohlo dojít ke vzniku nepatrných rýh od zaleštění.



Obrázek 6.19: Nový návrh geometrie

Současně byl testován vliv tloušťky ochranné vrstvy PVDF senzoru na velikost jeho citlivosti. Pro tento účel byly vyrobeny další dva disky pro čtvrtou pozici s různými tloušťkami ochranné vrstvy lepidla, a to tloušťky 1,5 mm a 2 mm. V dírách disků byl přilepen průmyslově vyráběný PVDF senzor. Testování probíhalo pomocí kalibrační metody pádu kuličky s pěti různými kuličkami o hmotnostech 0,440 g; 0,700 g; 1,046 g; 1,398 g; 2,040 g a o počáteční pozici kuličky ve výšce 400 mm nad PVDF senzorem. Pro každou kuličku bylo provedeno 5 měření. Měřicí sestava a zpracování bylo obdobné jako při vlastní kalibraci. Výsledkem testování jsou citlivosti senzorů 0,02 V·N<sup>-1</sup> pro vrstvu tloušťky 1 mm, 0,018 V·N<sup>-1</sup> pro vrstvu tloušťky 1,5 mm a 0,016 V·N<sup>-1</sup> pro vrstvu tloušťky 2 mm a platí, že se zvětšující se tloušťkou ochranné vrstvy lepidla se zmenšuje hodnota citlivosti. Překreslené kalibrační přímky pro různou tloušťku lepidla jsou na obrázku 6.20, kde je uvedena závislost vygenerovaného maximálního elektrického napětí  $U_{max}$  na maximální působící síle  $F_{max}$ .



Obrázek 6.20: Překreslené kalibrační přímky pro různou tloušťku ochranné vrstvy lepidla

Následovalo testování návrhu pro režimy do 25 bar. Při testování nenastaly žádné problémy, ani nedocházelo k poškození při dlouhodobých testech. Návrh byl považován za finální. Bylo otestováno, že pro využití rozsahu měření osciloskopické karty, a tím získání lepšího záznamu signálu, vyhovuje největší citlivost při tloušťce ochranné vrstvy 1 mm. Zvolená tloušťka zároveň dostatečně vyhovuje požadavku na zabezpečení ochrany senzoru. Po těchto testech bylo vyrobeno 6 disků totožné geometrie díry s ochrannou vrstvou 1 mm pro ostatní měřené pozice. Rovněž byl vyroben disk s dírou pro senzor pro měření přes všechny pozice současně a ochrannou vrstvou 1 mm. Popsané je názorně vidět na obrázku 6.21.



Obrázek 6.21: Disk s dírou zahrnující všechny oblasti a disky pro měření na jednotlivých oblastech
# Kapitola 7

# Měření kavitačního účinku PVDF senzory

V předchozí kapitole byla prezentována řada testovacích měření, jejichž výsledkem byl finální návrh hlavního experimentu této disertační práce. Sedmá kapitola již přináší detailnější informace o provedeném experimentu, jeho nastavení a o záznamu signálu. Dále jsou zde uvedeny dvě metody vyhodnocení signálu, kdy druhá metoda byla navržena pro účely této disertační práce. Výsledky obou metod jsou zpracovány do formy kumulovaných spekter. Kumulovaná spektra jsou základním prostředkem pro hodnocení účinku od kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v kavitačním tunelu, v případě sedmé kapitoly měřeného pomocí PVDF senzorů. Na základě získaných kumulovaných spekter byla hodnocena průměrná maximální síla, počty pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil a vliv rychlosti proudění na kavitační agresivitu. V závěru kapitoly je uvedena analýza, porovnávající měření na jednotlivých pozicích a přes všechny pozice současně.

## 7.1 Experimentální sestava a nastavení

Schéma měření a kompletní experimentální sestava je prezentována na obrázku 7.1. Levá část obrázku představuje řez testovací sekcí kavitačního tunelu se vznikající kavitační strukturou a vyznačenou oblastí eroze, která je rozdělena na sedm proměřovaných podoblastí. Střední část obrázku ukazuje detail řezu diskem a umístění PVDF senzoru jedné z pozic. Pravá část obrázku představuje měřicí řetězec. Vývody PVDF senzoru jsou připojeny přímo na vstupy měřicí karty osciloskopu NI PXIe-5105 v PXI šasí. Osciloskop je připojen k počítači, ze kterého je měření ovládáno pomocí virtuálního měřicího přístroje v programu LabVIEW. Všechny části experimentální sestavy jsou uzemněny.



Obrázek 7.1: Experimentální sestava

Na základě provedeného testování ve vysokorychlostním kavitačním tunelu, hlavního tématu předchozí kapitoly, bylo rozhodnuto provádět měření na sedmi radiálních pozicích (mezi poloměry 20 - 30,5 mm) pro šest provozních režimů kavitačního tunelu. Měřené režimy jsou uvedeny v tabulce 7.1. Režimy představující více agresivní kavitační podmínky, tj. režimy o tlaku na vstupu 30, 35 a 40 bar nebyly vybrány, aby nedošlo při měření k poškození senzoru. U každého z vybraných provozních režimů je dosaženo kavitačního čísla  $\sigma = 0.9$ , ze kterého plyne totožná radiální pozice kolapsu kavitačního mraku. Ve vysokorychlostním kavitačním tunelu byla použita kohoutková voda bez dalších úprav o teplotě v rozsahu 20 °C ± 1 °C, zajištěné výměníkem tepla.

Rychlost proudění v testovací sekci	Tlak na vstupu	Rozsah měřených elektrických napětí	Vzorkovací frekvence	Doba záznamu
[m.s <sup>-1</sup> ]	[bar]	[V]	[MS.s <sup>-1</sup> ]	[s]
22	2,41	8	60	15
34	5,8	8	60	10
44,7	10	15	60	10
54,8	15	15	60	5
63,2	20	25	60	5
70,7	25	25	60	5

Tabulka 7.1: Měřené režimy

Příprava měření sestávala z vložení disku do držáku v kavitačním tunelu, tlakování kavitačního tunelu inertním dusíkem (pro zajištění konstantního kavitačního čísla), zaplavení kavitačního tunelu, vypuštění nahromaděného vzduchu a rozběhu tunelu. Před každým vlastním měřením bylo provedeno kontrolní měření při proudění kapaliny, ale při bezkavitačním režimu. Účelem bylo potvrdit, že hladina elektrického napětí senzoru je v blízkosti nulové hodnoty a že je senzor zatížen pouze šumem. Záznam z měření při bezkavitačním režimu na druhé měřené pozici je na obrázku 7.2. Elektrické napětí měřené při tomto bezkavitačním režimu představuje šum od okolí, hlavně pak od pohonu čerpadla.



Obrázek 7.2: Kontrolní měření při bezkavitačním režimu

Elektrické napětí PVDF senzoru bylo měřeno osmikanálovou dvanáctibitovou osciloskopickou kartou NI PXie-510, řízenou virtuálním přístrojem v programu LabVIEW ze stolního počítače. Ve všech případech byla použita nejvyšší možná vzorkovací frekvence  $f_{vz} = 60 \text{ MS} \cdot \text{s}^{-1}$  (jednotka  $\text{MS} \cdot \text{s}^{-1}$  odpovídá jednotce MHz, tj. vzorkovací frekvenci milion vzorků za sekundu) pro co nejpodrobnější následnou analýzu signálu. Doba záznamu byla volena na základě doby záznamu testovacích měření. Potvrdily totiž předpoklad, že s vyšší agresivitou roste frekvence kolapsů na PVDF senzor. Potom platí, že pro agresivnější režimy postačuje kratší záznam. Doba záznamu se zkracovala s rostoucí kavitační agresivitou provozního režimu. Výhodou kratšího záznamu bylo rovněž nižší riziko poškození PVDF senzoru. Naopak u méně agresivních režimů bylo nutné volit delší dobu záznamu, protože při těchto režimech dochází k menší frekvenci kolapsů.

Vlastní měření trvalo déle než doba záznamu. Práce s daty a hlavně pak jejich ukládání je časově velmi náročné. Naměřený signál byl ukládán do souborů datových typů vhodných pro vysokorychlostní ukládání náročných dat. V počátcích měření byl používán binární formát HWS (HDF5 formát dat) a později následovnický formát TDMS (Technical Data Management Streaming formát navržený pro platformy National Instruments). Na základě testování doby práce s daty a jejich ukládání bylo rozhodnuto provádět záznam o délce 1 milion vzorků, což při vzorkovací frekvenci 60 MS·s<sup>-1</sup> činí dobu záznamu 0,1 s. Tato velikost je uspokojivá jak z hlediska doby práce s daty a jejich ukládání, tak i z hlediska následného zpracování a vyhodnocení. Velikost jednoho souboru v TDMS formátu je okolo 38 MB. Pro představu, celkový čas pro akvizici a uložení jednoho souboru v počítači činí cca 9 sekund, což při měření všech provozních režimů, daných následující tabulkou pro jeden senzor, představuje časové rozmezí 75 – 90 minut. Z uvedeného plyne, že naměřená a následně zpracovaná data jsou



tvořena na sebe nenavazujícími úseky elementárních záznamů signálu, jak je znázorněno na obrázku 7.3.

Obrázek 7.3: Význam naměřených dat

# 7.2 Zpracování signálu z měření

Zpracování signálu z měření bylo provedeno v programu Matlab. Bylo proto nutné transformovat data z formátu TDMS do formátu MAT, vhodného pro práci v Matlabu. Práce v Matlabu je s tímto formátem výhodnější než s textovým souborem. Byly užity dvě metody této transformace. První metoda spočívala v převodu dat z původního formátu na text v LabVIEW a následným převodem na formát MAT. Druhá metoda spočívala v použití programu ConvertTDMS (Humphreys, 2017), volně dostupného na stránkách podpory Matlabu. Jednotlivé kroky zpracování, včetně analýzy signálu, budou vysvětleny na režimu, uvedeném na pátém řádku předchozí tabulky (režim 20 bar) a pro senzor na pozici č. 3. Nezpracovaný záznam odpovídajícího signálu je na obrázku 7.4. Jedná se o typickou časovou závislost měřeného elektrického napětí U na PVDF senzoru, jehož průběh odpovídá působení kavitačních jevů pro uvedený režim. Jednotlivé účinky, které se během měření udály a působily na PVDF senzor, jsou reprezentovány vrcholy, které označujeme jako pulzy, nebo jejich uskupením. V tomto grafu je již zavedena časová osa, kterou ale surová data z měření neobsahují. Časová osa byla jednoduše doplněna na základě znalosti vzorkovací frekvence a délky záznamu (počtu vzorků). Zde prezentovaný záznam zároveň představuje pouze polovinu z původního signálu trvajícího 0,1 s, tj. záznamu trvajícího pouze 0,05 s. Dodatečně bylo zjištěno, že pro efektivnější práci s daty v Matlabu je lepší pracovat s poloviční délkou záznamu signálu.



Obrázek 7.4: Závislost el. napětí měřeného na PVDF senzoru na čase (režim 20 bar, pozice č. 3)

Nejdříve byl signál předzpracován. První zvažovanou úpravou předzpracování bylo odečtení základní nosné vlny signálu, na které byly superponovány jednotlivé pulzy. Nosná vlna alternovala pro každý režim mezi různými hodnotami. Pro režim 20 bar, uvedený na obrázku 7.4, se jednalo přibližně o alternaci mezi hodnotami elektrického napětí  $\pm$  0,3 V. Z hlediska velkých pulzů se tak jednalo o zlomek jejich amplitudy. Pro menší pulzy se význam zvětšoval. Tato úprava nakonec nebyla provedena, neboť v důsledku velkého množství tvarů pulzů nebylo možné použít automatické nalezení nosné vlny, které nabízí Matlab jako funkci, ale ani vlastní program založený na Savitzskyho-Golayově metodě (princip metody je vysvětlen v rámci další úpravy signálu). Počátky pulzů se ale nacházely v blízkosti nulových napětí (většinou mírně nad, jak je vidět na následujícím obrázku) a vznikající chyba proto nebyla považována za významnou. Základní nosná vlna pravděpodobně vyjadřuje děj za hranou trysky testovací sekce. Při vzniku struktury za hranou trysky kavitačního tunelu je okolní tekutina urychlována a v oblasti PVDF filmu je zaznamenán pokles tlaku. Následuje odtržení struktury dříve popsaným mechanismem a její pohyb směrem k senzoru s vyrovnáním tlaků, pak její kolaps v blízkosti nulového elektrického napětí a nárůst tlaku v důsledku zpomalení proudění tekutiny po kolapsu, s případnými účinky druhých, či dalších kolapsů. Tento děj oproti kolapsům trvá výrazně déle a neovlivní tak jiné parametry pulzů než jejich amplitudy. Signál rovněž nebylo možné efektivně filtrovat. Sice byly testovány návrhy některých frekvenčních filtrů, ale vhodný filtr nebyl nalezen. Problémem například bylo, že charakter pulzů v signálu se blíží Diracovu impulzu a ten je tvořen spektrem všech frekvencí. Při filtrování je tedy vždy určité spektrum frekvencí odfiltrováno a pulzy tak jsou ovlivněny. Některé filtry způsobovaly navíc fázový posun frekvenčních složek a docházelo k velmi výrazným změnám v hodnotách amplitud pulzů. Problém filtrování byl diskutován s kolegy na FM TUL, ale nebylo dosaženo uspokojivého návrhu frekvenčního filtru. Proto nebyl žádný frekvenční filtr na signál aplikován. První provedenou úpravou signálu byla aplikace Savitzkyho-Golayova filtru s cílem vyhlazení tvaru signálu. Nástroje Matlabu pro

hledání vrcholu pulzu pracují s vyhlazeným signálem lépe. Savitzkyho-Golayův filtr je v Matlabu reprezentován funkcí sgolavfilt (soubor dat, stupeň aproximační funkce, velikost subintervalu), jejíž proměnné jsou uvedeny v závorce. Jedná se o metodu používanou pro vyhlazení signálu, jinými slovy pro odstranění šumu ze signálu, odvozené Savitzkym a Golayem (1964). Metoda spočívá v aproximaci subintervalů signálu s centrálním bodem aproximačními funkcemi určitého stupně a následným nalezením hodnot těchto funkcí v centrálním bodě, kterými je původní hodnota signálu nahrazena. Zároveň je důležité udělat rozvahu o tom, jaký stupeň aproximační funkce je vhodné použít. Pokud je zvolen malý stupeň, nebude tato aproximační funkce dostatečně vystihovat průběh naměřených hodnot. Pokud je zvolen naopak příliš velký stupeň polynomu, bude se aproximační funkce příliš shodovat s původními hodnotami signálu a filtrovaný signál nebude vyhlazen. Dále je důležité zvážit velikost vybraného intervalu dat s centrálním bodem. Velikost tohoto intervalu totiž do značné míry ovlivňuje výsledný tvar aproximační funkce a následně pak i kvalitu vyhlazení signálu. Nastavení těchto koeficientů bylo založeno na testování metody na mnoha signálech a vizuálním posouzení výsledku vyhlazení. Při vyhlazení byl použit třetí stupeň aproximační funkce a velikost subintervalu 11 vzorků. Na obrázku 7.5 je ukázka části signálu, obsahujícího pulz a vrchol tohoto pulzu před filtrování Savitzkym-Golayovým filtrem modrou barvou, a po filtrování Savitzkym-Golayovým filtrem oranžovou barvou. Z globálního pohledu na signál na levé části obrázku vidíme, že nedošlo k jeho výrazné změně. Na pravé části je detail levého vrcholu pulzu před a po aplikaci Savitzkyho-Golayova filtru. Ztráta elektrického napětí filtrováním, týkající se vrcholu pulzu, je zanedbatelná.



**Obrázek 7.5:** Savitzkyho-Golayův filtr aplikovaný na vybranou část signálu a detail vrchní části levého pulzu před a po filtrování

Následovala fáze zpracování signálu, kdy bylo hlavním úkolem nalezení jednotlivých pulzů a jejich parametrů. Vyhledání pulzů bylo provedeno pomocí funkce findpeaks v Matlabu, jejíž proměnné a parametry budou uvedeny v závorce. Funkce má obecný tvar výrazně širší (je možné

využít řadu speciálních doplňků funkce), ale zde je uveden již zkrácený tvar *findpeaks (soubor dat; vzorkovací frekvence; parametry algoritmu vyhodnocení: číselná hodnota minimální vzdálenosti mezi pulzy, číselná hodnota minimální velikosti pulzu, číselná hodnota minimá prominence).* Parametry funkce, využité v této práci, budou popsány podrobněji. Prvním parametrem byla minimální vzdálenost mezi pulzy. Využitím tohoto parametru se lze vyvarovat multiplikativnímu započítání téhož pulzu. Pokud je totiž nalezen hlavní vrchol pulzu, mohla by funkce findpeaks na jeho sestupné části nalézt méně výrazný vrchol pulzu, který nepovažujeme za samostatný pulz, ale pouze za pulz superponovaný na hlavní pulz. Po nalezení hlavního pulzu potom funkce findpeaks neregistruje další pulzy po dobu nastavenou tímto parametrem. Ve všech případech byla nastavena minimální vzdálenosti mezi pulzy 10 µs. Volba této hodnoty vycházela ze zkušenosti se zpracováním signálu. Na obrázku 7.6 je ukázka pulzu s nalezeným hlavním vrcholem označeným červeným kroužkem. Další vrcholy, označené zelenými kroužky, by byly vybrány v případě nenastavení diskutovaného parametru, nebo pokud by jeho hodnota byla velmi malá.



Obrázek 7.6: Význam nastavení minimálního času mezi pulzy (hlavní pulz je v červeném kroužku)

Druhým parametrem byla minimální velikost pulzu, která odpovídá minimální hladině elektrického napětí, nad kterou je pulz funkcí findpeaks vyhledáván. Použitím tohoto parametru se zamezí nalezení pulzů odpovídajících elektronickému šumu a případně nosné vlně signálu, jejichž původcem není kolaps kavitační struktury. Zdrojem elektronického šumu může být libovolná elektronická součástka, měnič pohonu čerpadla kavitačního tunelu apod. Zároveň se volbou diskutovaného parametru dosáhne další výhody. Pulzy se často vyskytují ve formě shluků, kdy hlavní nejvýraznější pulz je obklopen celou řadou dalších menších pulzů. V určitých případech se potom může stát, že funkce findpeaks nalezne pulz nízké úrovně elektrického napětí, předcházející hlavní pulz a v důsledku nastaveného minimálního času mezi pulzy pak následně

nenalezne pulz významnější úrovně elektrického napětí. Ale právě tyto výrazné pulzy jsou více důležité než pulzy nízké úrovně elektrického napětí, protože je pokládáme za původce kavitačního poškození. Zároveň lze konstatovat, že pulzů nízké úrovně elektrického napětí je v signálu obsaženo velké množství a práce s nimi významně zatěžuje proces zpracování. Nastavení minimální velikosti pulzu tak pomáhá optimalizaci zpracování. Ukázka typického elektronického šumu (rušivé složky signálu) superponovaného na nosnou vlnu signálu, kolísajícího mezi hodnotami elektrického napětí ± 0,2 V, je na levé části obrázku 7.7. Na pravé straně téhož obrázku je ukázán vliv velikosti nastavení minimální velikosti pulzu. Na základě průběhu nosné vlny a elektrického šumu pro daný provozní režim kavitačního tunelu byla určena základní hladina minimální velikosti pulzu. Pro uvedený případ se uvažovala její hodnota 0,2 V. Tato hodnota byla navíc povýšena na úroveň zamezující možnosti výběru jiného, než hlavního pulzu. Pro tentýž případ se uvažovala hodnota 0,8 V. Základní a povýšená hladina jsou zobrazeny čárkovanou čarou, základní hnědě a povýšená pak zeleně. Na základě volby těchto hladin nebyly funkcí findpeaks při zpracování vybrány pulzy označené kroužkem odpovídající barvy. Jediný správný nalezený pulz je označen červeným kroužkem.



Obrázek 7.7: Šum a nosná vlna signálu a určení hladiny nastavení minimální velikosti pulzu

Vyhodnocení naměřených signálů bylo provedeno dvěma metodami, které budou okomentovány v dalších oddílech. Pro každou metodu byl vytvořen program v Matlabu, který automaticky zpracoval sérii záznamů pro celé spektrum proměřovaných pozic a provozních režimů vysokorychlostního kavitačního tunelu. Programy byly vedle již zde popsaných funkcí tvořeny pomocí dalších základních příkazů a funkcí. Programy nejsou v disertační práci uvedeny.

## 7.3 Vyhodnocení maxim sil signálu (metoda vyhodnocení A)

#### 7.3.1 Metoda vyhodnocení

Základní a nejjednodušší metodou, používanou při vyhodnocení signálu obsahujícího pulzy, je nalezení maxim pulzů, odpovídajících amplitudě pulzů a jejich následné zpracování (Okada et al., 1995; Hattori et al., 2010; Franc et al., 2011). Maxima pulzů jsou totiž v signálu, oproti jejich začátkům či koncům, velmi dobře rozpoznatelná. V případě této práce se jednalo o automatické zpracování signálu funkcí findpeaks s nalezením hodnot maxim pulzů, obsažených v signálu. V dalším textu může být tato metoda označována za metodu vyhodnocení A a maxima (amplitudy) pulzů jako maxima sil.

Pro vyhodnocení metodou A byl v Matlabu vytvořen program. V úvodní části programu byla definována minimální vzdálenost mezi pulzy a minimální velikost pulzu pro měřený režim (daný tlakem). Minimální vzdálenost mezi pulzy byla pro všechny měřené režimy volena totožná 0.00001 s (10 µs) a minimální velikost pulzu byla volena na základě vizuálního posouzení některých signálů měřených režimů, jak je uvedeno v tabulce 7.2.

Režim (určený tlakem)	Minimální vzdálenost pulzů	Minimální výška pulzu [V]	
[bar]	[µs]		
2,4		0.15	
5,8		0.25	
10	10	0.40	
15	10	0.50	
20		0.65	
25		0.80	

Tabulka 7.2: Parametry vyhodnocení metodou A

Ukázka vyhodnoceného signálu je na obrázku 7.8. Jedná se o graf na obrázku 7.4, tj. pro režim 20 bar a pozici číslo 3, zde již ale doplněný o nalezená maxima pulzů.



Obrázek 7.8: Vyhodnocený záznam signálu pro režim 20 bar a pozici č.3 s nalezenými maximy pulzů

#### 7.3.2 Kumulovaná spektra

Výstupem vyhodnocení byly pouze hodnoty maxim pulzů elektrických napětí, které se následně při znalosti citlivosti jednotlivých senzorů převedly na hodnoty maxim sil. Pro zpracování maxim pulzů byly vytvořeny další dva programy v Matlabu, jejichž výstupem byla spektra maxim sil pro každý provozní režim testovacího zařízení. Spektra maxim sil byla následně převedena do formy jejich kumulovaných spekter, normalizovaných na jednotku činné plochy senzoru a jednotku času. Činná plocha senzorů byla zjištěna ze zvětšeniny jejich fotografií. Doby testu byly voleny před provedením měření a jsou uvedeny v úvodním oddílu této kapitoly. V dalším textu této práce jsou už uvažována pouze kumulovaná spektra. Ukázka kumulovaných spekter maxim sil pro PVDF senzor umístěný na pozici č. 3 a různé provozní režimy vysokorychlostního kavitačního tunelu je na obrázku 7.9. Ukázka kumulovaných spekter maxim sil různých pozic PVDF senzoru pro režim 10 bar jsou na obrázku 7.10. Grafy zobrazují závislost kumulovaného počtu pulzů za sekundu na ploše jednoho centimetru čtverečního  $n_A$  na velikosti maximální působící impaktní síly  $F_{max,A}$ . Kumulovaný počet pulzů za sekundu na ploše jednoho centimetru čtverečního  $n_A$  je ekvivalentní plošné frekvenci pulzů. Je vhodné zdůraznit, že svislá osa je logaritmická a počátky spekter na nízkých úrovních maximálních sil začínají na hodnotách maximálních sil, odpovídajících nastavení parametru minimální výšky pulzu při vyhodnocení. Získaná kumulovaná spektra jsou z hlediska kvantity pulzů a naměřené síly porovnatelná s výsledky Franca et al. (2011), které jsou uvedeny na obrázku 4.10. Detailní komparace nebyla provedena z důvodu některých odlišností obou měření (pozice senzoru a jeho velikost, nastavení vyhodnocení apod.).



**Obrázek 7.9:** Kumulovaná spektra maxim sil pro pozici PVDF senzoru č. 3 a různé režimy dané tlakem před testovací sekcí vysokorychlostního kavitačního tunelu



Obrázek 7.10: Kumulovaná spektra maxim sil pro režim 10 bar a různé pozice PVDF senzoru

Ze získaných kumulovaných spekter plyne, že naměřená maximální síla roste s rostoucím tlakem před testovací sekcí a tedy i rostoucí rychlosti proudění. Dále platí, že počet naměřených maxim sil roste s rostoucí rychlostí proudění. Střední části kumulovaných spekter jsou v logaritmicko-lineární stupnici os lineární, což odpovídá exponenciální závislosti. Části kumulovaných spekter nízkých hodnot maximálních sil narůstají rychleji, než by předpokládala exponenciální závislost střední části kumulovaných spekter. Části kumulovaných spekter vysokých hodnot maximálních sil umožňují predikovat jejich maximální hodnotu. Uvedené závěry platí obecně pro všechny proměřené režimy a pozice.

#### 7.3.3 Průměrná maximální síla

Průměrná maximální síla  $F_{max,stř,A}$  je určována z voleného počtu maximálních sil, tvořících konec kumulovaných spekter na vysokých hodnotách maximálních sil. V našem případě bylo vyhodnoceno 10 koncových hodnot kumulovaných spekter. Vyhodnocované hodnoty maximálních sil pro 3. pozici a režim 5,8 bar jsou vyznačeny oválem na obrázku 7.9. Střední hodnota maximální síly je v tomto vzorovém případě 120 N. Závislost průměrné maximální síly z posledních 10 koncových hodnot kumulovaných spekter na provozním režimu pro různé pozice je na obrázku 7.11. Závislost průměrné maximální síly z posledních 10 koncových hodnot kumulovaných spekter na radiální pozici od středu testovacího disku pro různé provozní režimy je na obrázku 7.12.



**Obrázek 7.11:** Závislost průměrné maximální síly z posledních 10 koncových hodnot kumulovaných spekter na provozním režimu pro různé pozice



**Obrázek 7.12:** Závislost průměrné maximální síly z posledních 10 koncových hodnot kumulovaných spekter na radiální pozici (pozici PVDF senzoru) pro různé provozní režimy

Z grafů na obrázcích 7.11 a 7.12 plyne, že s rostoucí rychlostí proudění (tlakem před testovací sekcí testovacího zařízení) roste průměrná maximální síla na všech pozicích. Z grafu na obrázku 7.12 zároveň vyplývá, že s rostoucí rychlostí proudění dochází k nejvýraznějšímu nárůstu průměrné maximální síly na třetí pozici, kde vidíme vrchol spojnicově vyjádřené závislosti.

#### 7.3.4 Vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil

Bylo navrženo analyzovat kumulovaná spektra vyhodnocením jejich hodnot pro vybrané úrovně maximálních sil. Pro jednotlivé režimy byly vybírány úrovně maximálních sil v lineárních částech kumulovaných spekter a to od konce spekter, tj. od velkých maximálních sil. Při volbě těchto úrovní bylo nutné respektovat provozní režim, protože např. kumulované spektrum režimu 2,41 bar dosahuje maximálních sil jen 50 N, kdežto pro režim 25 bar maximálních sil až 350 N. Ukázka principu vyhodnocení pro režim 10 bar a 3. pozici je na obrázku 7.10. Pro volenou úroveň maximální síly 75 N bylo senzorem na třetí pozici zaznamenáno 351 pulzů.

Výsledky této analýzy jsou na obrázku 7.13, kde pro jednotlivé testované provozní režimy kavitačního tunelu vidíme závislosti počtu pulzů na vzdálenosti od středu testovacího disku (na pozici PVDF senzoru) pro různé úrovně maximálních sil. Výsledek vzorového vyhodnocení pro režim 10 bar, 3. pozici a pro úroveň maximální síly 75 N je vyznačen kroužkem zelené barvy. Vidíme, že pro režimy 2,4 bar - 10 bar je nejvíce pulzů vybraných úrovní maximálních sil naměřeno na třetí pozici. Pro režim 15 bar pak vidíme přibližování počtu pulzů druhé a třetí pozice a následně výrazný nárůst pulzů na druhé pozici pro režimy 20 bar - 25 bar. U režimu 25 bar je zaznamenán výrazný propad počtu pulzů na všech úrovních maximální síly pro pátou pozici.



Obrázek 7.13: Počet pulzů při dané úrovni maximální síly

#### 7.3.5 Vyšetřování vlivu rychlosti proudění na kavitační agresivitu

Franc et al. (2011) vyhodnotili kumulovaná spektra hodnocením parametrů jejich fitu. Metoda vyplynula z podobnosti kumulovaných spekter exponenciální závislosti, kdy byla jednotlivá kumulovaná spektra fitována exponenciální funkcí ve tvaru:

$$n_A = n^*_A \cdot e^{-\frac{F_{max,A}}{F_A^*}}.$$
 (7.1)

Cílem bylo naleznout dva referenční parametry  $n_A^*$  a  $F_A^*$ , které popisují jednotlivá kumulovaná spektra a tak i agresivitu odpovídajících režimů. Význam parametru  $n_A^*$  si lze představit jako charakteristickou frekvenci pulzů a parametr  $F_A^*$  pak jako charakteristickou maximální sílu. Fitování bylo provedeno pouze pro lineární části spekter tak, že bylo zanedbáno prvních 50 a posledních 20 bodů spekter. Pro režim 2,4 bar bylo zanedbáno pouze prvních 10 a posledních 5 bodů spektra a pro režim 5,8 bar bylo zanedbáno prvních 30 a posledních 15 bodů spektra, protože obsahují menší počet maxim pulzů. Fitování exponenciálních funkcí na kumulovaná spektra jednotlivých pozic pro režim 20 bar je ukázáno v grafu na obrázku 7.14. Kumulovaná spektra jednotlivých pozic jsou vyznačena kroužky a jím barevně odpovídající fity jsou vyznačeny přímkami tvořenými tečkami.



Obrázek 7.14: Fitování spekter všech pozic režimu 20 bar

Při znalosti referenčních parametrů lze kumulovaná spektra vyjádřit rovněž bezrozměrně, jako závislost  $n_A / n_A^*$  na  $F_{max,A} / F_A^*$ . Bezrozměrná kumulovaná spektra všech pozic jsou pak přeložena přes sebe. Ukázka bezrozměrných kumulovaných spekter pro režim 25 bar je v grafu na obrázku 7.15.



Obrázek 7.15: Bezrozměrná kumulovaná spektra pro režim 25 bar

V grafech na obrázku 7.16 jsou uvedeny referenční parametry fitů pro různé pozice PVDF senzoru a pro režimy určené rychlosti proudění  $v_{cav}$ . Označení režimů pomocí rychlosti proudění odpovídá tlakovému značení režimů (viz tab. 7.1). V případě označení režimů rychlostí proudění lze totiž vyšetřovat vliv rychlosti proudění na hodnocenou vlastnost.





Grafy potvrzují, že s rostoucí rychlostí proudění roste počet pulzů a jejich maximum. Dále je zřejmé, že s rostoucí rychlostí proudění roste význam hodnoty parametru  $n_A^*$  nejvíce na šesté pozici PVDF senzoru. Největších hodnot parametru  $F_A^*$  při nízkých rychlostech proudění je

dosaženo na třetí pozici. S rostoucí rychlostí dochází k přesunu maxima parametru  $F_{A}^{*}$  na druhou pozici.

Referenční parametry  $n_{A}^{*}$  a  $F_{A}^{*}$  mohou být vyneseny do grafu v závislosti na rychlosti proudění, což přináší informaci o vlivu rychlosti proudění  $v_{cav}$  na agresivitu (účinek) kavitace generované podmínkami proudění. Závislosti parametrů  $n_{A}^{*}$  a  $F_{A}^{*}$  pro šestou pozici PVDF senzoru jsou zřejmé v grafech na obrázku 7.17. Jedná se o lineární závislost, která vychází rovněž pro další testované pozice. Zjištěná lineární závislost potvrzuje práci Lecoffra et al. (1985), kteří studovali teorii podobnosti kumulovaných spekter. Význam změny rychlosti proudění v grafu kumulovaných spekter je dle této teorie následující. Při změně rychlosti proudění lze odhadnout novou pozici kumulovaného spektra na základě jejího posunu v jednotlivých osách. Posuv v horizontální ose představuje nárůst působící maximální síly odpovídající účinku vodního rázu, tj. nárůstu tlaku, který je v lineární vazbě s rychlostí proudění  $v_{cav}$  dle následujícího vztahu:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_{cav} \,, \tag{7.2}$$

kde $\rho$  je hustota kapaliny a c je rychlost zvuku v kapalině.

Posuv ve vertikální ose představuje nárůst počtu vznikajících a následně kolabujících bublin na základě vztahu pro Strouhalovo číslo:

$$St = \frac{f \cdot l_{cav}}{v_{cav}} = const. , \qquad (7.3)$$

kde f je frekvence vzniku kavitačních bublin a  $l_{cav}$  je délka kavitační struktury. Vyjádřením frekvence ze vztahu 7.3 lze získat vztah:

$$f = const. \quad \cdot \frac{v_{cav}}{l_{cav}} , \qquad (7.4)$$

který pro konstantní délku kavitační struktury taktéž představuje lineární vazbu s rychlostí proudění  $v_{cav}$ . Již dříve bylo řečeno, že kavitační číslo  $\sigma$  určuje délku kavitační struktury  $l_{cav}$  před odtržením od hrany trysky kavitačního tunelu. Při experimentech v rámci této práce bylo kavitační číslo vždy nastaveno na hodnotu 0,9. Proto platí, že délka kavitačních struktur byla pro všechny režimy totožná. Pak by frekvence vzniku a následného kolapsu kavitačních bublin (frekvence pulzů) měla záviset pouze na rychlosti proudění a to lineárně, dle vztahu 7.4. Franc et al. (2011), ale ve své práci nalezli tyto závislosti mocninné, s exponentem 2,9 pro referenční frekvenci  $n^*$  a s exponentem 0,64 pro referenční sílu  $F^*$ . Výsledky uvedené v tomto oddílu odpovídají předchozí teorii Lecoffra et al. (1985). V grafech závislosti parametru  $n^*_A$  na rychlosti proudění pro třetí a šestou pozici na obrázku 7.17 vidíme, že referenční frekvence  $n^*_A$  je lineárně závislá na rychlosti proudění. Bez dalšího komentáře zároveň vidíme, že lineární fit sleduje výsledky lépe než fit mocninný. Obdobného závěru bylo dosaženo i pro závislost referenční síly na rychlosti proudění.



**Obrázek 7.17:** Závislosti referenčního parametru n<sup>\*</sup><sub>A</sub> na rychlosti proudění pro 3. a 6. pozici PVDF senzoru a ukázka mocninného a lineárního fitu této závislosti

Závislosti referenčních parametrů  $n_A^*$  a  $F_A^*$  na rychlosti proudění  $v_{cav}$  byly proto fitovány lineárními funkcemi ve tvaru:

$$n_A^* = a_A + b_A \cdot v_{cav} , \qquad (7.5)$$

a

$$F_A^* = c_A + d_A \cdot v_{cav} , \qquad (7.6)$$

kde  $a_A$ ,  $b_A$ ,  $c_A$  a  $d_A$  jsou parametry těchto fitovacích lineárních funkcí. Ukázka fitu referenčních parametrů pro čtvrtou pozici je na obrázku 7.18. Zjištěné parametry jsou uvedeny v tabulce 7.3. Z výsledku tohoto fitu plyne, že největší nárůst počtu impaktů při nárůstu rychlosti proudění je pro šestou pozici PVDF senzoru, konstanta  $b_A$  nabývá pro šestou pozici největší hodnoty. K největšímu nárůstu síly při nárůstu rychlosti proudění nastalo na druhé pozici PVDF senzoru, pro níž nabývá konstanta  $d_A$  fitu největší hodnoty.



**Obrázek 7.18:** Závislost referenčních parametrů n\*<sub>A</sub> a F\*<sub>A</sub> na rychlosti proudění pro 4. pozici PVDF senzoru

(a)				(b)			
Pozice PVDF senzoru	Konstanta fitu a <sub>A</sub>	Konstanta fitu b <sub>A</sub>		Pozice PVDF senzoru	Konstanta fitu c <sub>A</sub>	Konstanta fitu d <sub>A</sub>	
[-]	[pulzů/(s.cm <sup>2</sup> )]	[pulzů/(cm <sup>2</sup> .m)]		[-]	[N]	[N.s/m]	
1	-4507	274		1	-7.6	0.56	
2	-4197	277		2	-12.5	0.8	
3	-5192	283		3	-9.1	0.75	
4	-4997	281		4	-10	0.72	
5	-6494	338		5	-8.9	0.66	
6	-7487	373		6	-9.7	0.67	
7	-7749	357		7	-8.5	0.6	

**Tabulka 7.3:** Výsledky fitování parametrů  $n_A^*(a) a F_A^*(b)$ 

# 7.4 Vyhodnocení maxim sil při dekompozici signálu (metoda vyhodnocení B)

#### 7.4.1 Metoda vyhodnocení

Alternativní metoda vyhodnocení signálu (v dalším textu označovaná metodou vyhodnocení B) je založena na úvaze, že části signálu odpovídající účinku kolapsu jsou tvořeny větším počtem elementárních pulzů, které jsou na sebe superponovány a vizuálně tvoří dojem jednoho pulzu. Důvodem k této domněnce je široké spektrum tvarů pulzů, vyskytujících se v signálu. Méně často se v signálu vyskytuje samostatný pulz, který hladce nabíhá ve vrchol a následně hladce klesá. Ve většině případů se ale v signálu objevují shluky pulzů, v nichž jsou jasně rozeznatelné jednotlivé vrcholy. Tyto shluky jsou širší, než by se předpokládalo pro samostatný pulz. Na obrázku 7.19 jsou ukázky typických shluků pulzů. Jejich hlavní vrchol je vyznačen červeným kroužkem, další potenciální vrcholy jsou označeny zeleným kroužkem. Proto byla navržena metoda pro dekompozici vícečetného pulzu na jednotlivé pulzy.



Obrázek 7.19: Shluky pulzů s vyznačeným hlavním vrcholem a dalšími potenciálními vrcholy

Parametry metody vyhodnocení B byly shodné s parametry vyhodnocení metodou A. Pro obě metody tak platí hodnoty uvedené v tabulce 7.2. Při vyhodnocení metodou B byl navíc užit další parametr, který plyne z následujícího popisu metody a návrhu aproximační funkce. Prvním krokem vyhodnocení je nalezení hlavního vrcholu vícečetného pulzu a určení jeho parametrů. Zjištěné parametry se použijí pro nahrazení hlavního pulzu funkcí, která se odečte od vícečetného pulzu. Ve druhém kroku se vyhledá další vrchol vícečetného pulzu a obdobně se provede jeho odečtení od zbývající části vícečetného pulzu. V dalších krocích se postupuje obdobným

způsobem. Hledané parametry vychází z popisu funkce zvolené pro aproximaci pulzů signálu. V případě této práce byla volena Gaussova funkce, která je definována následovně:

$$f(x) = a_G \cdot e^{-\frac{(x-b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}},$$
(7.7)

kde  $a_G$  je hodnota maxima funkce (odpovídající amplitudě pulzu),  $b_G$  je posun centrální osy funkce v kladném směru horizontální osy a  $c_G$  je Gaussova RMS šířka funkce. Šířka Gaussovy funkce v polovině její výšky  $s_{50}$  (jedná se o tzv. FWHM hodnotu, tj. "full width at half maximum") je svázána s parametrem  $c_G$  dle následujícího vztahu:

$$s_{50} = FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot ln2} \cdot c_G \approx 2,35482 \cdot c_G. \tag{7.8}$$

Gaussova funkce s vyznačenými parametry je na obrázku 7.20.



Obrázek 7.20: Gaussova funkce s vyznačenými parametry

Pokud by bylo možné při známé hodnotě maxima pulzu a známé pozici pulzu určit jeho šířku v polovině výšky, lze jednoduše stanovit hodnotu parametru  $c_G$ . Parametr  $c_G$  pak dourčí Gaussovu aproximační funkci, která je odečtena od vícečetného pulzu. Problém může nastat v případě, kdy náběžná hrana následujícího pulzu začíná nad napěťovou úrovní v polovině hodnoty předcházejícího pulzu, jak je ukázáno na obrázku 7.21. Pro hlavní vrchol vyznačený červeným kroužkem je určena šířka pulzu v 50 % a 80 % napěťové hodnoty vrcholu. Je zřejmé, že šířka v 50 % není vhodná pro potřeby aproximace a je nutné hledat šířku na jiné úrovni elektrického napětí. Proto bylo rozhodnuto stanovovat šířku pulzu na hladině 80 % elektrického napětí jeho vrcholu. Šířka pulzu na úrovni 80 % elektrického napětí jeho maxima je proto dalším parametrem vyhodnocení.



Obrázek 7.21: Určení šířky v 50 % a 80 % napěťové hodnoty vcholu hlavního vrcholu

Závislost šířky Gaussovy funkce a parametru  $c_G$  ve vztahu 7.8 platí pro šířku  $s_{50}$ , určenou v polovině výšky Gaussovy funkce, tj. v 50 % její výšky. Pro potřeby vyhodnocení metodou B je šířka vyhledávána na napěťové hladině 80 % maxima pulzu a pak je nutné určovat parametr  $c_G$  ze šířky  $s_{80}$  v 80 % hodnoty maxima pulzu. Vztah mezi parametrem  $c_G$  a šířkou  $s_{80}$  není obecně znám a je nutné ho odvodit. Při odvození vyjdeme z obecného tvaru Gaussovy funkce:

$$f(x) = a_G \cdot e^{-\frac{(x-b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}},$$
(7.9)

ze které určíme hodnoty proměnné  $x_{80}$  v 80 % maxima funkce, tj. v 0,8  $\cdot f(x_{max})$  a řešíme rovnici:

$$0.8 \cdot f(x_{max}) = a_G \cdot e^{-\frac{(x_{80} - b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}}.$$
(7.10)

Funkce f(x) nabývá maxima  $f(x_{max})$  právě při splnění podmínky, že  $x_{max}$  je rovno  $b_G$ , proto:

$$f(x_{max}) = a_G \cdot e^{-\frac{(x_{max} - b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}} = a_G \cdot e^{-\frac{(b_G - b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}} = a_G \cdot 1$$
(7.11)

a potom po dosazení:

$$0.8 \cdot a_G = a_G \cdot e^{\frac{(x_{80} - b_G)^2}{2 \cdot c_G^2}}.$$
(7.12)

Jednoduchou úpravou připravíme rovnici:

$$e^{-\frac{(x_{80}-b_G)^2}{2\cdot c_G^2}} = \left(\frac{1}{0,8}\right)^{-1},\tag{7.13}$$

která nabývá po logaritmování tvaru:

$$-\frac{(x_{80}-b_G)^2}{2\cdot c_G^2} = \ln\left(\frac{1}{0.8}\right)^{-1}.$$
(7.14)

Několika dalšími úpravami:

$$-\frac{(x_{80} - b_G)^2}{2 \cdot c_G^2} = -\ln\left(\frac{1}{0.8}\right),\tag{7.15}$$

$$x_{80} = b_G + \sqrt{2 \cdot c_G^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.8}\right)}, \qquad (7.16)$$

je získána rovnice pro horizontální souřadnici bodů funkce ve výšce 80 % maximální hodnoty Gaussovy funkce:

$$x_{80_{1,2}} = b_G \pm c_G \cdot \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,8}\right)}.$$
(7.17)

Šířka Gaussovy funkce *s*80 je pak jednoduše dopočítána následovně:

$$s_{80} = x_{80_1} - x_{80_2} = b_G + c_G \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,8}\right)} - \left(b_G - c_G \cdot \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,8}\right)}\right).$$
(7.18)

A po úpravě získáme závislost šířky na parametru  $c_G$ :

$$s_{80} = 1,34 \cdot c_G, \tag{7.19}$$

ze kterého můžeme při znalosti šířky  $s_{80}$  stanovit parametr  $c_G$  Gaussovy funkce.

Vyhodnocení metodou B spočívá v nalezení hodnoty vrcholu pulzu (tj. parametru  $a_G$  Gaussovy funkce), jeho polohy vůči počátku záznamu (tj. parametru  $b_G$  Gaussovy funkce) a určení šířky  $s_{80}$ , ze které se dopočítá parametr  $c_G$  Gaussovy funkce. Pulz je následně aproximován Gaussovou funkcí a odečten od signálu. Obdobně se pracuje s dalšími pulzy. Ukázka odečtení prvního pulzu z vícečetného pulzu je na obrázku 7.22. Je zde vidět původní signál s vícečetným pulzem (modře) a oranžový a zelený pulz ve tvaru Gaussovy funkce, který byl od původního vícečetného pulzu odečten. Na základě testů metody bylo zjištěno, že vícečetné pulzy nejsou tvořeny více jak šesti potenciálními vrcholy. V průběhu testování metody bylo rovněž navrženo, aby se šířka pulzu neurčovala jako rozdíl pozic bodů pulzu v jeho 80 % na jeho náběžné a sestupné hraně, ale aby se určovala pouze polovina šířky s<sub>80</sub> jako rozdíl pozice vrcholu a bodu pulzu v jeho 80 % na náběžné hraně. Vedla k tomu domněnka, že sestupná hrana pulzu již může být ovlivněna dalšími

pulzy, které mohly být vybuzeny právě prvním kolapsem. Jinými slovy předpokládáme, že počátek dalších pulzu následuje až za dosaženým vrcholem prvního pulzu. První pulz je pak z uvedeného důvodu v sestupné části širší. Tento stav pravděpodobně nastal v případě vícečetného pulzu na levé části obrázku 7.22. Naopak na pravé části obrázku 7.22 je vidět, že Gaussova křivka nahrazuje pulz bez výraznější odchylky v jeho sestupné části.



Obrázek 7.22: Vícečetný pulz (modrý) a odečítaný pulz ve tvaru Gaussovy funkce (oranžový a zelený)



Obrázek 7.23: Signál a odpovídající nalezené vrcholy pulzů

Ukázka výsledku vyhodnocení pro polovinu záznamu je v grafu na obrázku 7.23. Na obrázku jsou vidět nalezené hodnoty vrcholů pulzu ve své pozici. Vrcholy pulzů nalezené v prvním vyhodnocení jsou vyznačeny modrým křížkem (343 pulzů), vrcholy pulzů nalezené po odečtení prvních pulzů jsou vyznačeny červenou tečkou (25 pulzů), stejným postupem získané vrcholy třetích pulzů jsou vyznačeny zelenou tečkou (14 pulzů), vrcholy čtvrtých pulzů jsou vyznačeny fialovou tečkou (10 pulzů), vrcholy pátých pulzů jsou vyznačeny černou tečkou (5 pulzů) a vrcholy šestých pulzů jsou vyznačeny žlutou tečkou (2 pulzy).

#### 7.4.2 Kumulovaná spektra

Výstupem vyhodnocení jsou hodnoty maxim pulzů elektrického napětí. Jejich zpracování proběhlo v týchž programech a stejným způsobem, jak bylo představeno v předchozím oddílu. Výstupem zpracování byla kumulovaná spektra maxim sil, normalizovaná na jednotku činné plochy senzoru a jednotku času. Ukázka kumulovaných spekter maxim sil pro PVDF senzor umístěný na pozici č. 3 a různé provozní režimy vysokorychlostního kavitačního tunelu je na obrázku 7.24. Ukázka kumulovaných spekter maxim sil různých pozic PVDF senzoru pro režim 10 bar jsou na obrázku 7.25. Grafy zobrazují závislost kumulovaného počtu pulzů za sekundu na ploše jednoho centimetru čtverečního  $n_B$  na velikosti maximální působící impaktní síly  $F_{max,B}$ . Je vhodné zdůraznit, že svislá osa je logaritmická a počátky spekter na nízkých úrovních maximálních sil začínají na hodnotách maximálních sil, odpovídajících nastavení parametru minimální výšky pulzu při vyhodnocení. Získaná kumulovaná spektra jsou porovnatelná s výsledky Franca et al. (2011), která jsou uvedena na obrázku 4.10. Detailní komparace nebyla provedena z důvodu některých odlišností obou měření (pozice senzoru a jeho velikost, nastavení vyhodnocení apod.).



**Obrázek 7.24:** Kumulovaná spektra maxim sil pro pozici PVDF senzoru č. 3 a různé režimy dané tlakem před testovací sekcí vysokorychlostního kavitačního tunelu



**Obrázek 7.25:** Kumulovaná spektra maxim sil pro režim 10 bar a různé pozice PVDF senzoru

Z kumulovaných spekter získaných na základě vyhodnocení metodou B plynou obdobné závěry jako ze zpracování metodou A. Závěry budou v tomto odstavci zopakovány. Platí, že naměřená maximální síla roste s rostoucím tlakem před testovací sekcí a tedy i rostoucí rychlosti proudění. Dále platí, že počet naměřených pulzů roste s rostoucí rychlostí proudění. Střední části spekter jsou v logaritmicko-lineární stupnici os lineární, což odpovídá exponenciální závislosti. Části spekter nízkých hodnot maximálních sil narůstají rychleji, než by předpokládala exponenciální závislost střední části spekter. Části spekter vysokých hodnot maximálních sil umožňují predikovat jejich maximální hodnotu. Uvedené závěry platí obecně pro všechny proměřené režimy a pozice. Ve výsledku vyhodnocení metodou B je patrný nárůst počtu maxim pulzů, kdy s klesající maximální silou se rozdíl mezi spektry zvětšuje. Tento závěr je zřejmý z obrázku 7.26, který ukazuje kumulovaná spektra vyhodnocená metodou A a B pro třetí pozici PVDF senzoru a režim 10 bar. Kumulované spektrum získané vyhodnocením metodou B je zobrazeno kroužky.



Obrázek 7.26: Kumulovaná spektra maxim sil pro režim 10 bar a metody vyhodnocení A a B

## 7.4.3 Průměrná maximální síla

Průměrná maximální síla  $F_{max,stř,B}$  byla určena stejným způsobem, jako v případě vyhodnocení metodou A, a to z 10 koncových hodnot spekter. Závislost průměrné maximální síly z posledních 10 koncových hodnot spekter pro všechny provozní režimy na různých měřených pozicích pro metodu B je téměř shodná s touto závislostí pro metodu A. V krajních pozicích je dokonce totožná, ve středních pozicích dochází u vyhodnocení metodou B k mírnému nárůstu, ale jen v řádu jednotek. Vysvětlení je zřejmé z předchozího obrázku. K odklonu spekter dochází dále od konce, tj. dále jak v desátém bodě od pravého konce spekter. Závěry z vyhodnocení průměrné maximální síly jsou proto totožné pro obě metody vyhodnocení.

## 7.4.4 Vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil

Vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil bylo provedeno obdobně jako pro vyhodnocení metodou A. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 7.27, kde pro jednotlivé testované provozní režimy kavitačního tunelu vidíme závislosti počtu pulzů na vzdálenosti od středu testovacího disku (na pozici PVDF senzoru) pro různé úrovně maximálních sil. Vidíme, že pro všechny režimy je nejvíce pulzů vybraných úrovní maximálních sil naměřeno na třetí pozici. Pro režimy na vyšších tlacích a se zvyšující se úrovní maximální síly, je z pohledu na počet pulzů významná rovněž i druhá pozice. Vidíme, že se zmenšuje rozdíl mezi počty pulzů na druhé a třetí pozici.



Obrázek 7.27: Počet pulzů při dané úrovni maximální síly

## 7.4.5 Vyšetřování vlivu rychlosti proudění na kavitační agresivitu

Při vyšetřování vlivu rychlosti proudění na kavitační agresivitu bylo postupováno jako při vyhodnocení metodou A. Fitování jednotlivých kumulovaných spekter proto bylo provedeno opět exponenciální funkcí, a to ve tvaru:

$$n_B = n_B^* \cdot e^{-\frac{F_{max,B}}{F_B^*}}.$$
 (7.20)

Výsledkem fitování byly dva referenční parametry  $n_B^*$  a  $F_B^*$ , popisující jednotlivá kumulovaná spektra a tím i agresivitu odpovídajících režimů. Fitování bylo provedeno pouze pro lineární části spekter tak, že bylo zanedbáno prvních 50 a posledních 20 bodů spekter. Pro režim 2,4 bar bylo zanedbáno pouze prvních 10 a posledních 5 bodů spektra a pro režim 5,8 bar bylo zanedbáno prvních 30 a posledních 15 bodů spektra, protože obsahují menší počet maxim sil.

V grafech na obrázku 7.28 jsou uvedeny referenční parametry fitu pro různé pozice PVDF senzoru pro testované režimy určené rychlosti proudění  $v_{cav}$ .



Obrázek 7.28: Parametry n\*B a F\*B různých pozic PVDF senzorů pro testované rychlosti proudění

I v těchto grafech vyhodnocení metodou B vidíme, že s rostoucí rychlostí proudění roste počet pulzů a rostou i jejich maxima. Oproti výsledkům metody A, kde s rostoucí rychlostí proudění rostl význam hodnoty parametru  $n*_A$  nejvíce na šesté pozici PVDF senzoru, u metody B s rostoucí rychlostí proudění roste význam hodnoty parametru  $n*_B$  nejvíce na třetí pozici PVDF senzoru. U vyhodnocení metodou A i B platí, že největších hodnot parametru  $F*_{A,B}$  při nízkých rychlostech proudění je dosaženo na třetí pozici a s rostoucí rychlostí dochází k přesunu maxima parametru  $F*_{A,B}$  na druhou pozici.

Referenční parametry  $n_B^*$  a  $F_B^*$  mohou být vyneseny do grafu v závislosti na rychlosti proudění. Význam této závislosti byl dříve objasněn. Závislosti parametrů  $n_B^*$  a  $F_B^*$  na rychlosti proudění pro čtvrtou pozici PVDF senzoru jsou v grafech na obrázku 7.29. Jedná se opět o lineární závislost, která vychází rovněž pro další testované pozice. Na obrázku je uvedena i lineární funkce fitu ve formátu, který byl užit již při vyhodnocení metodou A. Zjištěné parametry fitovacích funkcí  $a_B$ ,  $b_B$ ,  $c_B$  a  $d_B$  jsou uvedeny v tabulce 7.4. Z výsledku tohoto fitu plyne, že největší nárůst počtu impaktů při nárůstu rychlosti proudění je pro třetí pozici PVDF senzoru, konstanta  $b_B$ nabývá pro třetí pozici největší hodnoty. K největšímu nárůstu síly při nárůstu rychlosti proudění nastalo na druhé pozici PVDF senzoru, pro níž nabývá konstanta  $d_B$  fitu největší hodnoty.



**Obrázek 7.29:** Závislost referenčních parametrů n\*<sub>B</sub> a F\*<sub>B</sub> na rychlosti proudění pro 4 pozici PVDF senzoru

(a)				(b)			
	Pozice PVDF senzoru	Konstanta fitu a <sub>B</sub>	Konstanta fitu b <sub>B</sub>	-	Pozice PVDF senzoru	Konstanta fitu c <sub>B</sub>	Konstanta fitu d <sub>B</sub>
	[-]	[pulzů/(s.cm <sup>2</sup> )]	[pulzů/(cm <sup>2</sup> .m)]		[-]	[pulzů/(s.cm <sup>2</sup> )]	[pulzů/(cm <sup>2</sup> .m)]
	1	-7503	422	· -	1	-6.6	0.51
	2	-8957	520		2	-9.9	0.68
	3	-14038	704		3	-7.1	0.62
	4	-10625	589		4	-8.3	0.61
	5	-13515	660		5	-7.1	0.57
	6	-14182	646		6	-7.9	0.59
	7	-13905	592		7	-6.8	0.53

**Tabulka 7.4:** Výsledky fitování parametrů  $n_B^*(a)$  a  $F_B^*(b)$ 

## 7.4.6 Měření zahrnující všechny oblasti

Pro měření účinku kavitace na všech měřených oblastech (pozicích č. 1-7) současně, byl vyroben disk s dírou pro PVDF senzor, zahrnující všechny pozice. Ochranná vrstva byla 1 mm, jako v případě měření na jedné pozici. Doplňkovým měřením k současnému měření na pozicích č. 1-7 bylo měření účinku kavitace na pozicích č. 1-4. Citlivost PVDF senzoru umístěného na pozicích č. 1 - 7 byla 0,0127 V·N<sup>-1</sup> a na pozicích č. 1 - 4 byla 0,0133 V·N<sup>-1</sup>. Výsledek měření, vyhodnocený metodou B pro režim 10 bar, je v grafu na obrázku 7.30. V grafu vidíme, že maximální síly naměřené na jednotlivých pozicích, jsou menší než síly, měřené na oblastech zahrnujících pozice č. 1 – 4 a č. 1 – 7. S podobným výsledkem se setkal již Momma a Lichtarowicz (1995), když ve své práci určovali vhodnou velikost senzoru. Při testech šesti senzorů o velikosti činné plochy od 0,140 mm<sup>2</sup> do 8,88 mm<sup>2</sup> zjistili, že čím je senzor větší, tak i naměřená síla je větší. Dále zjistili, že s rostoucí plochou senzoru sice velikost síly narůstá, ale pomaleji a rozdíly se zmenšují. Platí, že s rostoucí činnou plochou se maximální síla na ní stává nezávislou. Tento jev autoři přisuzují kavitačním účinkům na okrajích činné plochy senzoru. Kavitační účinek velké intenzity na okraji senzoru pak může generovat stejné elektrické napětí jako kavitační účinek menší intenzity ve středu senzoru. Jev vysvětluje obrázek 7.31. V případě a) má samostatný účinek od kolapsu na 5. pozici totožný efekt na senzor jako polovina z účinku aplikovaného na okraji senzoru. V případě b) pak má samostatný účinek na 3. pozici totožný efekt na senzor jako část účinku, vyskytujícího se na okraji senzoru. K podobným jevům může docházet i u senzoru, zahrnujícího všechny pozice, viz případ c). V případě d) senzory na 7. a 5. pozici registrují přibližně čtvrtinu účinku a senzor na 6. pozici zhruba polovinu účinku, senzor přes všechny pozice pak registruje celkový účinek. Předmětem diskuze však zůstává otázka plochy účinku, zda může být rozsáhlá jako v případě d).



**Obrázek 7.30:** Kumulovaná spektra maxim sil pro režim 10 bar při měření na pozicích č .1 - 7 samostatně a při současném měření na pozicích č. 1 - 4 a č. 1 - 7



Obrázek 7.31: Efekt kavitačního účinku na okraji senzoru

Kumulovaná spektra měřená na oblasti, zahrnující pozice č. 1 - 7, jsou uvedena v grafu na obrázku 7.32. Obecně platí závěry uvedené pro měření na jednotlivých pozicích s tím, že v případě měření tohoto oddílu jsou maximální síly větší. Důvodem je efekt kavitačního účinku na okraji senzoru, ke kterému pravděpodobně dochází zejména v případě menších činných ploch senzorů pro samostatná měření na jednotlivých pozicích.



**Obrázek 7.32:** Kumulovaná spektra maxim sil měřená na oblasti zahrnující pozice č. 1 – 7 pro různé režimy

# Kapitola 8

# Pitting testy

Druhým přístupem ke studiu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur ve vysokorychlostním kavitačním tunelu bylo provedení pitting testů pro několik provozních režimů, a to na sedmi pozicích testovaného disku, odpovídajících pozicím měření PVDF senzory. Erodovaný profil pozic byl skenován kontaktním profilometrem. Získané skeny byly nejdříve předzpracovány softwarem profilometru a následně vyhodnoceny do formy kumulovaných spekter průměrů pitu. Na jejich základě byl vyhodnocen počet pitů pro vybrané úrovně průměru pitu, byly zjištěny charakteristické parametry pitting testů a proveden odhad síly z geometrie pitu. Dále bylo provedeno porovnání pitting testů a měření PVDF senzory.

# 8.1 Význam pitting testů

V úvodní kapitole této práce byl popsán průběh kavitační eroze a její fáze. V inkubační fázi je kavitační eroze charakterizována malými plastickými deformacemi povrchu ve formě důlků nazývaných pity, které vznikají na základě účinku kolabující kavitační bubliny, či struktury kavitačních bublin. Studium spektra průměrů pitů a jejich vlastností na dané oblasti, nazývaných jako pitting test, je alternativní metodou k přímému měření kavitačního účinku pomocí senzorů. Při pitting testech se totiž vyvarujeme některým nevýhodám měření senzory, jako jsou problémy s jejich poškozením, kalibrací, velkou dobou náběhu senzoru, nízkou hodnotou rezonanční frekvence a podobně. Nicméně i pitting testy s sebou nesou několik problémů. V současné době neexistuje validovaná metoda pro jejich vyhodnocení a interpretaci, například ve formě odhadu síly vytvářející jednotlivé pity, protože zatím nebylo jednoznačně porozuměno mechanismu tříosé deformace vysokých rychlostí s respektováním mikrostruktury materiálu. I tak jsou ale pitting testy vhodnou metodou k hodnocení a kvantifikaci intenzity kavitační eroze materiálu a souvisejícímu studiu vlivu podmínek proudění. Při pitting testech je důležitá volba materiálu, neboť silně závisejí na materiálových vlastnostech vzorku. Často je proto samotný materiál označován za senzor. Další, podrobnější informace o problematice pitting testů, mohou být získány v pracích Patella et al. (2000), Dular et al. (2004), Okada et al. (1989) a Franc et al. (2012).

Pitting testy a jejich souvislost s měřením PVDF senzory této práce je ukázána na obrázku 8.1. Při pitting testech se testovaný disk s leštěným povrchem vystaví po velmi krátký čas kavitačnímu proudění určitých parametrů. V našem případě pak totožným parametrům jako při měření pomocí PVDF senzorů. V kavitačních oblastech přitom dochází k plastickým mikrodeformacím povrchu, vznikají pity. Povrch se následně naskenuje a vyhodnotí. Výsledkem je spektrum průměrů pitů, které na dané oblasti při určitém provozním režimu charakterizuje kavitační erozní potenciál (kavitační agresivitu).



Obrázek 8.1: Oblast pitting testu (napravo) odpovídající oblasti měřené PVDF senzorem

# 8.2 Výroba disků pro pitting testy

Pitting testy byly provedeny na discích ze slitiny hliníku EN AW-7075 (EN AW-AlZn5,5MgCu) ve stavu T651 (po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí, uměle stárnutý na maximální pevnost). Uvedený materiál patří mezi základní materiály používané při různých testech v oboru kavitace (Franc et al. (2012), Carnelli (2012), Jayaprakash (2012)). Mezi jeho výhody patří velmi dobrá obrobitelnost a leštitelnost. Ze základního polotovaru (kruhová tyč) bylo v externí firmě obrobeno 6 disků o nominálním průměru 100 mm a tloušťce 20 mm. Další opracování bylo provedeno v laboratoři SIMaP v Grenoblu (Laboratoire de Science Ingénierie des Matériaux et Procédés, Grenoble INP) dle instrukcí odpovědných pracovníků. Disky byly nejdříve broušeny na brusce Buehler pomocí Si-C (Silicon-Carbide) brusných papírů o hrubosti 800, 1200 a 2400, smáčených vodou. Dále byly disky leštěny na leštičce Buehler Metaserv 250 ve třech krocích. Prvním krokem bylo leštění na látkovém leštícím kotouči diamantovou suspenzí o zrnitosti 3 µm (Buehler Polycrystalline Diamond 3 µm). Druhým krokem bylo leštění obdobným způsobem, ale s diamantovou suspenzí zrnitosti 1 µm (Buehler Polycrystalline Diamond 1 µm). První a druhý krok leštění byl proveden bez přidání vody, v průběhu se přidávala pouze daná diamantová suspenze. Posledním krokem bylo finální leštění na semišovém leštícím kotouči pomocí koloidního roztoku křemíku se zrnitostí 0,03 μm (PRESI SPM (Colloidal Silica) non crystallising 0,03 μm), za občasného přidávání vody při zasychání. Na obrázku 8.2 je fotografie disku po leštění (vlevo) a fotografie disku s mezikružím tvořeným pity (vpravo).



Obrázek 8.2: Leštěný disk před a po pitting testu

## 8.3 Pitting testy ve vysokorychlostním kavitačním tunelu

Pitting testy byly provedeny ve vysokorychlostním kavitačním tunelu pro pět provozních režimů, daných tlakem před testovací sekcí, a to pro tlaky 5,8 bar; 10 bar; 15 bar; 20 bar; 25 bar a na sedmi pozicích odpovídajících pozicím PVDF senzoru. Režim 2,4 bar se vyznačuje velmi malou kavitační agresivitou, proto pro něho nebyly pitting testy provedeny. Potřebný čas pitting testu by byl totiž enormní. Kavitační tunel byl naplněn kohoutkovou vodou, jejíž teplota byla během experimentů v rozsahu 20 °C ± 1 °C. Studovaná plocha při pitting testech byla oproti velikosti PVDF senzorů menší. Při pitting testech se jednalo o oblast o rozměrech 5 mm  $\times$  1,5 mm oproti PVDF senzoru o rozměrech 12 mm × 1,5 mm. Plochy pitting testů jsou na obrázku 8.3. Před vlastním pitting testem byl testovaný disk vložen do držáku, pomocí pravítka a tří stavěcích šroubů ustaven do testovací pozice a vložen do testovací sekce kavitačního tunelu. Následně byly nastaveny kavitační podmínky a od okamžiku dosažení kavitačního čísla byl měřen čas testu. Po proběhnutí předem volené doby testu byl disk z kavitačního tunelu vyjmut a určitá oblast skenována. Pro každý provozní režim byla nejdříve skenována prostřední oblast (pozice č. 4). Následně byl výsledek skenování vyhodnocen v programu Matlab. Pokud se v oblasti nacházelo méně než 100 pitů, což bylo volené kritérium, byl na základě počtu pitů a známé doby prvního testu odhadnut čas pro další test. Pokud se ale v oblasti nacházelo více jak 100 pitů, byla tato oblast považována za naměřenou a následovalo skenování sousedních oblastí. Na základě počtu pitů v sousedních oblastech byl odhadnut čas pro další test v kavitačním tunelu. Tímto způsobem bylo proměřeno všech sedm oblastí pro všechny provozní režimy. Celkové doby pitting testů pro jednotlivé pozice a měřené režimy jsou v tabulce 8.1.



Obrázek 8.3: Plochy pitting testů

Pozice č.	Režim [bar]					
	5,8	10	15	20	25	
	Doba pitting testu [s]					
1	27000	1920	380	60	48	
2	4800	960	90	60	28	
3	1500	180	50	15	28	
4	1050	180	50	15	12	
5	1050	180	90	60	12	
6	4800	960	380	60	48	
7	39600	1920	380	810	370	

Tabulka 8.1: Doba pitting testů

## 8.4 Skenování povrchu pitting testů

Pro skenování erodovaných povrchů se používá jak kontaktních, tak bezkontaktních skenovacích metod. Tzanakis et al. (2013) a Belahadji et al. (1991) pro skenování povrchů použili optické interferometrie. Patella et al. (2000) skenovali povrch použitím laserové profilometrie. Sreedhar et al. (2015) a Ahmed et al. (1991) studovali pity pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) a Pöhl et al. (2015) pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM). Franc et al. (2012), Franc (2009) použili pro skenování erodovaných povrchů kontaktní profilometr.

Profil s výskytem kavitačních pitů byl skenován kontaktním profilometrem Taylor Hobson Precision, Form Talysurf 50 ovládaným pomocí programu Ultra Version 4.6.9. Jeho měřicím kontaktním prvkem je kuželový hrot s vrcholovým úhlem  $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ , zakončený kulovou plochou o poloměru 2 μm. Kuželový hrot je připojen k výkyvnému raménku s břitovým uložením, které je zakončeno feritickým jádrem (kotvou) indukčního snímače. Kuželový hrot je při měření přitlačován k ploše měřené oblasti, posouvá se po ní a přitom přenáší informaci o tvaru měřeného profilu (osa z) přes raménko do indukčního snímače. Délka dráhy posuvu hrotu (osa x) určuje první z rozměrů měřené oblasti. Pro další elementární měření je disk nejdříve posunut (osa y) o nastavitelný krok a pokračuje se měřením profilu. Počet kroků a jejich velikost určuje druhý rozměr měřené oblasti. Při měření se tedy zjišťuje opakovaně profil v jednom směru a následně se z těchto elementárních profilů seřazených vedle sebe rekonstruuje profil měřené plochy. Přesnost měření použitého profilometru v ose x je 0.5  $\mu$ m, v ose y je 1  $\mu$ m a v ose z je 3,2 nm. Před měřením je nutné provést přesné ustavení disku na pohyblivém suportu a softwarové napozicování měřené oblasti pomocí čar v osách disku. Měření profilometrem je z hlediska času a nároků na paměť počítače velice náročné. Proto byla oblast skenování, respektive šířka oblasti zmenšena z 12 mm na 5 mm. Rozměr měřené oblasti byl potom 5 mm  $\times$  1,5 mm. Následovalo nastavení parametrů měření (pozice počátečního a koncového bodu měření v ose y, počet drah mezi počátečním a koncovým bodem měření v ose y, pozice počátečního bodu v ose x, délka dráhy v ose x, počet měřených bodů v ose x, širší oblast pohybu hrotu určující jeho plynulý nájezd
a přejezd, rychlost pohybu hrotu při měření a korekce pozice pro odjezd hrotu). Pro všechna měření bylo použito rozdělení v ose *y* na 1501 drah a v ose *x* rozdělené na 5001 bodů. Skenovaná oblast je tak rozdělena na síť bodů s krokem 1  $\mu$ m v obou směrech. Rychlost pohybu hrotu byla nastavena 1 mm·s<sup>-1</sup>. Na obrázku 8.4 je ukázka měření profilometrem. Kryt hrotu profilometru je pro účely pořízení fotografie zvednutý.



Obrázek 8.4: Měření profilometrem

# 8.5 Zpracování dat z profilometru

Data z profilometru jsou ukládána v počítači ve formátu SURF a následně předzpracována v programu TalyMap Expert 3.1.8. Prvním krokem při předzpracování je vyrovnání roviny měřené oblasti. Rovina disku zahrnující měřenou oblast totiž může být naklopena oproti rovině suportu, jinými slovy, hlavní přímky měřené oblasti svírají úhel se základní rovinou suportu. To může nastat například v důsledku nečistot mezi diskem a suportem, či nepřesností rozměru disku. Na obrázku 8.5 je ukázka hloubkového profilu naměřené plochy o rozměru 1,5 mm × 5,09 mm pro režim 20 bar, oblast č. 4, po 60 sekundách. Barevné měřítko představuje hloubku profilu a na jeho základě lze jednoduše rozlišit místa pitů (důlků). Obrázek 8.6 ukazuje naklopení roviny měřené oblasti, která byla užita pro vyrovnání hloubkového profilu na obrázku 8.5. Hloubkový profil oblasti po vyrovnán je ukázán na obrázku 8.7.



Obrázek 8.5: Hloubkový profil oblasti č. 4 pro režim 20 bar po 60 sekundách



Obrázek 8.7: Hloubkový profil oblasti po vyrovnání

Dalším krokem předzpracování je odečtení vzoru z naskenované oblasti. Oblast může být například zvlněná v důsledku opracování a pak menší vyskytující se jevy mohou být zvlněním zastíněny. Vzor se proto od základní plochy odečítá ve formě polynomu vyšších řádů. Protože byly vzorky kvalitně připraveny, tato úprava při použití polynomu devátého řádu vnesla minimální změnu měřené oblasti. Tuto skutečnost vidíme i při porovnání obrázku 8.7, kde ještě vzor nebyl odečten, s obrázkem 8.8, na kterém je skenovaná oblast již po odečtení vzoru. Ukázka profilu skenované oblasti, vedeného černými čarami na obrázku 8.8 je na obrázku 8.9.



Obrázek 8.8: Měřená oblast po odečtení vzoru



Obrázek 8.9: Ukázka profilu (vedeného černými čarami na obrázku 8.8)

Dále může být provedeno například filtrování drsnosti nebo převzorkování, což v našem případě není potřeba. Upravená oblast je uložena do textového souboru jako matice čísel, představující naměřenou hodnotu v ose *z*. Řádky matice odpovídají drahám hrotu profilometru, tedy představují směr v ose *x* a sloupce představují směr v ose *y*.

Matice hodnot skenu plochy byla zpracována v Matlabu. Pro vyhodnocení byl použit program získaný od Prof. Franca, který je sestavený z funkcí knihovny Matlabu. Program nejdříve načte data (funkce dlmread) z matice vygenerované programem TalyMap Expert ve formě obrázku o velikosti 5000 × 1500 pixelů, pak přiřadí jednotlivým pozicím odstín stupnice šedi (grayscale) v rozmezí mezi maximem a minimem hloubky oblasti (funkce mat2gray). Uživatel zadá požadovanou hloubku vyhodnocení, která je mezní hodnotou pro další krok, při kterém se obraz převede do binární formy (funkce im2bw). Oblasti pod touto mezní hodnotou jsou černé, nad mezní hodnotou pak bílé, jak vidíme na obrázku 8.10.



Obrázek 8.10: Binární obrázek zpracovávané oblasti

Následuje část programu provádějící detekci pitů. Pro tento účel je použit strukturující element - disk o poloměru dvou pixelů (funkce strel). Strukturující elementy jsou umístěny na jednotlivých pozicích černých oblastí a poté jsou tyto skupiny morfologicky uzavřeny (funkce imclose). Dalším krokem je určení hranic uzavřených oblastí (funkce bwboundaries). Zpracování dále pokračuje určením charakteristik pitů. Zjišťuje se plocha pitu v hloubce vyhodnocení, maximální hloubka pitu a objem pitu na základě znalosti skutečného rozměru oblasti odpovídající pixelu ( $1\mu m \times 1\mu m$ ). Ze zjištěné plochy pitu, která může být i nepravidelného tvaru, jak je vidět na předchozím obrázku, se dopočítá ekvivalentní průměr kruhového pitu. Posledním krokem je

korekce hloubky vyhodnocení. Hodnota korekce se vypočítá jako podíl, kde čitatel představuje celkový objem všech pitů a jmenovatel celkovou plochu měřené oblasti bez celkové plochy všech pitů. Korigovaná maximální hloubka jednotlivých pitů je pak o tuto korekci větší. Korigovaný objem jednotlivých pitů je dopočítán z dříve zjištěných objemů pitů, ke kterým je připočten objem rovný součinu plochy korigovaného pitu a korekce. Tyto charakteristiky pitů závisí na počáteční volbě hloubky, ve které jsou pity vyhledávány. Na obrázku 8.11 je ukázka výsledku zpracování pitting testů v Matlabu pro tři hloubky vyhodnocení 0,3 µm; 0,5 µm a 1 µm. Na obrázku s hloubkou vyhodnocení 0,3 µm je pitů sice nejvíce, ale může dojít k jejich spojení. Ukázka problematických pitů je v černém kroužku. Menší pity jsou při hloubcu vyhodnocení 0,3 µm spojeny a vyhodnocený jako jeden velký pit. Naopak na obrázku s hloubkou vyhodnocení 1 µm je pitů vyhledáno velmi málo a ze sledovaných pitů byl jeden ztracen. Volená hloubka vyhodnocení 0,5 µm je proto jakýmsi kompromisem. Sledované pity v tomto případě nejsou spojeny a zároveň zůstávají vyhodnoceny.



Obrázek 8.11: Vliv hloubky vyhodnocení při zpracování pitting testů

Kavitační pity se v erodované oblasti vyskytují v širokém spektru tvarů a velikostí. Často jejich tvar není kruhový, což nastává v důsledku směrově různé plastické deformace v okolí pitu, plynoucí z krystalografické orientace. Pro praktické použití výsledku ze zpracování pitting testu v Matlabu je třeba určitého zjednodušení. Předpokládáme, že geometrie pitu odpovídá tvaru kulové úseče charakterizované průměrem D a výškou (hloubkou pitu) h, jak je naznačeno na obrázku 8.12. Oblast plastické deformace v okolí pitu je na obrázku rovněž vyznačena. V reálných případech může být materiál v blízkém okolí hrany pitu vytažen (tzv. piling-up efekt)

nad základní rovinu, k čemuž dochází u kovů, či naopak vtažen dovnitř (tzv. sinking-in efekt), k čemuž dochází například u keramiky a skla. Zmíněné jevy v našem případě zanedbáme. Podrobnější informace o chování materiálu při zatížení indentory podává práce Tabora (1951), zabývající se experimentálním výzkumem tvrdosti materiálů.



Obrázek 8.12: Geometrie pitu

Charakteristické rozměry a objem pitů všech pozic pro režim 25 bar jsou v grafech na obrázku 8.13. a 8.14. V grafu na obrázku 8.13 je zobrazeno 816 pitů různých průměrů a jim odpovídajících hloubek. Platí, že s rostoucím průměrem pitu roste i jeho hloubka. Spektrem je proložena lineární funkce, jejíž posun je dán hloubkou vyhodnocení 0,5 μm a jejíž konstanta úměrnosti je 0,028. Pro ostatní režimy je trend obdobný. V grafu na obrázku 8.14 je zobrazena závislost objemu týchž 816 pitů na jejich průměru. Závislost objemu na průměru pitu je mocninná s hodnotou exponentu 2,1. Pro ostatní režimy je tato závislost obdobná.



Obrázek 8.13: Hloubka pitů v závislosti na jejich průměru pro režim 25 bar



Obrázek 8.14: Objem pitů v závislosti na jejich průměru pro režim 25 bar

# 8.6 Vyhodnocení průměru pitů

### 8.6.1 Kumulovaná spektra průměrů pitting testů

Pro vyhodnocení získaných charakteristik pitů byl vytvořen program v Matlabu, jehož výstupem byla kumulovaná spektra průměrů pitů pro různé provozní režimy kavitačního tunelu. Kumulovaná spektra byla normalizována na jednotku plochy oblasti pitting testu a jednotku času. Rozměr oblasti pitting testu byl 5 mm × 1,5 mm. Doba pitting testu je uvedena v tabulce 8.1 v úvodu této kapitoly. Na obrázku 8.15 je ukázka kumulovaných spekter na pozici č. 4 pro různé provozní režimy vysokorychlostního kavitačního tunelu. Ukázka kumulovaných spekter průměrů pitů různých pozic pitting testů pro režim 20 bar je na obrázku 8.16. Grafy na obrázcích zobrazují závislost kumulovaného počtu pitů za sekundu na ploše jednoho centimetru čtverečního  $n_p$ v závislosti na průměru pitu *D*. Pro kumulovaný počet pitů vztažený na jednotku času a plochy může být používáno označení plošná frekvence pitů. Svislá osa v grafech je logaritmická.



Obrázek 8.15: Kumulovaná spektra průměrů pitů pro 4. pozici pitting testu a různé testované režimy



Obrázek 8.16: Kumulovaná spektra průměrů pitů pro režim 20 bar a různé pozice pitting testů

Ze získaných spekter plyne, že s rostoucím tlakem před testovací sekcí a tedy i rostoucí rychlosti proudění se pity zvětšují. Dále platí, že počet pitů určité velikosti roste s rostoucí rychlostí proudění. Tvar spekter je v logaritmicko-lineární stupnici os blízký lineární funkci, což odpovídá exponenciální závislosti. Uvedené závěry platí obecně pro všechny proměřené režimy a pozice.

#### 8.6.2 Vyhodnocení počtu pitů pro vybrané úrovně průměru pitu

Obdobně jako při vyhodnocení počtu pulzů pro vybrané úrovně maximálních sil bylo navrženo analyzovat kumulovaná spektra pitů vyhodnocením jejich počtu pro vybrané úrovně průměrů D. Pro jednotlivé režimy byly vybírány úrovně průměrů v lineárních částech spekter. Výsledky této analýzy jsou na obrázku 8.17, kde pro jednotlivé testované režimy vidíme závislosti počtu pitů určitých úrovní průměrů D na vzdálenosti od středu testovacího disku. Vidíme, že pro režimy 5,8 bar, 10 bar a 25 bar je nejvíce pitů vybraných úrovní průměrů naměřeno na čtvrté pozici, pro režim 15 bar a 20 bar pak na třetí pozici. Dále platí, že s agresivnějším režimem dochází k nárůstu kumulovaného počtu pitů  $n_{P,D}$  pro všechny vybrané úrovně průměru pitů. Nárůst kumulovaného počtu pitů je v tomto případě výraznější s přibližováním k centrální pozici.



Obrázek 8.17a: Počet pitů daných úrovní průměrů pitů



Obrázek 8.17b: Počet pitů daných úrovní průměrů pitů

#### 8.6.3 Faktor tvaru pitu

Kumulovaná spektra, uvedená v předchozích oddílech, představovala závislosti kumulovaných průměrů pitů na jejich průměru. Průměr pitu byl volen za jeho charakteristický parametr, jako tomu bylo např. i u Mommy a Lichtarowitze (1995) a Franca et al. (2012). Roy et al. (2015) hledali numericky hydrodynamické tlakové pole Gaussovského tvaru vytvářející pity na základě pitting testů a zjistili, že pro výpočet tlakového impaktu je měřítkem spíše faktor tvaru pitu, tj. poměr hloubky pitu a jeho poloměru, než jen jeho průměr. Ukázka kumulovaných spekter faktoru tvaru pitu, tj. závislosti počtu pitů na jednotkové ploše a za jednotkový čas na faktoru tvaru pitu pro čtvrtou pozici a různé režimy je na obrázku 8.18 a pro režim 20 bar a různé pozice je na obrázku 8.19. Platí pro ně obdobné závěry jako v oddílu 8.5.1, ale na vyšších hodnotách faktoru tvaru pitu dochází k výrazné změně trendu jednotlivých spekter a přeskupení. Možnou příčinou by mohly být pity, které v určité části dosahují sice velké hloubky, která je ale neproporcionální ke zbývající části pitu. Spektra zahrnující faktor tvaru pitu byla fitována exponenciální funkcí ve tvaru použitém pro fitování spekter pitů. Výstupem byly analogicky charakteristické parametry fitu  $n_{p,h/D}$  a D\*. Tyto parametry byly následně porovnány s parametry spekter maxim sil  $n_A^*$  a  $F_A^*$ , s cílem nalezení obecného vztahu mezi pitting testy a měřeními pomocí PVDF senzoru. Takový vztah nebyl nalezen.



Obrázek 8.18: Kumulovaná spektra faktorů tvaru pitu pro 4. pozici pitting testu pro testované režimy



Obrázek 8.19: Kumulovaná spektra faktorů tvaru pitu pro režim 20 bar a různé pozice pitting testů

# 8.7 Porovnání pitting testů a měření PVDF senzory

#### 8.7.1 Určení síly vytvářející pit na základě pitting testu

Na základě získaných pitting testů lze určit maximum impaktní síly, která vytvořila daný pit. Princip je graficky předveden na obrázku 8.20, který spojuje kumulovaná spektra průměrů pitů a maxim sil čtvrté měřené pozice. Pro pity o průměru 100 µm, které vznikly při režimu 25 bar, je nejdříve určen jejich počet na jednotkové ploše za jednotku času z pitting testu. Následně je ze spektra maxim sil pro tentýž režim určena maximální síla, v našem případě o velikosti 288 N. Tato maximální síla je původcem každého pitu průměru 100 µm. Odhad síly pro další pozice viz grafy na obrázku 8.21. Pro 1., 6. a 7. pozici není možné odhad provést, protože se spektra nepřekrývají. Na pozici č. 2 je pak zájmový pit vytvořen silou 300 N, na pozici č. 3 silou 313 N a na pozici č. 5 silou 273 N. Pokud se zaměříme na pit průměru 50 µm na obrázku 8.20, tak vidíme, že pro režim 5,8 bar není možné určit sílu vytvářející zájmový pit, pro režim 10 bar je pak tato síla 165 N, pro režim 15 bar 200 N, pro režim 20 bar 234 N a pro režim 25 bar 245 N. Není známo vysvětlení popsaného. Z principu metody vyhodnocení pitting testů, kdy volíme určitou hloubku vyhodnocení, zároveň vyplývá, že pozice spektra je volbou hloubky vyhodnocení ovlivněna. Potom i odpovídající síla vytvářející pit závisí na volbě hloubky vyhodnocení pitting testu. Z uvedených důvodů nebyla provedena další analýza tohoto typu.



**Obrázek 8.20:** Postup stanovení síly vytvářející daný pit průměru 100 µm pro režim 25 bar na základě kumulovaných spekter maxim sil a průměrů pitů čtvrté pozice

#### 8.7.2 Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil

Výsledky pitting testů poskytují kvantitativní informaci o celkovém počtu pitů určitého provozního režimu kavitačního tunelu, tj. o počtu pitů všech velikostí, které se v měřené oblasti vyskytují. Celkový počet pitů určitého režimu je roven kumulovanému počtu pitů nejmenší velikosti. Pokud je tato hodnota vynesena do spekter maxim sil, nalezneme mezní hodnotu maximální síly, která je určující pro vznik pitu. Interpretace mezní hodnoty maximální síly je následující. Maximální síly kumulovaného spektra větší než mezní hodnota maximální síly vytváří pity, naopak maximální síly menší než tato hodnota pity nevytváří. V grafech na následujícím obrázku 8.21 jsou pro všechny pozice vyneseny celkové počty pitů do spekter maximálních sil pro všechny měřené režimy. Místa spekter maxim sil, které odpovídají celkovému počtu pitů, jsou vyznačena červenými trojúhelníky, spojenými červenou čarou. Platí, že s rostoucím tlakem (rychlostí proudění) dochází k mírnému nárůstu síly pro tato místa. Spojnice si lze představit jako svislice, které určují mezní hodnotu maximální síly shodnou pro všechny režimy. Při pohledu na všechny měřené pozice rovněž vidíme, že se mezní hodnoty maximální síly nacházejí v podobných rozsazích maximálních sil. Zmíněná skutečnost nasvědčuje, že mezní hodnota je pravděpodobně závislá na materiálu. Dalším důležitým závěrem je, že při měření pomocí PVDF senzorů byly zaznamenávány pulzy odpovídající kolapsům a následným impaktům, které ve většině případů nevytvářely pity. Tento závěr nabývá významu hlavně pro krajní proměřované pozice (1., 2., 6., 7.) a pro režimy při nízkých tlacích (5,8 bar a 10 bar).



Obrázek 8.21a: Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil







Obrázek 8.21b: Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil







Obrázek 8.21c: Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil







Obrázek 8.21d: Celkové množství pitů ve spektrech maxim sil

V grafu na obrázku 8.22 jsou pro každou pozici a každý měřený režim vyneseny maximální síly, odpovídající celkovému počtu pitů. S rostoucím tlakem (rychlostí proudění) rostou i maximální síly, odpovídající celkovému počtu pitů na jednotlivých pozicích. Z grafu plyne, že pro agresivnější režim je potřeba větší síly na vytvoření pitu. Zároveň platí, že pro jednotlivé pozice se maximální síla rovněž liší. Se vzdalováním od středu testovacího disku tato síla narůstá do druhé pozice, pak klesá do čtvrté až páté pozice a na dalších vzdálenějších pozicích narůstá. Nicméně tento výsledek může být důsledkem vlastností senzoru a zatížení impaktní silou na různě velkých plochách PVDF senzoru. Uvedené hodnoty byly získány na základě pitting testů na hliníku EN AW-7075 T651. Pro tento materiál byla ze všech získaných maximálních sil odpovídajících celkovému počtu pitů určena limitní síla 188 N.



Obrázek 8.22: Maximální síly odpovídající celkovému počtu pitů pro různé režimy a pozice

#### 8.7.3 Charakteristické parametry pitting testů

Pro další analýzu pitting testů použijeme přístup Franca et al. (2012) nebo Soyamy et al. (2005), kteří kumulovaná spektra průměrů pitů aproximovali exponenciální funkcí ve tvaru:

$$n_p = \frac{8}{\pi \cdot \delta^2 \cdot \tau} e^{-\left(\frac{2 \cdot D}{\delta}\right)}, \qquad (8.1)$$

kde fitovací parametr  $\delta$  je charakteristický průměr pitu spektra a parametr  $\tau$  je charakteristický čas spektra. Význam parametrů je následující. Parametr  $\delta$  představuje průměr takových pitů, které nejvíce přispívají k plošnému zaplnění oblasti pitting testu. Parametr  $\tau$  představuje čas, potřebný k zaplnění celé plochy oblasti pitting testu pity daného spektra právě jednou. Faktor  $8/\pi$  byl Francem et al. (2012) do vztahu zaveden při odvozování. Dále byla definována míra zaplnění oblasti pitting testu  $\beta$  následovně:

$$\beta = \int_{D}^{\infty} \left( -\frac{dn_p}{dD} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} dD, \qquad (8.2)$$

kde součin ( $-dn_p/dD$ ) · dD představuje počet pitů v intervalu poloměrů [D, D + dD] a zbytek výrazu pak představuje plochu pitu o průměru D. Míra zaplnění může být interpretována jako část celkové plochy pitting testu, zaplněné pity většími než průměr D za jednotkový čas. V případě, kdy se průměr pitu blíží nule, převrácená hodnota míry zaplnění představuje právě charakteristický čas spektra pitting testu  $\tau$ . Ukázka průběhu hodnoty míry zaplnění pro třetí pozici a různé režimy je na obrázku 8.23.





Z grafu lze jednoduše určit charakteristický čas jednotlivých spekter. V grafu rovněž vidíme, že pity různých velikostí přispívají různou měrou k zaplnění oblastí pitting testů. Z tohoto důvodu byla dále určena změna míry zaplnění každého intervalu poloměrů, tj. -  $d\beta/dD$ . Hodnoty míry zaplnění jednotlivých intervalů poloměrů pitů pro třetí pozici a různé režimy jsou znázorněny v grafu na obrázku 8.24. Byly určeny numericky z funkce fitované na body kumulovaných měr zaplnění oblastí uvedených v grafu na obrázku 8.23.



**Obrázek 8.24:** Změna míry zaplnění pro všechny intervaly poloměrů a určení charakteristického průměru pitu různých režimů na třetí pozici

Průběh v grafu na obrázku 8.24 potvrzuje, že pity zahrnuté jednotlivými intervaly poloměrů pitů přispívají opravdu různou měrou. A právě maxima označená červeným křížkem určují na horizontální ose charakteristický průměr pitu, který k zaplnění plochy pity přispívá nejvíce. Následně mohou být oba parametry spojeny v referenční počet pitů na jednotce plochy za jednotkový čas takto:

$$n_{p,ref} = \frac{1}{\delta^2 \cdot \tau}.$$
(8.3)

Na následujícím obrázku 8.25 jsou grafy hodnot charakteristických parametrů pitting testu pro jednotlivé pozice a různé režimy určené rychlostí proudění.



**Obrázek 8.25:** Charakteristické parametry τ a δ pro jednotlivé pozice pitting testu a různé režimy určené rychlostí proudění

Na levém grafu vidíme, že charakteristický čas klesá s rostoucí rychlostí proudění a zároveň s přibližováním k centrální pozici (4. pozici). Z pravého grafu plyne, že charakteristický průměr pitu je největší pro třetí pozici a zmenšuje se směrem ke krajním pozicím. To znamená, že pity, které se podílí největší mírou na zaplnění oblasti pitting testu, jsou největší právě pro třetí pozici a velikost těchto nejdůležitějších pitů se zmenšuje směrem od třetí pozice. Zároveň je tato charakteristická velikost pitu přibližně shodná pro tři největší rychlosti proudění. Závislosti referenčního počtu pitů na rychlosti proudění pro čtvrtou a pátou pozici jsou uvedeny v grafu na obrázku 8.26. Na obrázcích je fit závislosti ve tvaru šesté mocniny rychlosti proudění. Odhad fitu pro další pozice je rovněž blízký šesté mocnině.



**Obrázek 8.26:** Závislosti referenčního počtu pitů na rychlosti proudění v<sub>cav</sub> pro 4. a 5. pozici a jejich fit

## 8.8 Odhad síly impaktu na základě pitting testu

Odhad síly impaktu vychází z analogie vtlačování kulového indentoru do materiálu. Tabor (1951) ve své práci definuje vztah pro výpočet skutečného mechanického napětí při vtlačování indentoru do materiálu:

$$\sigma_m = \frac{1}{\Phi} \cdot p_m \,, \tag{8.4}$$

kde  $\Phi$  je faktor omezení a  $p_m$  je střední kontaktní tlak. Francis (1976) ve své práci uvádí, že za předpokladu čistě elastického chování materiálu faktor omezení nabývá hodnoty 1,11 a za plně vyvinuté plasticity pak hodnoty 2,87; tato nastává právě v případě formování kavitačního pitu. Střední kontaktní tlak může být v případě indentoru vyjádřen následovně:

$$p_m = \frac{F_c}{\pi \cdot r_c^2},\tag{8.5}$$

kde  $F_c$  je střední kontaktní síla a  $r_c$  je kontaktní poloměr. Kontaktní poloměr  $r_c$  v případě pitu odpovídá polovině průměru pitu D:

$$r_c = \frac{D}{2}.$$
(8.6)

Pro kulový indentor Tabor (1951) uvádí vztah pro střední hodnotu deformace  $\varepsilon$  ve tvaru:

$$\varepsilon = k_i \cdot \sin \gamma_i \cong 0.2 \cdot \frac{r_c}{R_{ind}},$$
(8.7)

kde  $k_i$  je koeficient daného indentoru (nezávisí na druhu materiálu a byl zjištěn experimentálně, pro kouli  $k_i = 0.2$ ),  $\gamma_i$  je poloviční kontaktní úhel indentoru,  $r_c$  je kontaktní poloměr a  $R_{ind}$  je poloměr indentoru. Poloměr indentoru  $R_{ind}$  může být vyjádřen pomocí průměru pitu D a hloubky pitu h:

$$R_{ind} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + h^2}{2 \cdot h}.$$
(8.8)

Při spojení posledních dvou rovnic získáme vztah pro střední hodnotu deformace  $\varepsilon$  vztah:

$$\varepsilon \simeq 0.8 \cdot \frac{\frac{h}{D}}{1 + 4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2},$$
(8.9)

kde poměr h/D nazýváme faktor tvaru. Kavitační pity jsou ve většině případu mělké a jejich průměr je o mnoho větší než jejich hloubka. Pak lze výraz v čitateli zanedbat a finální vztah pro střední hodnotu deformace nabývá tvaru:

$$\varepsilon \cong 0.8 \cdot \frac{h}{D}. \tag{8.10}$$

Se znalostí uvedené střední hodnoty deformace pitu  $\varepsilon$  a skutečného mechanického napětí  $\sigma_m$  od síly, tvořící zmíněnou deformaci, zůstává jediným neznámým vztah mezi nimi, tj. konstitutivní vztah mezi napětím a deformací použitého materiálu  $\sigma_m = f(\varepsilon)$ . Tento konstitutivní vztah se určuje experimentálně zkouškami materiálu, které probíhají při určitých hodnotách rychlosti deformace, charakteristických pro daný druh zkoušky materiálu. U klasických tahových zkoušek materiálu se jedná o rychlosti deformace v jednotkách tisícin za sekundu a méně, či u nanoindentačních zkoušek materiálu o jednotky setin za sekundu. V případě kavitace však rychlost deformace nabývá výrazně větších hodnot. Chahine et al. v první kapitole knihy Kim et al. (2014, p. 16) odhadují rychlost deformace  $\varepsilon$  při působení kavitační impaktní síly z následujícího výrazu:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t},\tag{8.11}$$

kde  $\Delta \varepsilon$  je deformace způsobená impaktní silou a  $\Delta t$  je doba trvání impaktní síly. Deformace je odhadnuta na základě práce Carnelliho et al. (2012), ze které autoři po hlubší analýze vyvozují,

že ačkoliv bylo silnými kavitačními kolapsy dosaženo u některých pitů deformací až 16 %, tak většina pitů je tvořena slabšími kolapsy, kdy je dosaženo deformace 3 – 4 %. Do předchozího vztahu je potom dosazena hodnota deformace 5 %, která zahrnuje většinu deformací způsobených kolapsy kavitačních bublin. Doba trvání impaktní síly byla odhadnuta na základě práce Soyamy et al. (2011), kde autoři analýzou měření impaktů PVDF senzorem nalezli reprezentativní hodnotu okolo 10 µs pro širší spektrum kolapsů. Rychlost deformace pak pro případ kavitace nabývá hodnot:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \cong \frac{5 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-6}} = 5 \cdot 10^3 s^{-1}, \tag{8.12}$$

což je hodnota o několik řádů větší než u klasických zkoušek materiálu, či u nanoindentačních zkoušek materiálu. Tuto skutečnost je třeba při volbě konstitutivního vztahu zahrnout. V těchto případech se proto volí konstitutivní vztah, zahrnující vliv rychlosti deformace, který je pak možné použít právě pro výpočet síly, vytvářející pit rychlostí řádu blízkého rychlosti kolapsu kavitační bubliny. Určení parametrů vhodného konstitutivního vztahu ale vychází z běžně dostupných zkoušek materiálu. V případě konstitutivního vztahu, použitelného pro vyhodnocení pitting testů se s výhodou používá nanoindentačních zkoušek materiálu oproti běžným tahovým a tlakovým zkouškám. Nanoindentační zkoušky jsou totiž ve své podstatě podobné mechanismu eroze při kavitaci, kdy doprovodné kavitační jevy v inkubační fázi eroze deformují materiál podobně tlakem, jako indentor penetruje testovaný vzorek. Carnelli et al. (2012) v rámci práce na téma vyhodnocení hydrodynamických tlaků od kavitačních impaktů na základě geometrie pitů provedli nanoindentační zkoušky materiálu pro slitinu hliníku EN AW-7075 T651 na zkušebním zařízení Nano Indenter XP. Výsledek nanoindentačních zkoušek je ve vrchní části na obrázku 8.27. V grafu jsou zobrazeny závislosti síly (označené Load) na hloubce penetrace (označené Depth) pěti nanoindentačních zkoušek. Křivky představují zatížení a uvolnění provedené pěti diamantovými indentory pro maximální hloubku penetrace 5 µm a kontrolovanou rychlost deformace 0,05 s<sup>-1</sup>. Ve spodní části obrázku 8.27 je graf závislosti mechanického napětí (označeného Stress) na deformaci (označené Strain) pro provedené testy. Křivka tvořená plnou čárou ukazuje výsledek experimentu pro 25 indentačních křivek. Čárkovaná křivka aproximuje výsledek nanoindentace Hollomonovým materiálovým modelem, který dobře aproximuje právě část křivky v oblasti zpevnění materiálu, kde dochází k plastickým deformacím v případě pitů. Tečkovaná křivka představuje závislost mechanického napětí na deformaci, respektující rychlost deformace (označenou strain rate effect).



Obrázek 8.27: Nanoindentační zkouška materiálu EN AW-7075 T651 (Carnelli et al., 2012)

Hollomonova konstitutivní rovnice je definována:

$$\sigma_m = \mathcal{C} \cdot \varepsilon^{n_z} \,, \tag{8.13}$$

kde *C* je materiálový parametr určovaný z experimentu a  $n_z$  je exponent zpevnění. Hollomonova konstitutivní rovnice může být rovněž vyjádřena ve tvaru:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{n_z},\tag{8.14}$$

kde  $\sigma_{m0}$  je referenční mechanické napětí vztažené k referenční deformaci  $\varepsilon_0$ . Jako hodnoty referenční deformace a odpovídajícího mechanického napětí lze použít hodnoty na mezi kluzu.

V případě materiálů bez výrazné meze kluzu, což je i případ materiálu EN AW-7075 T651, se používá hodnot smluvní meze kluzu, tj. hodnot mechanického napětí, způsobujícího trvalou deformaci  $\varepsilon_0 = 0,2 \%$ . Fitováním 25 experimentálních křivek autoři odhadli hodnotu referenčního mechanického napětí vztaženého k referenční deformaci  $\sigma_{m0} = 514 \pm 12 MPa$ a hodnotu exponentu zpevnění  $n_z = 0,14 \pm 0,01$  [–]. Koeficient determinance tohoto fitu byl  $R^2 = 0,97$ .

Tečkovaná čára na obrázku 8.27 představuje závislost mechanického napětí na deformaci při rychlosti deformace vyšší než při nanoindentačních zkouškách, a to při hodnotách rychlosti deformace při kavitační erozi. Závislost je opět vyjádřena Hollomonovou konstitutivní rovnicí, jejíž referenční hodnota mechanického napětí při vyšší rychlosti deformace byla stanovena pomocí Johnsonova-Cookova vztahu ve tvaru zahrnujícím vliv rychlosti deformace materiálu a nezahrnujícího vliv teploty:

$$\sigma_{m0}(\dot{\varepsilon}) = \sigma_{m0} \cdot \left(1 + K \cdot ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right), \qquad (8.15)$$

kde  $\sigma_{m0}(\dot{\varepsilon})$  je referenční mechanické napětí při vyšší rychlosti deformace,  $\sigma_{m0}$  je referenční mechanické napětí při referenční rychlosti deformace  $\dot{\varepsilon}_0$ ,  $\dot{\varepsilon}$  je rychlost deformace, při které vyjadřujeme závislost mechanického napětí na deformaci tímto konstitutivním modelem a *K* je materiálová konstanta, která zahrnuje vliv chování materiálu při jiné rychlosti deformace. V rovnici bylo použito mechanické napětí při referenční rychlosti deformace a referenční deformaci  $\sigma_{m0} = 514 MPa$ , referenční rychlost deformace odpovídající rychlosti deformace při nanoindentační zkoušce materiálu  $\dot{\varepsilon}_0 = 0,05 \, s^{-1}$ , rychlost deformace pro kterou hledáme závislost mechanického napětí na deformaci  $\dot{\varepsilon} = 10^3 \, s^{-1}$ . Materiálová konstanta K = 0,017 [-] byla určena na základě práce Ponthise et al. (2011), zahrnující experimentální data z materiálových zkoušek hliníkové slitiny EN AW-7075 T651. Výsledná hodnota referenčního mechanického napětí při rychlosti deformace odpovídající kavitačnímu jevu je  $\sigma_{m0}(\dot{\varepsilon}) =$ 600 *MPa*.

Spojením vztahů uvedených v úvodu této kapitoly a postupnými úpravami lze vyjádřit odhad impaktní síly od kolapsu, která vytvořila pit určitých rozměrů následovně:

$$F_{p} = F_{c} = \sigma_{m} \cdot \Phi \cdot \frac{\pi D^{2}}{4} = \sigma_{m0}(\dot{\varepsilon}) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0}}\right)^{n_{z}} \cdot \Phi \cdot \frac{\pi D^{2}}{4}$$
$$= \sigma_{m0}(\dot{\varepsilon}) \cdot \left(\frac{0.8 \cdot \frac{h}{D}}{\varepsilon_{0}}\right)^{n_{z}} \cdot \Phi \cdot \frac{\pi D^{2}}{4}$$
(8.16)

a po dosazení známých číselných hodnot materiálových konstant a faktoru omezení výraz nabývá tvaru:

$$F_p = 600 \cdot \left(\frac{0.8 \cdot \frac{h}{D}}{0.002}\right)^{0.14} \cdot 2.87 \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$
 (8.17)

Odhad síly impaktu je potom závislý pouze na průměru pitu a jeho hloubce. Na základě vztahu 8.17 byla zjištěna kumulovaná spektra impaktních sil, tj. závislosti počtu pitů za sekundu na ploše centimetru čtverečního na síle impaktu, která byla odhadnuta z geometrie pitu. Ukázka kumulovaných spekter impaktních sil pro režim 20 bar a všechny testované pozice je v grafu na obrázku 8.28.



Obrázek 8.28: Kumulovaná spektra impaktních sil pro režim 20 bar

V grafu na obrázku 8.28 je vidět, že dochází ke změnám trendu jednotlivých spekter a proto jednotlivá spektra nebyla fitována. Výsledky je možné hodnotit pouze globálně. Odpovídající kumulovaná spektra průměrů pitů jsou na obrázku 8.16. Z jejich porovnání vyplývá, že pořadí kumulovaných spekter zůstává zachováno. Nedošlo k jejich přeskupení, jako v případě kumulovaných spekter faktoru tvaru pitů, která jsou pro tentýž režim uvedena na obrázku 8.19. Obdobné závěry platí i pro další režimy.

V levém grafu na obrázku 8.29 jsou pro režim 20 bar uvedena kumulovaná spektra impaktních sil odhadnutá z pitting testů, v pravém grafu pak pro tentýž režim kumulovaná spektra maxim sil měřených PVDF senzory (z vyhodnocení metodou B). Z grafů plyne, že maximální síly měřené PVDF senzory jsou přibližně šestinásobné oproti impaktním silám, odhadnutým na základě geometrie pitů. Z pohledu na kavitační agresivitu proudění v kavitačním tunelu je v obou případech nejvýznamnější spektrum třetí pozice. Druhé nejvýznamnější spektrum v případě spekter průměrů pitů a impaktních sil je na čtvrté pozici a v případě maxim sil pak na druhé pozici. Pořadí spekter impaktních sil určených z pitting testů neodpovídá pořadí spekter maximálních sil z měření PVDF senzory.



Obrázek 8.29: Kumulovaná spektra impaktních sil a kumulovaná spektra maxim sil pro režim 20 bar

# Kapitola 9

# Shrnutí a hlavní závěry disertační práce

Závěrečná kapitola je shrnutím disertační práce, dosažených výsledků a jejich stručnou diskuzí. Výsledky jsou hodnoceny z pohledu vědního oboru a současné praxe. V kapitole je rovněž uvedeno doporučení na pokračování práce.

# 9.1 Shrnutí disertační práce

Disertační práce přináší poznatky, týkající se experimentálního výzkumu mechanismu kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů. Metodou řešení tohoto úkolu bylo měření účinku kolapsu kavitačního mraku ve vybraném testovacím zařízení – v případě této disertační práce ve vysokorychlostním kavitačním tunelu laboratoře LEGI v Grenoblu ve Francii. V rámci řešení byla navržena metoda pro studium účinku kolapsu kavitačního mraku pomocí piezoelektrických PVDF senzorů a alternativně pak pomocí pitting testů. Navržená metoda spočívala v umístění PVDF senzoru do oblasti výskytu kavitačních kolapsů a měření jejich účinku ve formě impaktních sil. PVDF senzory byly přilepeny na zvolených pozicích testovacích disků a překryty ochrannou vrstvou lepidla, zamezující jejich poškození. Navržená metoda, geometrie díry pro přilepení senzoru a technologie lepení senzoru byly testovány a optimalizovány. Dále byla řešena problematika kalibrace a elektromagnetická kompatibilita senzoru. Následovalo vlastní měření účinku kolapsu kavitačního mraku na sedmi pozicích a pro šest provozních režimů vysokorychlostního kavitačního tunelu. Výstupem měření byly signály časové závislosti elektrického napětí odpovídajícího účinku na PVDF senzor, kde pulzy představovaly kavitační události. Signál byl zpracován v Matlabu v několika krocích. Výstupem byla maxima pulzů, která byla vyhodnocena ve formě kumulovaných spekter. Následovala analýza kumulovaných spekter, ze které vyplynuly závěry z měření. Závěry byly diskutovány. Další metodou vyhodnocení měření byla dekompozice signálu. Signál totiž obsahoval shluky překrývajících se pulzů. Výsledky této metody byly vyhodnoceny obdobně. Alternativní metodou studia účinku kavitačního kolapsu bylo provedení pitting testů na leštěných vzorcích hliníku. Pitting testy byly provedeny pro pět provozních režimů vysokorychlostního kavitačního tunelu. Na kontaktním profilometru byly skenovány tytéž oblasti, na kterých probíhalo měření PVDF senzory. Výsledkem vyhodnocení skenovaných oblastí byly geometrické charakteristiky jednotlivých pitů, které byly následně zpracovány v kumulovaná spektra pitů. Kumulovaná spektra pitů byla analyzována a rovněž proběhlo jejich porovnání s měřeními PVDF senzory. Na základě získaných pitting testů byly stanoveny závěry a proběhla jejich diskuze.

## 9.2 Zhodnocení výsledků pro vědní obor a pro praxi

Předkládaná disertační práce představuje metodiku měření a vyhodnocení kavitačního účinku pomocí piezoelektrických PVDF senzorů. Tato metodika by mohla najít využití v praxi při kvantifikaci erozního potenciálu kavitačního proudění. Mohla by být přímo aplikována ve strojích či zařízeních s kavitačním prouděním, protože měření PVDF senzory představuje levnou, jednoduchou a dostupnou metodu pro kvantifikaci erozního potenciálu.

Vedle běžně používané metody vyhodnocení signálu byla v disertační práci navržena a použita metoda vyhodnocení shluků pulzů, založená na podobnosti tvaru jednotlivých pulzů a Gaussovy funkce.

Disertační práce přispěla k popisu kavitačního proudění ve vybraném testovacím zařízení – vysokorychlostním kavitačním tunelu. Byl získán radiální profil kavitačního účinku v testovací sekci kavitačního tunelu a zjištěn vliv rychlosti proudění na kavitační účinek.

Přínosem práce je rovněž porovnání měření pomocí PVDF senzorů s pitting testy a to na více pozicích. Výsledek porovnání přináší další otázky v dané problematice a představuje výzvu pro materiálové inženýry k návrhu vhodnějších modelů kavitační eroze ve fázi pitting testů.

## 9.3 Doporučení na pokračování práce

V disertační práci byl užit průmyslově vyráběný PVDF senzor. Zajímavým pokračováním je měření kavitačního účinku tištěným nebo fotolitograficky vyrobeným senzorem, které by potvrdilo či vyvrátilo výsledek měření této práce. Vývoj senzoru vyráběného fotolitograficky z PVDF folie na Technické univerzitě v Liberci stále probíhá. Doporučením je i užití kalibrace metodou zlomení tuhy, neboť tato metoda je z časového měřítka bližší kavitačnímu ději.

Při měření účinku kolapsu pomocí PVDF senzorů byla zjištěna závislost výsledku měření na velikosti plochy senzoru, kdy pro větší plochu senzoru byl za stejných podmínek měřen větší silový účinek. Nejenom tento jev, ale i vliv elektrické kapacity senzoru v důsledku změny jeho velikosti je nutné před dalším měřením analyzovat.

Žádoucí by rovněž bylo provést synchronizované měření účinku kolapsu PVDF senzory a snímání kolapsu v oblasti PVDF senzoru vysokorychlostními kamerami. Následovalo by společné vyhodnocení získaného signálu a záznamu. Jednotlivým kavitačním událostem na záznamu by pak byl přiřazen v signálu konkrétní účinek.

Posledním doporučením na pokračování práce je zaměřit se na studium mechanismu společného kolapsu dvou a více kavitačních bublin v závislosti na vzdálenosti od stěny. Účinek kolapsu by byl měřen pomocí PVDF senzoru na stěně a podvodního mikrofonu – hydrofonu, umístěného v kapalině. Současně s měřením účinku senzorem by byl pořízen záznam kolapsu vysokorychlostní kamerou. Cílem experimentu by pak byla analýza signálu účinku společného kolapsu více kavitačních bublin měřeného PVDF senzorem. Měřením v kavitačním tunelu, kde je generován kavitační mrak, tvořený více kavitačnímu bublinami, byl totiž získán signál obsahující shluky pulzů různých tvarů a velikostí. Jejich význam by mohl být navrženým experimentem objasněn.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- American Society for Testing and Materials (2016) ASTM G32-16 2016. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. West Conshohocken, ASTM International.
- American Society for Testing and Materials (2017) ASTM G73-10 2017. Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus. West Conshohocken, ASTM International.
- American Society for Testing and Materials (2017) ASTM G134-17 2017. Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet. Conshohocken, ASTM International.
- Ahmed, S. M., Hokkirigawa, K., Ito, Y. & Oba, R. (1991) Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion. *Wear*. 142, 303-314.
- Bark, G. & Berlekom, W. B. (1978) Experimental investigation of cavitation noise. In: Office of Naval Research & David W. Taylor Naval Ship Research and Development center. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> ONR Symposium On Naval Hydrodynamics, 5-9 June 1978, Washington, D.C., The United States of America.* Washington, D.C., U.S. Government Printing Office. pp. 470-493.
- Belahadji, B., Franc, J.-P. & Michel, J.-M. (1991) A Statistical Analysis of Cavitation Erosion Pits. *Journal of Fluids Engineering*. 113, 700–706.
- Benjamin, T. B. & Ellis, A. T. (1966) The collapse of cavitation bubbles and the pressure thereby produced against solid boundaries. *Phylosophical Transaction Royal Society London A*. 260, 221-240.
- Bjerknes, V. F. K. (1906) Fields of Force. New York, Columbia University Press.
- Brdička, M., Samek, L. & Taraba, O. (1981) *Kavitace, Diagnostika a technické využití*. Praha, SNTL.
- Brennen, C.E. (1995) Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford, Oxford University Press.
- Carnelli, D., Karimi, A. & Franc, J.-P. (2012a) Evaluation of the hydrodynamic pressure of cavitation impacts from stress-strain analysis and geometry of individual pits. *Wear.* 289, 104–111.
- Carnelli, D., Karimi, A. & Franc, J.-P. (2012b) Application of spherical nanoindentation to determine the pressure of cavitation impacts from pitting tests. *Journal of Material Research*. 27, 91–99.
- Ceccio, S. L. & Brennen, C. E. (1991) Observations of the dynamics and acoustics of travelling bubble cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*. 233, 633-660.
- D'Agostino, L. & Brennen, C. E. (1989) Linearized dynamics of spherical bubble clouds. *Journal of Fluid Mechanics*. 199, 155–176.
- Dular, M. & Petkovšek, M. (2015) On the mechanisms of cavitation erosion Coupling high speed videos to damage patterns. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 68, 359-370.

- Franc, J.-P. & Michel, M. (1988) Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil. *Journal of. Fluid Mechanics*. 193, 171-189.
- Franc, J.-P. & Michel, J.-M. (1997) Cavitation erosion research in France: the state of the art. *Journal of Marine Science and Technology*. 2(4), 233–244.
- Franc, J.-P. & Michel, J.-M. (2004) Fundamentals of cavitation. Dordrecht, Kluwer.
- Franc, J.-P. (2009) Incubation Time and Cavitation Erosion Rate of Work-Hardening Materials. *Journal of Fluids Engineering*. 131 (2), 021303.
- Franc, J.-P., Riondet, M., Karimi, A. & Chahine, G. (2011) Impact load measurement in an Erosive Cavitating Flow. *Journal of Fluids Engineering*. 133, 121301-1.
- Franc, J.-P., Riondet, M., Karimi, A. & Chahine, G. (2012) Material and velocity effects on cavitation erosion pitting. *Wear*. 274-275, 248-259.
- Francis, H. A. (1976) Phenomenological analysis of plastic spherical indentation. Journal of Engineering Materials and Technology. 98, 272-281.
- Gavaises, M., Villa, F., Koukovinis, P., Marengo, M. & Franc, J.-P. (2015) Visualisation and LES simulation of cavitation cloud formation and collapse in an axisymmetric geometry. *International Journal of Multiphase Flow.* 68, 14-26.
- Grinspan, A. S. & Gnanamoorthy, R. (2010) Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 356, 162-168.
- Hattori, S., Hirose, T. & Sugiyama, K. (2010) Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact load. *Wear*. 269 (7-8), 507-514.
- Hujer, J. (2013) *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů*. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, Liberec.
- Humphreys, B. (2017) ConvertTDMS (v10) [zdrojový kód] Dostupné z: https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44206-converttdms-v10
- Chahine, G. (1984) Pressures generated by a bubble cloud collapse. *Chemical Engineering Communications*. 28, 355–367.
- Choi, J. K., Jayaprakash, A. & Chahine, G. (2012) Scaling of cavitation erosion progression with cavitation intensity and cavitation source. *Wear*. 278-279, 53-61.
- Jayaprakash, A., Choi, J. K., Chahine, G. L., Martin, F., Donnelly, M., Franc, J.-P. & Karimi, A. (2012) Scaling study of cavitation pitting from cavitating jets and ultrasonic horns. *Wear*. 296 (1–2), 619-629.
- Jenčík, J., Volf, J. a kol. (2000) Technická měření. Praha, ČVUT.
- Jirouš, S. & Fraňa, K. (2011) Visualization of the Oil flow in the Gap of Helical gearing based on Numerical Simulations', In: 30. setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky: hydro/termo, 22.-24. června 2011, Špindlerův Mlýn : sborník příspěvků. Liberec, TUL.
- Jirouš, S. (2015) *Identifikace kavitačních procesů na povrchu ozubených kol.* Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, Liberec.

- Kermeen, R. W. (1956) Water tunnel tests of NACA 4412 and Walchner profile 7 hydrofoils in noncavitating and cavitating flows. California Institute of Technology, Hydrodynamics Laboratory Report 47-5.
- Kim, K. H., Chahine, G., Franc, J.-P. & Karimi, A. (2014) *Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction*. Dordrecht, Springer.
- Krahk, D. & Weber, J. (2016) Visualization of cavitation and investigation of cavitation erosion in a valve. In: Technical university in Dresden. *IFK2016: 10th International Fluid Power Conference, 8-10 March 2006, Dresden, Germany.* Dresden, TUD, Dresden. pp. 333-348.
- Lecoffre, Y., Marcoz, J., Franc, J.-P. & Michel, J.-M. (1985) Tentative procedur efor scaling cavitation damage . In: *Proceedings International Symposium on Cavitation in Hydraulic Structures and Turbomachinery*, 24-26 June 1985, Albuquerque, USA.
- Leighton, T. G. (1994) The Acoustic Bubble. London, Academic Press.
- Momma, T. & Lichtarowicz, A (1995) A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation. *Wear*. 186-187, 425-436.
- Morch, K. A. (1980) On the collapse of cavity cluster in flow formation. In: Lauterborn, W. (ed.) Proceedings of the First International Conference on Cavitation and Inhomogenities in Underwater Acoustic, 9 – 11 July, 1979, Göttingen, Federal Republic of Germany. Berlin, Springer. pp. 95-100.
- Müller, M. (2008) Dynamic behaviour of cavitation bubbles generated by laser. Liberec, TUL.
- Nechleba, M. (1955) Das problem der kavitation. Maschinenbautechnik. 2, 81-88.
- Noltingk, B. E. & Neppiras, E. A. (1950) Cavitation produced by ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society London*, 64 B, 674-685.
- Noskievič, J. (1969) Kavitace. Praha, Academia.
- Noskievič, J. a kol. (1990) Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních. Praha, SNTL.
- Okada, T., Iwai, Y. & Awazu, K. (1989) A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 1: A method for measurement of collpase pressures. *Wear*. 133, 219-232.
- Okada, T., Iwai, Y., Hattori, S. & Tanimura, N. (1995) Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse. *Wear*. 184, 231 239.
- Osterman, A., Bachert, B., Sirok, B. & Dular, M. (2009) Time dependend measurement of cavitation damage. *Wear*. 266 (9), 945-951.
- Patella, R. F., Reboud, J. L. & Archer, A. (2000) Cavitation damage measurement by 3D laser profilometry. *Wear*. 246 (1-2), 59-67.
- Petracchi, G. (1949) Intorno all interpretazione del processo di corrosion per cavitazione. *La Metallur Italiana*. 1, 1-6.
- Philipp, A. & Lauterborn, W. (1998) Cavitation erosion by single laser-produced bubbles. *Journal* of Fluid Mechanics. 361, 75-116.
- Piezo Film Sensors Technical Manual (1999), Norrsitown, Measurement Specialties.

- Pothnis, J. R., Perla, Y., Arya, H. & Naik, N. K. (2011) High Strain Rate Tensile, Behavior of aluminum alloy 7075 T651 and IS 2062 mild steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 133, 021026.
- Pöhl, F., Mottyll, S., Skoda, R. & Huth, S. (2015) Evaluation of cavitation-induced pressure loads applied to material surfaces by finite-element-assisted pit analysis and numerical investigation of the elasto-plastic deformation of metallic materials. *Wear*. 330-331, 618–628.
- Rayleigh Lord, J. W. S. (1917) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Philosophical Magazine*. 34, 94-98.
- Reisman, G. E., Wang, Y. C. & Brennen, C. E. (1998) Observations of shock waves in cloud cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*. 355, 255-283.
- Rijsbergen, M., Foeth, J. E., Fitzsimmons, P. & Boorsma, A. (2012) High-Speed Video Observations and Acoustic-Impact Measurement on a NACA 0015 foil. In: Claus-Dieter Ohl, Evert Klaseboer, Siew Wan Ohl, Shi Wei Gong and B. C. Khoo (eds.) *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation (CAV 2012)*, 13 – 16 August 2012, Singapore. Research Publishing Services, Singapore, pp. 958-964.
- Roy, S. Ch., Franc, J.-P., Pellone, Ch. & Fivel, M. (2015) Determination of cavitation load spektra
   Part 1: Static finite element approach. *Wear*. 344-345, 110-119.
- Roy, S. Ch., Franc, J.-P., Ranc, N. & Fivel, M. (2015) Determination of cavitation load spektra Part 2: Dynamic finite element approach. *Wear*. 344-345, 120-129.
- Savitzky, A. & Golay, M. J. E. (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures. *Analytical Chemistry*. 36, 1627-1639.
- Soyama, H. & Asahara, M. (1999). Improvement of the corrosion resistance of a carbon steel surface by a cavitating Jet. *Journal of Materials Science Letters*. 18. 1953-1955.
- Soyama, H., Futakawa, M. & Homma, K. (2005) Estimation of pitting damage induced by cavitation impacts. *Journal of Nuclear Materials*. 343 (1-3), 116-122.
- Soyama, H., Kato, H. & Oba, R. (1992) Cavitation observations of severely erosive vortex cavitation arising in a centrifugal pump. In: Nihon Kikai Gakkai & Royal Institution of Naval Architects & Institution of Mechanical Engineers (Great Britain) 3rd international conference on cavitation: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Third International Conference on Cavitation, 9-11 December 1992, Robinson College, Cambridge, Great Britain. London, Mechanical Engineering Publications Limited. pp. 103-110.
- Soyama, H., Lichtarowicz, A., Momma, T. & Williams, E. J. (1998) A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement. *Journal of Fluids Engineering*. 120 (4), 712-718.
- Soyama, H., Sekine, Y. & Saito, K. (2011) Evaluation of the Enhanced Cavitation Impact Energy Using a PVDF Transducer with an Acrylic Resin Backing. *Measurement*. 44, 1279-1283.
- Sreedhar, B. K., Albert, S. K. & Pandit, A. B. (2015) Cavitation erosion testing of austenitic stainless steel (316L) in liquid sodium. *Wear*. 328–329, 436–442.
- Tomita, Y. & Shima, A. (1986) Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse. *Journal of Fluid Mechanics*. 169, 535-564.

- Tong, R. P., Schiffers, W. P., Shaw, S. J., Blake, J. R. & Emmony, D. C. (1999) The role of 'splashing' in the collapse of a laser-generated cavity near a rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 380, 339-361.
- Tzanakis, I., Eskin, D. G., Georgoulas, A. & Fytanidis, D. K. (2014) Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble. *Ultrasonic Sonochemistry*. 21, 866-878.
- Vogel, A., Lauterborn, W. & Timm, R. (1989) Optical and acoustic measurements of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 206, 299-338.
- Wang, Y. C. & Brennen, C. E. (1994) Shock wave development in the collapse of a cloud of bubbles, ASME FED - Cavitation and Multiphase Flow. 194, 15-20.
- Wang, Y. C. & Chen, Y. W. (2007) Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 32, 403-414.
- Zhukovsky, N. Y. (1898) Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg. 8, 9(5), 1-71.
- Znidarcic, A., Mettin, R., Cairos, C. & Dular, M. (2014) Attached cavitation at a small diameter ultrasonic horn tip. *Physics of Fluids*, 26, 023304.

# **PUBLIKACE AUTORA**

- Müller, M., Hujer, J., Kotek, M. & Zima, P. (2012) Identification of collapse patterns of cavitation bubbles close to a solid wall. In: Vít, T., Dančová, P., Novotný, P. (eds.). *Experimental Fluid Mechanics* 2012, 20.-23. 11. 2012, Hradec Králové, Czech Republic. Technická univerzita v Liberci, Liberec, pp. 494-497.
- Hujer, J. (2013) Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů. In: Workshop pro doktorandy FT a FS TUL, 18.-20. 9. 2013, Rokytnice nad Jizerou, Česká republika. Technická univerzita v Liberci, Liberce, pp. 150-154.
- Hujer J. (2015) The testing of a epoxy protective layer for a cavitation measurement. In: Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Flow 2015. 11.-12. 6. 2015, Plzeň, Czech Republic. Západočeská Univerzita v Plzni, Plzeň.
- Hujer, J., Carrat, J.-B., Müller, M. & Riondet, M. (2015) Impact load measurement with a PVDF pressure sensor in an erosive cavitating flow. *Journal of Physics: Conference Series*. 656 (1), 012051, 4. doi:101088/1742-6596/656/1/012051.
- Müller, M., Styková, J. & Hujer, J. (2017) The improvement of the surface hardness of stainless steel and aluminium alloy by ultrasonic cavitation peening. *EPJ Web of Conferences*. 143, 02119, 4. doi: 10.1051/epjconf/201714302119.
- Hujer, J., Unger, J. & Müller, M. (2017) Identifikace erozního rizika při kolapsu kavitační bublinky na pevné stěně tlakového systému. In: *Tlak 2017: sborník referátů 14. - 16. února* 2017, Hotel Černigov, Hradec Králové. Medim, spol. s r.o., Líbeznice, pp. 151-160.
- Hujer, J. & Müller, M. (2018) Calibration of PVDF Film Transducers for the Cavitation Impact Measurement. *EPJ Web of Conferences*. 180, 02036, 4. doi: 10.1051/epjconf/201818002036.
- Hujer, J. & Müller, M. (2018) Spatial Distribution of the Cavitation Aggressiveness in a High Speed Cavitation Tunnel. In: Katz, J. (ed.). *Proceedings of the 10th International Symposium* on Cavitation (CAV2018). CAV18, 05189, 4. doi: 10.1115/1.861851\_ch179.
- Müller, M., Hujer, J. & Aidoo, E. O. (2018) Výzkum účinků kavitace s využitím akustických, optických a mechanických metod. In: Sigma Group a.s. *Teorie a praxe současné čerpací techniky: vědecko-technická konference pořádáná ke 150. výročí založení firmy: 1868-2018.* 30.5.2018, Lutín, Česká republika. Sigma Group a.s., Lutín, pp. 39-45.