



Měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzoru

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Matěj Burda

Vedoucí práce:

Ing. Jan Hujer, Ph.D.

Katedra energetických zařízení





Zadání diplomové práce

Měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzoru

Jméno a příjmení: **Bc. Matěj Burda**
Osobní číslo: S18000257
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

PVDF senzory patří mezi potenciálně vhodné senzory pro měření velmi rychlých dějů při kolapsu kavitační bubliny. Na TUL je v současné době vyvíjen PVDF senzor vyrobený fotolitografickou technikou. Tato práce by měla téma rozvinout a předpokládají se prvotní měření účinku kavitační bubliny na pevné stěně pomocí tohoto druhu PVDF senzorů.

Práce bude vypracována v těchto krocích:

1. Rešerše na téma kolabujících kavitačních bublin, měření jejich účinku a impaktních senzorů.
2. Výroba PVDF senzoru z folie a jeho příprava pro měření.
3. Kalibrace senzoru.
4. Měření účinku kavitační bubliny kalibrovaným senzorem.
5. Vyhodnocení měření a diskuze výsledků.

Rozsah grafických prací: –
Rozsah pracovní zprávy: 60
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

Brdička, M., Samek, L. & Taraba, O. (1981) Kavítace, Diagnostika a technické využití. Praha, SNTL.
Franc, J.-P. & Michel, J.-M. (2004) Fundamentals of cavitation. Dordrecht, Kluwer.
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.
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.
Okada, T., Iwai, Y. & Awazu, K. (1989) A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 1: A method for measurement of collapse pressures. *Wear*. 133, 219-232.
Piezo Film Sensors Technical Manual (1999), Norrsitown, Measurement Specialties.

Vedoucí práce: Ing. Jan Hujer, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. prosince 2021

Bc. Matěj Burda

Poděkování

Mé poděkování patří všem, kteří během zpracování této diplomové práce stáli při mně a byli mi oporou, konzultovali se mnou problémy a dodávali mi motivaci, když jí byl nedostatek. Velký dík si zaslouží také ti, kteří svou životní dráhu zasvětili kavitaci, mnohdy opomíjenému fyzikálnímu tématu.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2020-5028.

Měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzoru

Anotace

Diplomová práce se zaměřuje na měření účinku kolabujících kavitačních bublin v blízkosti pevných stěn. Pro měření v rámci experimentu byly použity PVDF senzory vyrobené fotolitografickou metodou. PVDF senzory byly zkalibrovány metodou pádu kuličky. Na základě získané kalibrační závislosti bylo možné ze zaznamenaného signálu elektrického napětí určit sílu působící na pevnou stěnu vlivem kolapsu bubliny. Výsledkem měření byl vztah velikosti síly od prvního a druhého kolapsu bubliny v závislosti na velikosti bubliny a její vzdálenosti od pevné stěny. V rámci měření se potvrdilo, že PVDF senzory vyrobené fotolitografickou metodou umožňují měření účinků kavitačních bublin. Výsledné hodnoty působících sil od kolapsů bublin a také rozdělení energií mezi prvním a druhým kolapsem odpovídá měřením provedeným v dalších výzkumech.

Klíčová slova: kavitace, dynamika bubliny, kolaps, PVDF senzor, fotolitografie

Cavitation bubble impact measurement using PVDF sensors

Abstract

This diploma thesis is focused on the measuring of the effect of collapsing cavitation bubbles in the surroundings of solid walls. PVDF sensors – made by photolithographic method – were used for experimental measurements. PVDF sensors were calibrated by the ball-drop method. On the basis of the obtained calibration dependence, it was possible to determine the force acting on the solid wall due to the collapse of the bubble from the recorded voltage signal. The result of the measurement was the relationship of the magnitude of the force from the first and second collapse of the bubble, depending on the size of the bubble and its distance from the solid wall. The measurements confirmed that PVDF sensors produced by the photolithographic method allow the measurement of the effects of cavitation bubbles. Resulting values of the acting forces of the collapse of the bubbles as well as the distribution of energies between the first and the second collapse correspond to the measurements made in previous research.

Key words: cavitation, bubble dynamics, collapse, PVDF sensor, photolithography

Obsah

1	Úvod	12
2	Kavitace	13
2.1	Definice a podstata kavitace.....	13
2.2	Dynamika kavitační bubliny	15
2.3	Život reálné kavitační bubliny	17
2.4	Chování bubliny v blízkosti pevné stěny	18
2.5	Měření účinku kolabující kavitační bubliny	21
2.5.1	Měření pomocí impaktních senzorů	21
2.6	Generování kavitační bubliny	22
2.6.1	Akustická metoda	22
2.6.2	Generování bubliny laserem	23
2.6.3	Generování bubliny přechodovým odporem	23
3	PVDF film	25
3.1	Vlastnosti materiálu	26
3.2	Výroba PVDF senzoru	27
3.2.1	Fotolitografická metoda	28
3.3	Princip měření	32
3.4	Kalibrace	34
3.4.1	Metoda pádu kuličky	34
4	Experimentální sestava	38

5	Experiment	42
5.1	Kalibrace PVDF senzorů.....	42
5.2	Průběh experimentu	43
5.3	Analýza chování bublin v blízkosti pevné stěny.....	45
5.4	Vyhodnocení experimentu	49
6	Závěr.....	55
	Seznam použité literatury	57
	Zdroje obrázků.....	59
	Seznam příloh.....	60

Seznam zkratek

BNC	Bayonet Naur Connector
CCD	Charge-coupled device
KEZ	Katedra energetických zařízení
NI	National Instruments
PCI	Peripheral Component Interconnect
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
TUL	Technická univerzita v Liberci

Seznam značek a symbolů

γ	distanční parametr (1)
μ	dynamická viskozita (Pa·s)
ρ	hustota (kg·m ⁻³)
σ	povrchové napětí (N·m ⁻¹)
τ	čas působení na senzor (s)
d_{33}	nábojová konstanta (C·N ⁻¹)
F	síla (N)
F_{\max}	maximální síla působící na senzor (N)
$F_{\text{stř}}$	střední síla působící na senzor (N)
g	tíhové zrychlení (m·s ⁻²)
h	výška kalibrační kuličky (m)
L	vzdálenost středu bubliny od pevné stěny (m)
m	hmotnost kalibrační kuličky (kg)
p	tlak (Pa)
p_B	tlak směsi plynu a páry v bublině (Pa)
p_{int}	koeficient integrační meze
p_{∞}	ustálený tlak kapaliny (Pa)

R	poloměr kavitační bublinky (m)
R_0	poloměr kavitačního zárodku (m)
R_{\max}	maximální poloměr bubliny (m)
R/R_0	poměr poloměru kavitační bubliny a jejího počátečního poloměru (1)
t	čas (s)
t_{kol}	čas kolapsu bubliny (s)
T	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
U	napětí (V)
U_{\max}	maximální napětí působící na senzor (V)
$U_{\text{stř}}$	střední napětí působící na senzor (V)
v	rychlost kalibrační kuličky ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

1 Úvod

Kavitaci lze zjednodušeně chápat jako proces tvorby, aktivity a kolapsu bublin v kapalině, který se projevuje v řadě technických zařízení, ať už se jedná o turbíny, čerpadla, ventily nebo armatury. V důsledku kavitačních bublin jsou části strojů a zařízení krátkodobě extrémně namáhány, což způsobuje tzv. kavitační erozi, tedy destruktivní proces na povrchu materiálu. Z tohoto důvodu je nutné kavitaci a s ní spojenou aktivitu bublin lépe pochopit, minimalizovat účinky kavitační eroze a nalézt lepší metody pro diagnostiku průběhu tohoto jevu. Mezi potenciálně vhodné senzory pro měření velmi rychlých dějů, které probíhají při jevu kavitace, patří filmový senzor vyrobený z polymeru polyvinylidenfluoridu (PVDF) fungující na základě piezoelektrického jevu. V této práci bude pro měření silového účinku kolapsu kavitační bubliny využit PVDF senzor vyráběný v rámci Technické univerzity v Liberci (TUL) fotolitografickou metodou, jehož vlastnosti a možnosti použití při měření kolapsů kavitační bubliny dosud nebyly testovány na rozdíl od průmyslově vyráběných PVDF senzorů. V rámci studia kavitace je vhodné dodat, že ačkoli je kavitace běžně chápána jako nežádoucí jev v souvislosti s kavitační erozí, lze ji využít i naopak, např. pro řízené čištění povrchů v těžko dostupných místech.

Záměrem této diplomové práce je rozvinout znalosti v oblasti měření chování kavitačních bublin v blízkosti pevné stěny pomocí PVDF senzorů vyráběných fotolitografickou technikou. V rámci teoretické části bude provedena rešerše na téma kolabujících kavitačních bublin a měření jejich účinku pomocí impaktních senzorů. Následně bude rozebrán princip, výroba a příprava měření pomocí PVDF senzoru. V rámci praktické části bude vysvětlena kalibrace senzorů, průběh experimentu a vyhodnocení výsledků ve formě síly interakce bubliny v blízkosti pevné stěny.

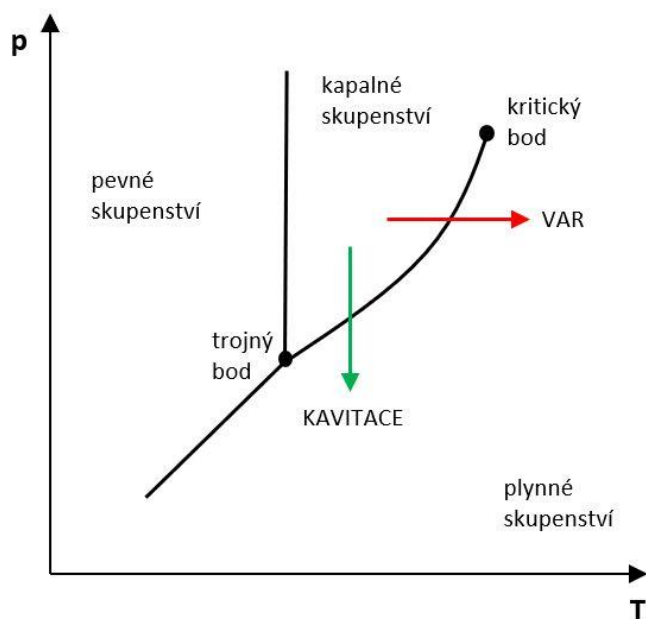
Diplomová práce navazuje na rozsáhlý výzkum v oboru kavitace, který dlouhodobě probíhá na Katedře energetických zařízení (KEZ) na TUL a dává do souvislostí, v technických oborech dosud málo propojené, poznatky.

2 Kavítace

2.1 Definice a podstata kavítace

Kavítace jako jeden ze základních procesů fázových přeměn spočívá v přechodu mezi kapalnou a plynnou fází a je často chápána jako nežádoucí. Franc a Michel (2004) popisují kavítaci jako obor zabývající se dutinami, resp. bublinami, v homogenním kapalném prostředí. Tyto kavitační bubliny se mohou vytvořit na kavitačních zárodcích, tedy již vzniklých stabilních bublinkách v kapalině či na dalších látkách obsažených ve zkoumaném prostředí. Bubliny v kapalině při snižujícím se tlaku vznikají, následně rostou a v mezních případech dochází k jejich kolapsům a s nimi spojeným efektům.

Lépe lze kavítaci pochopit z fázového diagramu p-T (Obrázek 1), který zobrazuje fázové přeměny v závislosti na tlaku a teplotě. Snižováním tlaku v kapalně fázi až na křivku nasycení dosáhne kapalina tlaku nasycených par. Při dalším snižování tlaku začíná fázová přeměna z kapalně do plynně fáze, tedy proces vypařování. Začínají vznikat a růst bubliny. Ty jsou tvořeny buď parou, plynem nebo jejich směsí. Jak uvádí Müller (2008), bubliny plněné plynem mohou vznikat snížením tlaku, zvyšováním teploty nebo přenosem hmoty skrze stěnu bubliny. Vznik parních bublin při dodávání tepla za téměř konstantního tlaku se nazývá var. Na rozdíl od varu během kavítace není teplo dodáváno a děj probíhá za téměř konstantní teploty. Překonáním pevnosti kapaliny v tahu vznikají dutiny v kapalině – kavitační bubliny, jež jsou tvořeny převážně parou. Tento jev více popisuje Brdička (1981).



Obrázek 1 Fázový diagram pro vodu (Matěj Burda, 2021)

Chování kavitační bubliny se liší v závislosti na fázi jejího cyklu a může mít různý průběh. Obecně bublina splňující rovnici statické rovnováhy bubliny (Brdička, 1981) po vzniku svůj stav nemění nebo stoupá k volné hladině, kde zanikne. Na rozdíl od statických bublin mají nestabilní bubliny po růstu bouřlivý projev a dochází k růstům objemu a vícenásobným kontrakcím, které jsou doprovázeny dílčími a finálním kolapsem bubliny. Následně sledujeme rázovou vlnou, silové působení a další efekty, které budou popsány v následujících kapitolách.

Vzhledem k méně obsáhlému názvosloví bývají často pojmem kavitace myšleny její přímé dopady, tedy efekty, které způsobuje kolaps kavitační bubliny.

Jedním z hlavních projevů kavitace je kavitační eroze – destruktivní proces na povrchu materiálu v důsledku sil působících od kolabujících bublin. To můžeme pozorovat například na lopatkách turbín, oběžných kolech čerpadel a dalších strojích a zařízeních. V praxi nedochází ke kolapsu pouze jediné bubliny. Většinou kolabuje mrak bublin a kavitace probíhá delší čas. Právě delším působením kavitace vznikají na strojích a zařízeních viditelné projevy destrukce materiálu. Mezi další efekty doprovázející zánik bublin patří také hluk, mechanické vibrace nebo nárůst teploty řádově až na tisíce kelvinů. Na druhou stranu má kavitace i přínosné využití k mechanickému zpevnění

povrchů. Toho se však přirozenou cestou dosáhne obtížně a je nutné generovat kavitaci daných parametrů, aby nedošlo k nežádoucí erozi materiálu.



Obrázek 2 Kavitační eroze na lopatce vrtule (Peters, 2019, s. 30)

2.2 Dynamika kavitační bubliny

Vzhledem k potřebě pochopit dynamické chování kavitační bubliny, průběhu jejího vzniku, vývoji růstů a kolapsů se snažila řada vědců vytvořit model, který by dané případy popisoval. To se podařilo Rayleighovi na počátku 20. století, později jeho model vylepšil Plesset (Franc a Michel, 2004). Jejich teorie spočívala v řešení bilance hmotnosti, momentu, energie a entropie v prostoru a čase. V některých případech je pro zjednodušení problému nutné použít řadu předpokladů – například uvažování kulové bubliny v nekonečně rozlehlém objemu kapaliny, střed bubliny fixovaný ve stálé poloze, zanedbání gravitačních sil či přenosu tepla a hmoty. Z těchto předpokladů vyplývají parametry jednotlivých činitelů Rayleigh-Plessetovy rovnice (rovnice 1). Objem bubliny o poloměru bubliny R je naplněn směsí plynu a páry o tlaku p_B , okolní kapalina má hustotu ρ , dynamickou viskozitou μ a je charakterizována povrchovým napětím σ . Tlak p_∞ je uvažován v ustálené hodnotě od bubliny.

$$p_B(t) - p_\infty(t) = \rho \left[R \cdot R'' + \frac{3}{2} \cdot R'^2 \right] + \frac{2 \cdot \sigma + 4 \cdot \mu \cdot R'}{R} \quad 1$$

Rayleigh-Plessetova rovnice je nelineární diferenciální rovnicí a udává závislost růstu poloměru bubliny a následně i tlakového pole v okolní kapalině v závislosti na čase při daném tlakovém poli p_∞ . Při zanedbání viskozity kapaliny a povrchového napě-

tí, uvažování konstantního tlaku v ustálené hodnotě od bubliny a nekondenzující páry uvnitř bubliny, lze rovnici zjednodušit na tzv. Rayleighovu rovnici (rovnice 2), kde R_0 je poloměr kavitačního zárodku.

$$R' = -\sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_\infty - p_B(t)}{\rho} \cdot \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right]} \quad 2$$

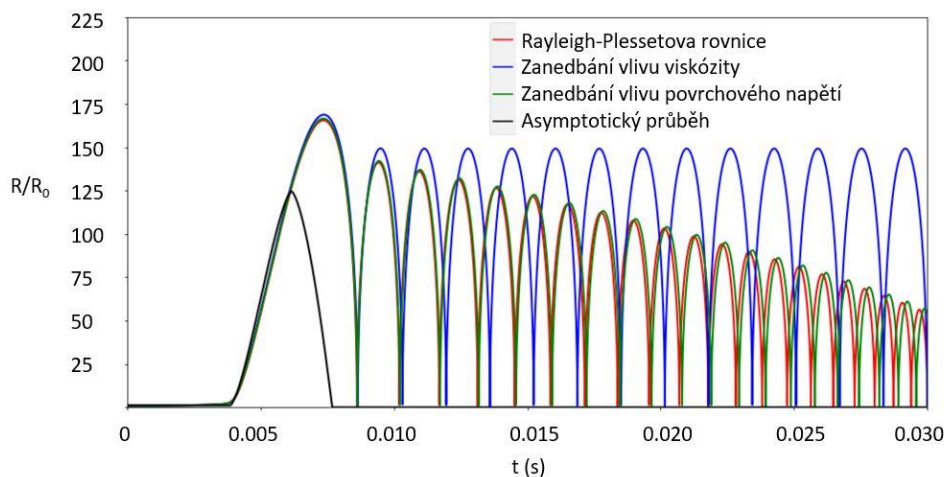
Rayleighova rovnice v tomto tvaru je platná za předpokladu, že p_B je menší než p_∞ . Bublina zmenšuje svou velikost, dochází k jejímu kolapsu, tedy poklesu poloměru až na nulovou velikost a k zániku s tím spojenému. Zároveň lze integrací Rayleighovy rovnice odvodit čas, za který ke kolapsu bubliny dojde, viz rovnice pro t_{kol} .

$$t_{kol} \cong 0,915 \cdot R_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty - p_B}} \quad 3$$

V opačném případě, kdy je tlak p_B větší než p_∞ , bublina roste, ovšem její růst je řízen následující rovnicí.

$$R' = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_B(t) - p_\infty}{\rho}} \quad 4$$

Obrázek 3 zobrazuje výše popsané chování kavitační bubliny dle Rayleigh-Plessetovy rovnice. Udává modelový příklad závislosti vývoje poloměru kavitační bubliny k jejímu počátečnímu poloměru vztažené na časový vývoj. S užitým koeficientem tlumení lze v grafu vidět střídající se fáze růstu bubliny a jejího zmenšování, které končí jejími dílčími kolapsy.



Obrázek 3 Rayleigh-Plessetova rovnice (Shah a kol., 2018, s. 9, upraveno)

2.3 Život reálné kavitační bubliny

Předpoklady užitě v předchozích odstavcích v rámci teorie Rayleigha a Plesseta ovšem zcela nevystihují chování reálné kavitační bubliny. Reálná bublina nemá po většinu svého životního cyklu kulový tvar, ale prochází řadou asymetrických stavů, které výrazně ovlivňují její další působení v kapalině. Chování bubliny výrazně ovlivňují vlastnosti okolní kapaliny.

Rostoucí dynamická viskozita kapaliny výrazně tlumí oscilaci bublin a snižuje rychlost jejich růstů i kontrakcí. Vliv na rychlost růstu a kontrakce bublin má i povrchové napětí na hranici bubliny s kapalinou. Vyšší povrchové napětí pomáhá udržet kulový tvar bubliny a zároveň snižuje rychlost růstu bubliny především během začátku jejího zvětšování. Stejným způsobem funguje vyšší povrchové napětí také při kontrakci bubliny, kdy naopak rychlost jejího zmenšování zvyšuje. Jak uvádí Müller (2008), velký vliv na chování kavitační bubliny má také stlačitelnost okolní kapaliny. Numerickými simulacemi byla spočtena rychlost kolapsu bubliny ve stlačitelné kapalině o řád nižší než v kapalině nestlačitelné.

Hlavním činitelem, který ovlivňuje kulový tvar bubliny, je silové působení – může se jednat o tíhové síly nebo tlakové gradienty v okolní kapalině. Charakteristika tlakového pole v blízkosti bubliny je ovlivněna také blízkostí jiných těles, ať už se jedná o pevné stěny nebo další bubliny. V praxi se totiž kavitace neprojevuje jako interakce

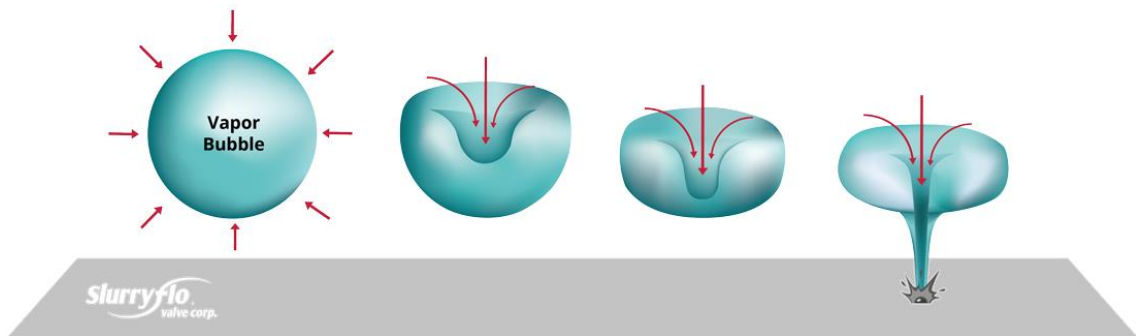
jedné kavitační bubliny s okolím, ale jedná se většinou o více bublin nebo tzv. mrak bublin, v němž mezi sebou jednotlivé bubliny. Samotná přítomnost bublin v kapalině způsobuje změnu její stlačitelnosti. Jednotlivé kolabující bubliny v kapalině výrazně silově působí na ty ostatní. Velikost tohoto jevu záleží na jejich vzdálenosti a velikosti síly kolapsu.

2.4 Chování bubliny v blízkosti pevné stěny

Pro pochopení principu fungování kavitační eroze je nutné vědět, jaké je dynamické chování bubliny v blízkosti pevných stěn. Právě povrchy stěn jsou při kolapsu kavitační bubliny vystaveny velkým silovým účinkům, které mohou vést k následné destrukci povrchu. Dynamiku bubliny lze nejlépe demonstrovat na případu osamocené bubliny, která reaguje především s blízkou stěnou. Toto je provedeno i v rámci této diplomové práce během experimentu popsaného v kapitolách 4 a 5. V případě výskytu více bublin či mraku bublin v blízkosti pevné stěny je studium jejich kolapsů a chování o poznání náročnější. Přesto principiálně vychází právě z chování osamocené bubliny. Pokud je bublina v blízkosti pevné stěny nebo nějaké jiné překážky, její kulový tvar může být narušen (Müller, 2008). To je dáno především vlivem nerovnoměrného rozložení tlakového pole v okolí bubliny. Zároveň se ve většině případů bublina posunuje směrem k pevné stěně z důvodu nižšího tlaku mezi bublinou a pevnou stěnou, tudíž její střed nemůžeme v globálním měřítku uvažovat v konstantní vzdálenosti od stěny.

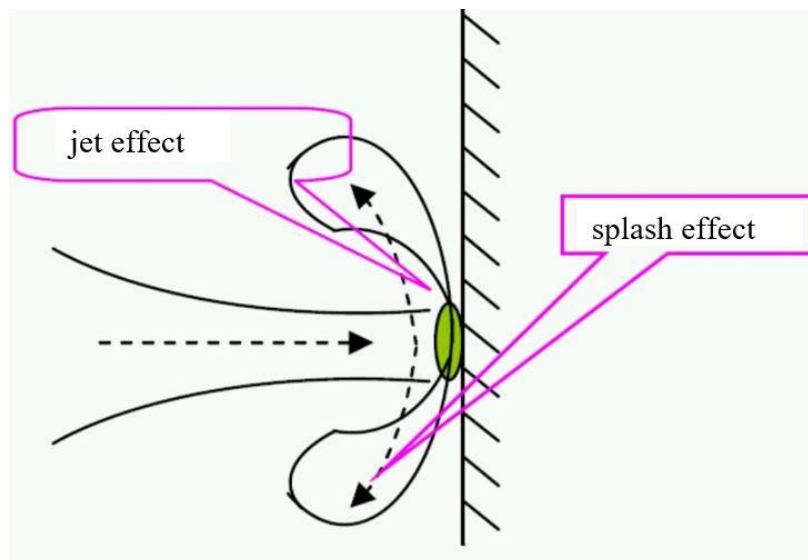
Všeobecně dochází během kolapsu bubliny ke třem jevům, které mají významný vliv na velikost účinků kolabující kavitační bubliny, a sice „jet effect“, „splash effect“ nebo rázové vlně. Při kolapsu bubliny vzniká rázová vlna s intenzitou stovek megapascalů a trváním v řádu mikrosekund. Ta je způsobena kompresí plynné části bubliny a lokálním zvýšením teploty (Hujer, 2019). V blízkosti pevné stěny, jak uvádí Franc a Michel (2004), se přivrácená strana bubliny zplošťuje, zatímco na odvrácené straně se vlivem nerovnoměrně rozloženého tlakového pole vytváří prohlubeň. Povrch prohlubně s větším zakřivením kolabuje rychleji a s rychle rostoucí rychlostí dochází k vytvoření proudu směrem k pevné stěně. Proud s rychlostí desítek až stovek metrů za sekundu prorazí stěnu bubliny přilehlou pevné stěně a roztříští se o ni. Tento jev se na-

zývá „jet effect“ a je to jeden z činitelů kavitační eroze materiálu. Schematické znázornění jet effectu je zobrazeno níže.



Obrázek 4 Ukázka formování jet effectu při kolapsu bubliny (zdroj: webová stránka slurryflo.com)

Dalším jevem, který může doprovázet jet effect je tzv. „splash effect“, jak popisuje např. Tong a kol. (1999). Bublina působením jet effectu změnila svůj tvar na tvar podobný toroidu. Kraje bubliny jsou pak při současném zmenšování objemu bubliny a nízkým tlakem mezi bublinou a pevnou stěnou přitlačovány k pevné stěně, do které „plácnou“, jak zobrazuje Obrázek 5. Dle měření Wanga a Chena (2007) spolu se snižujícím se γ (viz rovnice 5), klesá také účinek splash effectu.



Obrázek 5 Schematické znázornění jet effectu a splash effectu (Shenq-Yuh, 2009, upraveno)

Jet effect a splash effect ovšem nastávají při kolapsu bubliny pouze v některých případech. Obecně se k popisu podmínek kolapsu bubliny v blízkosti pevné stěny používá bezrozměrný parametr γ , který je dán podílem počáteční vzdálenosti středu bubliny od pevné stěny a maximálním poloměrem bubliny před začátkem kolapsu bubliny – viz rovnice 5. Tento distanční parametr ovlivňuje jak charakter kavitačního poškození, tak velikost tlakových polí působících na pevnou stěnu.

$$\gamma = \frac{L}{R_{max}} \quad 5$$

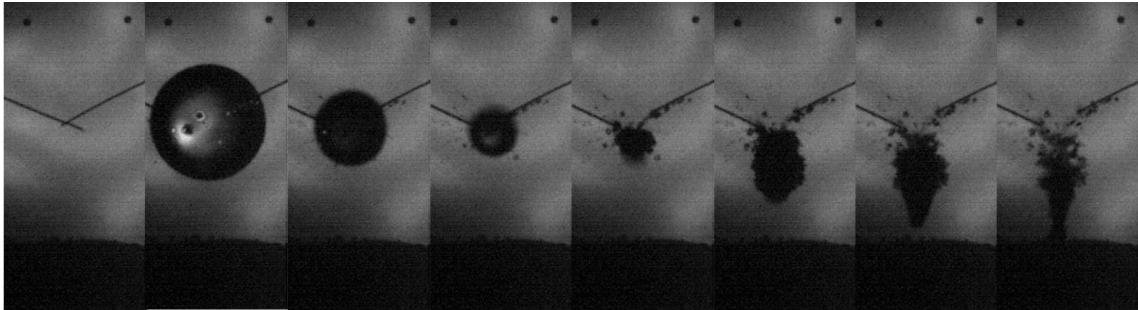
V závislosti na velikosti distančního parametru lze popsat čtyři základní formy chování bubliny během kolapsu, které popisuje Sarkar (2019). V případě $\gamma \leq 0,6 \sim 0,7$ je bublina připojena k pevné stěně během jejího růstu. S nástupem kolapsu a klesajícím objemem bubliny se formuje jet středem bubliny ve směru do pevné stěny. Proud skrz prstencový tvar bubliny narazí do stěny svou maximální rychlostí, neboť mezi ním a pevnou stěnou není žádná kapalina, která by ho zpomalila, bublina se zhroutí během prvního kolapsu a rozpadne se na mikrobubliny.

Druhý vzor chování je zaznamenán v intervalu $0,8 \leq \gamma \leq 1,2$. Bublina roste velmi blízko pevné stěny a spolu s růstem se vlivem působení pevné stěny přiléhající část bubliny zplošťuje. Jak uvádí např. Tong (1999), při tomto nastavení se očekávají dvě rázové vlny. Při prvním kolapsu ještě nedojde k úplnému zhroucení bubliny, následují opětovné růsty bubliny a přibližování se středu bubliny ke stěně. V závěrečné fázi zhroucení bubliny je možné zaznamenat splash effect, jak zaznamenali také Wang a Chen (2007), a následný rozpad bubliny na mikrobublinky rozstříkující se ve směru od pevné stěny.

Při zvětšování distančního parametru na hodnotu $1,2 \leq \gamma \leq 2,1$, kterou v obdobném rozmezí udává také Hujer (2013), probíhá již kolaps bubliny ve větší vzdálenosti od stěny. Během prvního kolapsu se ještě před zmenšením bubliny na nejmenší poloměr, tvoří jet směřující k pevné stěně, který prorazí bublinu (Wang a Chen, 2007). Ta je následně přitažena ke stěně a dochází k dalším kolapsům a kolapsům mikrobublin.

Pro případ, že je již bublina od stěny více vzdálená, tj. $\gamma > 2,1$ je ovlivnění samotné bubliny pevnou stěnou menší. Přesto po prvním zhroucení může dojít k tvorbě jetu, který je však již více zpomalen vrstvou kapaliny mezi bublinou a pevnou stěnou.

V některých případech pak jet vůbec vzniknout nemusí a bublina se po několika dílčích kolapsech zhroutí. Její silové působení na pevnou stěnu je pak mnohem menší než u ostatních případů.



Obrázek 6 Sekvence snímků růstu a kolapsu bubliny s viditelným jetem při $\gamma = 1$
(Matěj Burda, 2021)

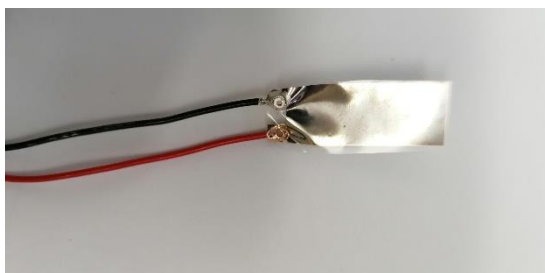
2.5 Měření účinku kolabující kavitační bubliny

Jednou z dalších možností, jak měřit nepřímo síly a tlaky vyvolané kolapsem kavitační bubliny, je zjišťovat kavitační účinky na základě analýzy kavitační eroze. Po kolapsu bubliny zůstane ve vzorku díra, z jejíž parametrů můžeme zjistit účinky na základě analýzy, tzv. pittingu. Pittingem rozumíme zjištění průměru a hloubky díry ve vzorku. Nebo na základě vysokorychlostního snímkování, ze kterého lze odečíst parametry jet effectu, jak uvádí např. Tzanakis a kol. (2014). Tyto metody jsou ovšem nevhodné k porovnání s měřením kavitačních účinků pomocí impaktních senzorů, protože ty měří parametry přímo a nepracují s bezprostředním poškozením vzorku.

2.5.1 Měření pomocí impaktních senzorů

Existuje řada materiálů, které fungují jako impaktní senzory a dokážou měřit účinky kolapsu kavitační bubliny. Může se jednat např. o piezokeramiku, pomocí které měřili Okada a kol. (1989) nebo Hattori a kol. (2010). Často využívané jsou také PVDF senzory. Na rozdíl od metod měření důsledku kolapsu bubliny ve formě kavitační eroze je možné přímým měřením zaznamenat také slabší kolapsy, které by při jednorázovém působení erozi nezpůsobily. Kolaps bubliny je velmi rychlý proces, a právě PVDF senzory díky své vysoké vlastní frekvenci jsou pro toto měření vhodné. Na základě piezo-

elektrického jevu je možné pomocí kalibrovaného senzoru převést naměřené elektrické napětí na sílu, případně akustický tlak. Výsledná síla je dopočítána na základě kalibrační závislosti. Ze špiček napěťového signálu lze následně zjistit odpovídající maximální účinek kolapsu bubliny. Filmové druhy senzorů se lepí přímo na pevnou stěnu do místa, kde bublina kolabuje. V praxi se ukazuje, že v tomto případě je výhodnější měřit sílu než zjišťovat tlak, jak uvádí např. Franc a Michel (2004). Oblast působení bubliny je totiž v porovnání s velikostí senzoru výrazně menší, čímž je určení správné oblasti tlakového působení obtížné. Vedle filmových PVDF senzorů lze použít např. jehlové hydrofony, které jsou vyrobeny ze stejného materiálu a použil je ve své diplomové práci Hujer (2013). Jehlový hydrofon snímá tlak v kapalině, není však pomocí něj možné měřit přímé působení bubliny na pevnou stěnu, ale pouze zachytit rázové vlny v jejím okolí. Signál z hydrofonu je navíc nutné zesílit zesilovačem. Výsledná hodnota působící síly je zjištěna přepočtem z naměřeného napětí a známé citlivosti hydrofonu. Podrobně je princip fungování PVDF senzorů popsán v kapitole 3.



Obrázek 7 PVDF filmový senzor s vodiči (Matěj Burda, 2021)

2.6 Generování kavitační bubliny

Za účelem zkoumání kavitačních dějů není praktické provádět výzkum na dějích přirozené kavitace, které většinou nejsou vhodně situované pro měření. Proto se v laboratorním prostředí používají metody generující umělou kavitaci, ať už se jedná o osamocené kavitační bubliny nebo mraky bublin.

2.6.1 Akustická metoda

Kavitace nazývaná jako akustická spočívá ve vytvoření tlakových, většinou vysokofrekvenčních akustických vln v kapalině, které ji rozkmitají a vyvolají pokles tlaku

a vznik bublin. V tomto případě ovšem vzniká velké množství bublin, které neumožňuje jednoduché sledování dynamiky bublin jako je tomu v případech osamocené bubliny. Pro tento účel se využívají zařízení přímo generující akustický signál jako např. piezoelektrické měniče nebo přístroje, kmitáním jejichž částí vznikne akustické vlnění. Výhodou této metody je, na rozdíl od dalších metod, neovlivnění oblasti bublin tepelnými jevy.

2.6.2 Generování bubliny laserem

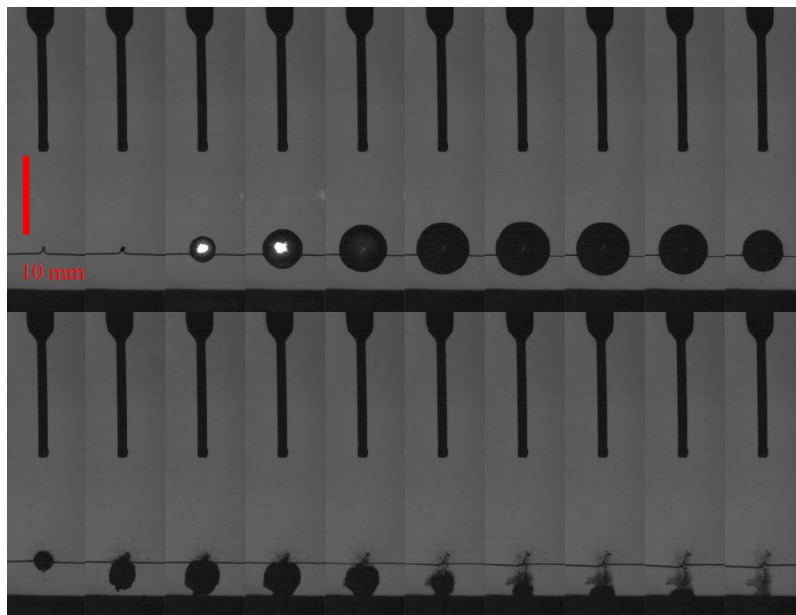
Laserová metoda generování bublin je druhem optické kavitace a spočívá v generování pulzu koherentního monochromatického světelného paprsku s délkou trvání v řádech jednotek nanosekund. Svazek je zaostřen přes objektiv (např. mikroskopu) a přes čočky soustředěn do jediného bodu uvnitř kapaliny. Působení laserového paprsku zaměřeného do jednoho místa způsobí lokální zahřátí kapaliny, vznik plazmy a parní bubliny. Čím větší je energie laserového paprsku dodaná do místa vzniku bubliny, tím větší velikost bubliny je. Vlivem plošného, nikoli bodového, zaměření paprsku, který má nejvyšší intenzitu ve svém jádru, nevznikají ryze kulové bubliny. Jejich tvar je vlivem nerovnoměrného rozložení energie mírně elipsoidní.

2.6.3 Generování bubliny přechodovým odporem

Podobně, jako u generování bublin laserem, využívá metoda generování bubliny přechodovým odporem transformaci elektrické energie. Tato technika vzniku bublin je v rámci výzkumu KEZ na TUL využívána řadu let, a proto jsou již dobře známé její vlastnosti a omezení.

Jak uvádí ve své práci Hujer (2013), průchodem elektrické energie přes dvě dotýkající se elektrody vzniká v místě dotyku velký přechodový odpor a je generována tepelná energie, známá též jako Jouleovo teplo. V důsledku uvolnění tepla se kapalina ohřívá a vznikající páry vytváří osamocenou bublinu. Aby bylo možné generovat bubliny, předchází obvodu kondenzátory. Kondenzátory jako zásobárny energie jsou nabitý ze zdroje stejnosměrného elektrického napětí a následně je možné jejich energii vybitím najednou přivést do místa dotyku elektrod. Základními parametry ovlivňujícími velikost výsledné bubliny jsou velikost přechodového odporu, energie uvolněná do elektrod,

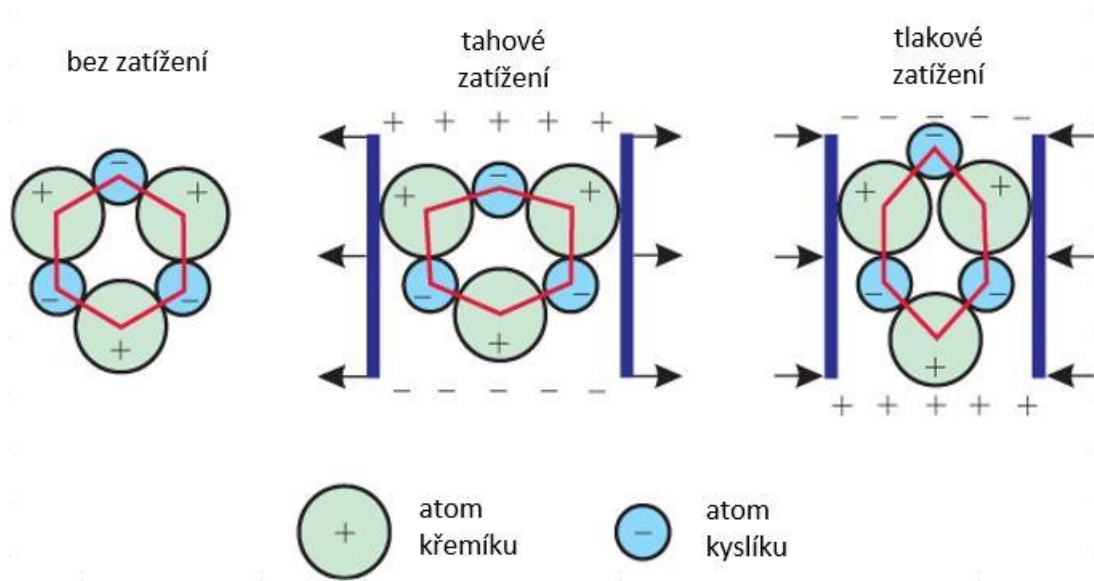
vodivost kapaliny apod. Přechodový odpor je tím větší, čím menší je velikost styčné plochy elektrod. Velikost energie akumulované v kondenzátorech je pak přímo úměrná velikosti generované bubliny (Hujer 2013). Obrázek 8 ukazuje životní cyklus takto generované kavitační bubliny v blízkosti pevné stěny s parametry nastavení: napětí 40 V, parametr $\gamma = 1,5$ a maximální výsledný poloměr $R_{\max} = 3,816$ mm. Na obrázku je možné vidět vznik bubliny v místě dotyku elektrod, v dolní části snímků je černě snímána pevná stěna, v horní části pak jehlový hydrofon pro měření tlaku. Časový krok mezi snímky poskládanými za sebe je 100 μs .



Obrázek 8 Bublina generovaná přechodovým odporem (Hujer, 2013, s. 65)

3 PVDF film

Polyvinylidenfluorid je polymerní materiál a řadí se do podkategorie piezoelektrických materiálů umožňujících převod mechanického napětí (deformace) na elektrický náboj a jemu ekvivalentní elektrické napětí. Piezoelektrický jev spočívá v posunu iontů v materiálu a následného vygenerování měřitelného elektrického napětí. U materiálů s krystalickou mřížkou, která nemá střed symetrie, mezi něž se řadí i PVDF, jsou vlivem mechanického namáhání přesouvány ionty v rámci mřížky. Zatímco v klidovém stavu je elektrický stav materiálu neutrální, jeho deformací se od sebe vzdálí těžiště kladných a záporných iontů. To způsobí vznik elektrického dipólu, tedy generování elektrického napětí (Koukolík, 2013). Popsaný jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. Piezoelektrické materiály se mohou chovat také opačně, kdy se vlivem působení vnějšího elektrického napětí deformuje krystalová mřížka materiálu, v tomto případě se mluví o nepřímém piezoelektrickém jevu. Obrázek 9 zobrazuje princip piezoelektrického jevu při mechanickém namáhání krystalu křemene.



Obrázek 9 Piezoelektrický jev – bez zatížení (vlevo), při působení tahu (uprostřed), při působení tlaku (vpravo) (zdroj: webová stránka Tired Tires, upraveno)

Piezoelektrické materiály lze namáhat v několika režimech kombinovaného namáhání. Každému režimu měření pak odpovídá jiný druh piezoelektrické nábojové kon-

stanty, která vyjadřuje vztah mezi plošnou hustotou náboje a mechanickým namáháním působícím na materiál. Ekvivalentně lze také použít vztah přetvoření a vygenerovaného elektrického napětí. Pro příklad nábojová konstanta d_{33} , která zároveň odpovídá užití při experimentu v rámci této diplomové práce, udává směr generovaného náboje kolmého k ploše PVDF senzoru a zatížení ve směru tloušťkovém PVDF senzoru. První index tedy popisuje směr polarizace generované materiálem a druhý značí osu působícího mechanického napětí.

3.1 Vlastnosti materiálu

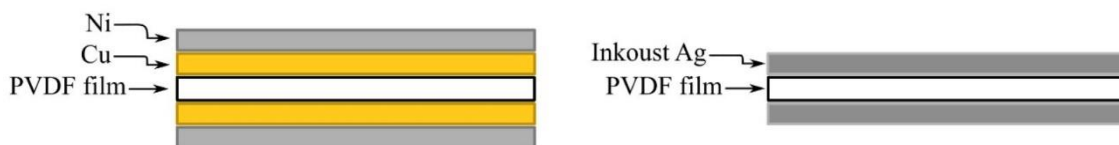
PVDF je chemicky stabilní materiál, odolává vlhkosti a má teplotní rozsah použitelnosti do 100 °C. Při vyšších teplotách už může být struktura materiálu porušena. Vyznačuje se vysokou mechanickou pevností a odolností proti nárazu. Tyto vlastnosti uvádí Piezo Film Sensors Technical Manual (1999). PVDF vykazuje vynikající vlastnosti jako převodní materiál v oblasti převodu elektrického napětí na další formy energie. Na základě Bauera (1995) bylo prokázáno, že PVDF má široký rozsah působnosti při vysokotlakém krátkodobém zatížení, které odpovídá jevům jako je kolaps bubliny. Běžné filmové PVDF senzory se vyrábějí o tloušťce 28 μm , což zajišťuje širokopásmový akustický výkon. Jak uvádí Wang a Chen (2007), v porovnání s piezokeramikou má nízkou akustickou impedanci velmi blízkou vodě, což umožňuje efektivní přenos akustického signálu a dobrou citlivost. Zároveň je díky vysokému koeficientu piezoelektrického napětí d_{33} , označovanému též jako nábojová konstanta, výstupní napětí 10krát vyšší než u piezokeramiky při stejné dodané energii. To zajišťuje možnost měřit i malé síly při výstupním napětí v dobře měřitelné oblasti při minimálním vlivu okolí. Základní vlastnosti PVDF jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1 Základní vlastnosti PVDF

Základní vlastnosti PVDF	
Název veličiny (jednotky)	
Teplotní rozsah (°C)	- 40 ÷ 100
Mez kluzu (MPa)	45 ÷ 55
Relativní permitivita (1)	12 ÷ 13
Nábojová konstanta d_{33} (pC·N ⁻¹)	23
Akustická impedance (Pa·s·m ⁻³)	2,7
Hustota (kg·m ⁻³)	1780

3.2 Výroba PVDF senzoru

PVDF senzor jako takový se skládá z několika částí – základem je substrát z PVDF filmu, ten by sám o sobě k měření požadovaných veličin nestačil. PVDF fólie se vyrábí již s nanesenou vodivou metalizační vrstvou, na kterou se dají připojit vodiče, a měřit tak piezoelektrické napětí vygenerované zatížením materiálu. Výhodou PVDF fólie je, že se z ní mohou vyrábět senzory různých velikostí a tvarů uzpůsobené konkrétnímu použití. Metalizační vrstvy slouží pro převedení vygenerovaného napětí z piezoelektrického materiálu. K metalizačním vrstvám jsou na obou elektrodách senzoru připevněny vodiče, které vygenerovaný signál převádí ke zpracování. Mezi základní druhy metalizace dle Piezo Film Sensors Technical Manual (1999) patří vrstvy stříbra, zlata, hliníku nebo mědi a niklu. Právě metalizace jsou nejcitlivější částí PVDF senzoru, protože vlivem manipulace může vrstva popraskat nebo může dojít k jejímu poškrábání. Celý senzor nebo jeho část pak není schopen přenášet vygenerované napětí a nelze pomocí něj provádět měření.



Obrázek 10 Ukázka různých metalizací na PVDF filmu – vlevo vrstva mědi a niklu, vpravo vrstva stříbrného inkoustu (Dudl, 2021, s. 22)

3.2.1 Fotolitografická metoda

Na Fakultě mechatroniky TUL se aplikuje fotolitografická metoda výroby PVDF senzorů. Fotolitografie neboli optická litografie, je soubor procesů, který se používá k tvorbě vodivých cest a plošných spojů. Podrobně proces fotolitografické metody výroby PVDF senzorů včetně charakteristiky užitých zařízení popisuje Dudl (2021). Průmyslová výroba spočívá ve vysekávání požadovaných tvarů z fólie pomocí děrovacího stroje. Komerční nabídka tvarů a velikostí senzorů ovšem často nestačí ke specializovaným použitím, proto je volnost ve výrobě fotolitografickou metodou velkou výhodou.

Základem fotolitografie je nanesení fotocitlivého materiálu neboli fotorezistu na základní materiál, v našem případě na polotovar PVDF filmu s metalizací. Fotorezist by měl k základnímu materiálu dokonale přilnout a zajišťovat zároveň jeho ochranu při dalších operacích. Na tuto sestavu se vloží neprůsvitná fotomaska, která zakryje části, které následně nebudou prosvětleny UV zářením. V našem případě je fotocitlivý materiál tzv. negativní fotorezist. To znamená, že působením UV záření proběhne na prosvětlených částech PVDF fólie chemická reakce, která fotocitlivý materiál vytvrdí. Tvary odpovídající výslednému tvaru senzoru jsou pevně spjaty s PVDF filmem. Díky tomu mohou být následně nevytvrzené části fotorezistu a vrstvy metalizace pod ním dalšími operacemi odstraněny a vznikne tak výsledný PVDF senzor. V případě pozitivního fotorezistu je reakce opačná a neosvětlené části fotorezistu se vytvrdí, zatímco zbylé lze následnými operacemi spolu s metalizací odstranit.

Pro výrobu PVDF senzorů pro měření v rámci této diplomové práce byla použita PVDF fólie společnosti TE Connectivity o velikosti A4, tloušťce 28 μm s metalizací CuNi (tloušťka Cu vrstvy 400 nm, tloušťka vrstvy Ni 150 nm). Z této fólie pak bylo

možné vyrobit 48 kusů obdélníkových senzorů velikosti 12 x 30 mm, které odpovídají průmyslovým PVDF senzorům užitým v diplomové práci Hujera (2013), aby bylo možné nastavit co nejvíce podobné podmínky pro měření. Pro lepší manipulaci s fólií při výrobě senzorů se pracovalo s částí fólie o velikosti A5 a proces se prováděl pro každou část zvlášť. Vlivem rizik při složité výrobě fotolitografickou metodou byly některé senzory zmetkovité, především z důvodu nedostatečného přilnutí fotorezistu nebo částečně poškozené metalizace.

Prvním krokem fotolitografické výroby senzoru byla laminace PVDF fólie na laminátoru RLM 419 P (Obrázek 11). PVDF fólie byla lepicí páskou připevněna na nosnou desku, aby při laminaci nedošlo vlivem malé tloušťky fólie k jejímu zkroucení nebo potrhání. Následně na ni byla při teplotě 95 °C nalaminována fólie, která se skládala z fotocitlivého materiálu o tloušťce 50 μm a ochranné celofánové fólie. Pro laminaci byl zvolen posun 0,3 m/min, neboť při vyšší rychlosti by nemuselo dojít ke správnému přilnutí fotorezistu na PVDF fólii. Zalaminovaná část fólie byla vyříznuta a laminace proběhla stejným způsobem také z druhé strany. Ze senzoru se následně sejmula celofánová ochranná fólie.



Obrázek 11 Laminátor RLM 419 P (Matěj Burda, 2021)

Další fází byla expozice fotocitlivého materiálu ve vakuové expoziční jednotce Hellas BUNGARD (Obrázek 12). Před samotnou expozicí byla připravena fotomaska, která určuje výsledný tvar vytvrzených částí fólie, resp. tvar senzorů. Fotocitlivá fólie byla napudrována, aby nedošlo k nechtěnému přilepení k fotomasce s následným možným odtrhnutím vytvrzené fólie. Mezi dvě vrstvy fotomasky byl vložen zalaminovaný PVDF film a viditelné zůstaly pouze plochy pro osvětlení. Fotomaska má z každé strany trochu jiný tvar, aby kontakty výsledného senzoru byly každý na jiné straně senzoru. Ve vaku-

ové jednotce byl film ve fotomasce vystaven po dobu 90 sekund fotonům UV záření, které fólii v místech s pozitivním fotorezistem vytvrdily.



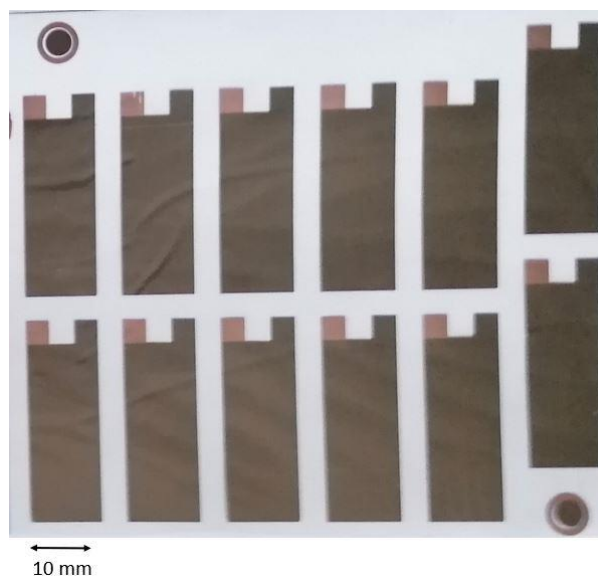
Obrázek 12 Fotomaska se založeným zalaminovaným PVDF filmem (vlevo), vakuová expoziční jednotka Hellas BUNGARD (vpravo) (Matěj Burda, 2021)

Následující fáze, tzv. vyvolávání, spočívá v odstranění zbytků nevytvrzeného fotocitlivého materiálu z PVDF fólie. Fólie byla lepicí páskou připevněna na desku s takovým otvorem, aby byla přístupná z obou stran. Deska byla následně založena do zakladače a po dobu tří minut ostřikována roztokem uhličitanu sodného Na_2CO_3 . Pokud k upnutí nebyla použita zpevňující deska, film se při ostřiku ohýbal a nedošlo k dokonalému vyvolání. Film byl následně opláchnut vodou od zbytku uhličitanu sodného.



Obrázek 13 Zařízení pro proces vyvolávání (vlevo), fólie v zakladači před procesem vyvolávání (vpravo) (Matěj Burda, 2021)

Závěrečným stádiem výroby PVDF senzoru fotolitografickou metodou bylo odleptání metalizace z těch částí, které nebyly kryté vytvrzenou vrstvou fotocitlivého materiálu. Zařízení pro leptání bylo v obdobném provedení jako vyvolávací. V roztoku chloridu železitého FeCl_3 byla srovnatelným způsobem jako při procesu vyvolávání ostřikována fólie pouze s tím rozdílem, že expozice trvala pouze 6 sekund, aby nedošlo k nevratnému poškození struktury senzorů vlivem kyselého prostředí. Následovalo opláchnutí vodou a finální odstranění vytvrzených částí fotorezistu louhováním v roztoku hydroxidu sodného NaOH po dobu 5 až 10 minut. Po omytí a osušení fólie již bylo možné vystříhnout jednotlivé senzory.

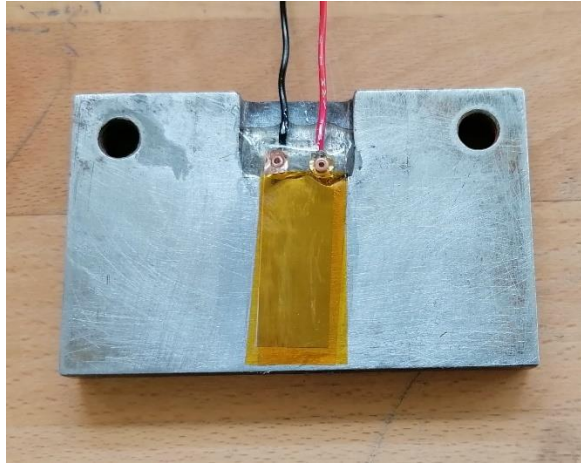


Obrázek 14 Výsledná podoba PVDF senzorů vyrobených fotolitografickou metodou (Matěj Burda, 2021)

3.3 Princip měření

Přípevnění vodičů pro přenos signálu z PVDF senzoru bylo provedeno pomocí nýtování. Uchycení vodičů bylo provedeno pomocí dvou kusů měděných nýtů na každé vodivé metalizační straně PVDF senzoru. Do výběžku metalizace senzoru byl udělán výsečnickem otvor o průměru 1 mm, na který mohl být nasazen nýt. Připravené kontakty PVDF senzoru vzhledem ke zkušenostem s porušením vrstvy metalizace byly potřeny tenkou vrstvou stříbrné vodivé barvy SCP Electrolube. Na nýt bylo nasazeno očko z vodiče, kterým následně sloužil jako výstupní kontakt senzoru. Dále byl mezi vodič a PVDF senzor vložen pro lepší kontakt s vodivou částí senzoru kroužek z mosazného plechu očištěného izopropylalkoholem s vyseknutou dírou na nýt pomocí výsečnicku. Z druhé strany nýtu byla nasazena plastová fólie z polyvinylchloridu (PVC) s vnitřní dírou o průměru nýtu pro zabránění deformací senzoru během nýtování. Takto mohl být nýt vložen do ruční nýtovačky Bungard Bel s hlavou pro nýty o průměru 1 mm a následně vytvořen nerozebíratelný spoj. Konec přinýtovaného vodiče byl spojen s propojovacím BNC kabelem, který zajistil připojení k měřicím zařízením. Ověření funkčnosti senzoru bylo provedeno pomocí multimetru, kterým bylo zjištěno, zda je elektrický obvod mezi metalizací a vývodem vodiče vodivě spojen.

Pro měření pomocí PVDF senzoru bylo nutné připravit takové podmínky, jaké byly následně použity během experimentu. Tenký senzor během zkušebních měření vykazoval velkou náchylnost k mechanickému poškození při různých operacích, ať už při kalibraci, manipulaci nebo kolapsu kavitační bubliny. Proto byl senzor z obou stran oblepen samolepicí polymerovou kaptonovou páskou o tloušťce 65 μm , která zajistila jak mechanickou ochranu, tak zamezila možnosti chemického poškození senzoru (např. následně používanými lepidly). Kaptonová páska zároveň díky svým elektroizolačním vlastnostem sloužila jako ochrana před rušivými vlivy vnějšího elektromagnetického záření. Následně byl senzor přilepen na ocelovou destičku o rozměrech 80 x 50 mm a tloušťce 10 mm. Tato sloužila jako základní měřicí deska simulující pevnou stěnu, na které by v praxi probíhala kavitační eroze. Během experimentu je pak měřena síla působící na tuto pevnou stěnu. Brusnými papíry různých drsností byla zlepšena jakost povrchu ocelové destičky, aby se zabránilo nežádoucímu vadnému přilnutí senzoru k destičce a vzniku vzduchových bublin pod senzorem. Nečistoty z destičky byly smyty technickým benzinem a destička odmaštěna izopropylalkoholem. Sešikmená část destičky sloužící pro zapuštění kontaktů pod úroveň měřicí roviny byla podlepena polypropylenovou lepicí páskou pro jednodušší demontáž senzoru. Na plochou část destičky v měřicí rovině bylo v tenké vrstvě naneseo ethylkyanoakrylátové lepidlo Loctite Super Bond Gel pro přilepení činné části senzoru tak, že celý senzor kromě kontaktů byl zasazen na rovné ploše měřicí destičky. Před zaschnutím bylo nutné správným přiložením senzoru zajistit, aby pod ním nezůstaly vzduchové bubliny, které by ovlivňovaly následné měření. Po vytvrdnutí lepidla bylo připraveno dvousložkové lepidlo Bison Epoxy 5 Minutes, zvolené s přihlédnutím k poznatkům z disertační práce Hujera (2019), kterým byly zaizolovány nýty senzoru a obnažené kontakty vodičů, které by mohly během experimentu zkratovat obvod. Do mističky bylo naneseo lepidlo a důkladně rozmícháno s, pokud možno, co nejmenším podílem bublin. Následně bylo lepidlo naneseo na požadované části senzoru. Čas vytvrzení lepidla byl ponechán na více než 24 hodin, aby byla zaručena stabilita při použití ve vodním prostředí. Jako krycí vrstva byla přes přilepený PVDF senzor aplikována průhledná polypropylenová lepicí páska. Správný postup výroby senzoru byl ještě ověřen ve vodním prostředí. Pomocí ohmmetru bylo zkontrolováno, jestli nejsou vodivě spojeny metalizace PVDF senzoru s ocelovou destičkou nebo vodou.



Obrázek 15 PVDF senzor oblepený kaptonovou páskou a přilepený na ocelovou desku (Matěj Burda, 2021)

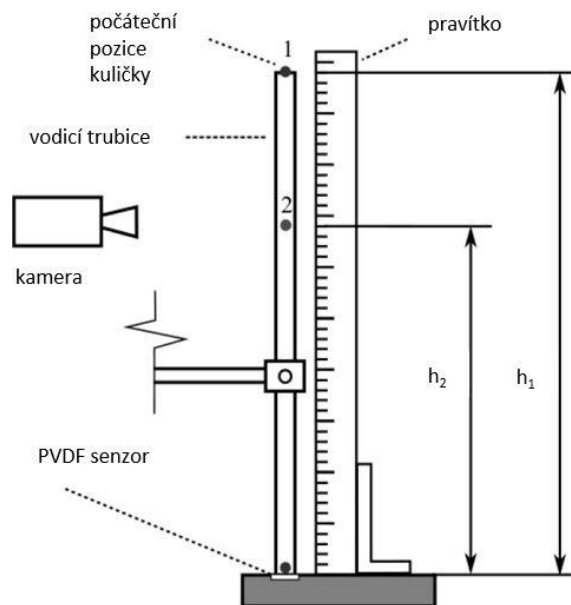
3.4 Kalibrace

Aby byly při měření pomocí PVDF senzoru odstraněny vlivy uchycení a ochrany senzoru a bylo možné kvantifikovat naměřené hodnoty, tedy získat závislost mezi zjištěným elektrickým napětím a impaktní silou, je nutné provést kalibraci senzoru. Jejím výstupem je lineární křivka závislosti naměřeného elektrického napětí na působící impaktní síle, z níž lze určit citlivost senzoru. Známé je několik metod kalibračního měření, jak popisuje Dudl (2021) – např. metoda zlomení tuhy, kyvadlová metoda a další. Metoda zlomení tuhy, kterou využil pro kalibraci např. Htet (2021), spočívá v krátkodobém působení tuhy na PVDF senzor v řádech jednotek mikrosekund do doby, než se tuha zlomí a dojde ke skokovému poklesu zatížení. Oproti tomu kyvadlová metoda využívá principu impulzu síly, kdy je na PVDF senzor ve svislé poloze spouštěna na kyvadle kulička. Na základě její počáteční pozice a velikosti jejího odrazu lze následně odvodit sílu působící na PVDF film. Často používanou metodou, která byla zároveň použita při experimentu v rámci této diplomové práce, je také metoda pádu kuličky, která je vysvětlena v podkapitole níže.

3.4.1 Metoda pádu kuličky

Metoda pádu kuličky je v zásadě velmi podobná kyvadlové metodě, ovšem s tím rozdílem, že kompenzuje některé její nedostatky jako například neznámou tuhost lana

a náročné uchycení kuličky. Obrázek 16 ukazuje schéma kalibračního měření. PVDF senzor je položen v horizontální pozici pod vodící trubicí, kterou je z kleští spouštěna kalibrační kulička (ložisková kulička) z počáteční výšky h_1 . Její potenciální energie se mění na kinetickou. Kulička následně dopadne na senzor, kde předá část své kinetické energie PVDF senzoru, a odrazí se od něj do konečné výšky h_2 . Zaznamená se hodnota hmotnosti kuličky m a ze záznamu kamery nebo mobilního zařízení pracujícího ve zpomaleném režimu se z pravítka na snímku odečtou hodnoty počáteční a konečné výšky.



Obrázek 16 Schematický náčrt kalibrace PVDF senzoru metodou pádu kuličky (Hujer a Müller, 2017, str. 2)

Kalibrace je prováděna kalibračními kuličkami různých velikostí a hmotností, aby byla pokryta co největší měřicí oblast pro vytvoření kalibrační křivky. Vztah pro výpočet rychlosti kalibrační kuličky v lze vypočítat z rovnice 6.

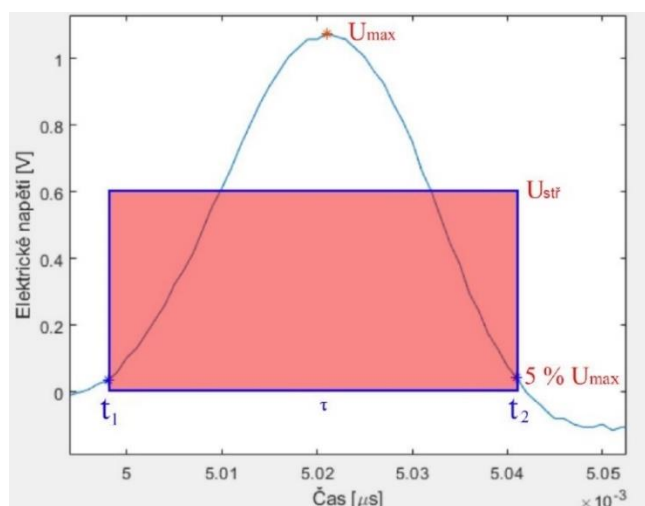
$$v_{1,2} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{1,2}} \quad 6$$

Na základě porovnání impulzu síly a změny hybnosti mezi stavy 1 a 2 v časech těsně před dopadem t_1 a ihned po odrazu t_2 lze odvodit vztah pro střední sílu $F_{stř}$ působící na senzor. τ je pak rozdíl časů t_1 a t_2 .

$$F_{stř} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \frac{m}{\tau} \cdot (v_1 + v_2) \quad 7$$

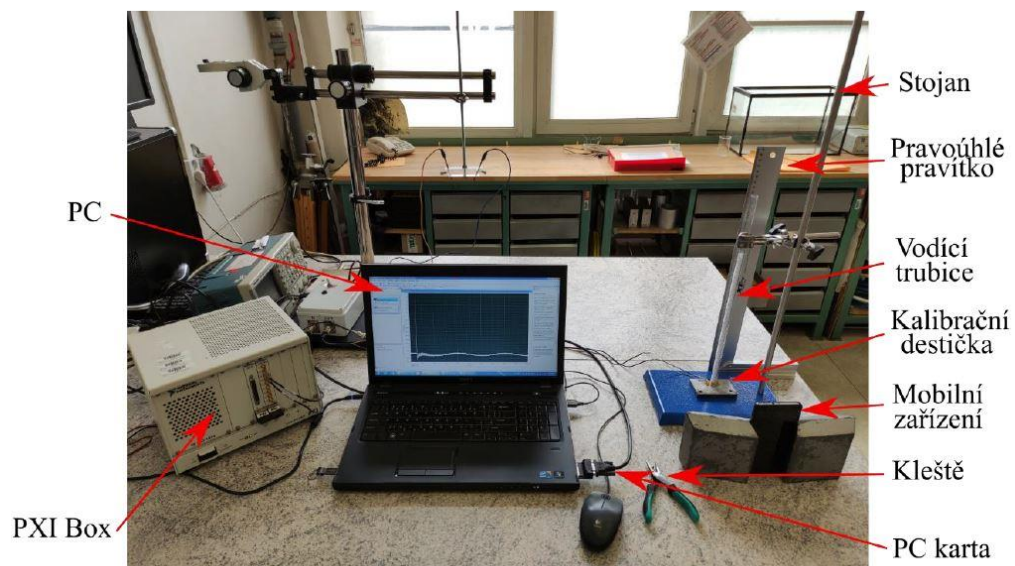
Záznam signálu elektrického napětí vyvolaného dopadem kuličky na PVDF senzor je z každého kalibračního hodu zpracován a je možné z něj odečíst hodnotu maximální napětí U_{max} . Dále pomocí koeficientu integrační meze p_{int} , který určuje délku trvání působení kalibrační kuličky na senzor a byl dle zkušeností nastaven na 5 % z U_{max} , také hodnotu středního napětí $U_{stř}$ dle rovnice 8. Na základě poměru $U_{stř}$ a U_{max} lze poté se znalostí $F_{stř}$ zjistit kýženou hodnotu maximální působící síly F_{max} .

$$U_{stř} = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \quad 8$$



Obrázek 17 Princip výpočtu $U_{stř}$ (Dudl, 2021, s. 46, upraveno)

Následně byly všechny kalibrační hody vyhodnoceny ve výslednou kalibrační závislost vzniklou lineární regresí. Ta udává vztah maximálního napětí naměřeného při dopadu kuličky ve vztahu k maximální působící síle, tedy citlivost PVDF senzoru. Příkladem výsledné kalibrační křivky je např. $U_{max} = 0,0049 F_{max} + 0,3401$ pro senzor velikosti 30 x 12 mm vyrobený fotolitografickou metodou a přilepený na ocelové destičce.



Obrázek 18 Kalibrace metodou pádu kuličky v laboratoři KEZ (Dudl, 2021, s. 44)

4 Experimentální sestava

Samotnému měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzoru předcházela návrh a sestavení experimentální sestavy. V laboratoři KEZ bylo připraveno zázemí pro generování bublin, záznam signálu z PVDF senzoru a vysokorychlostní snímání kolapsu bublin.

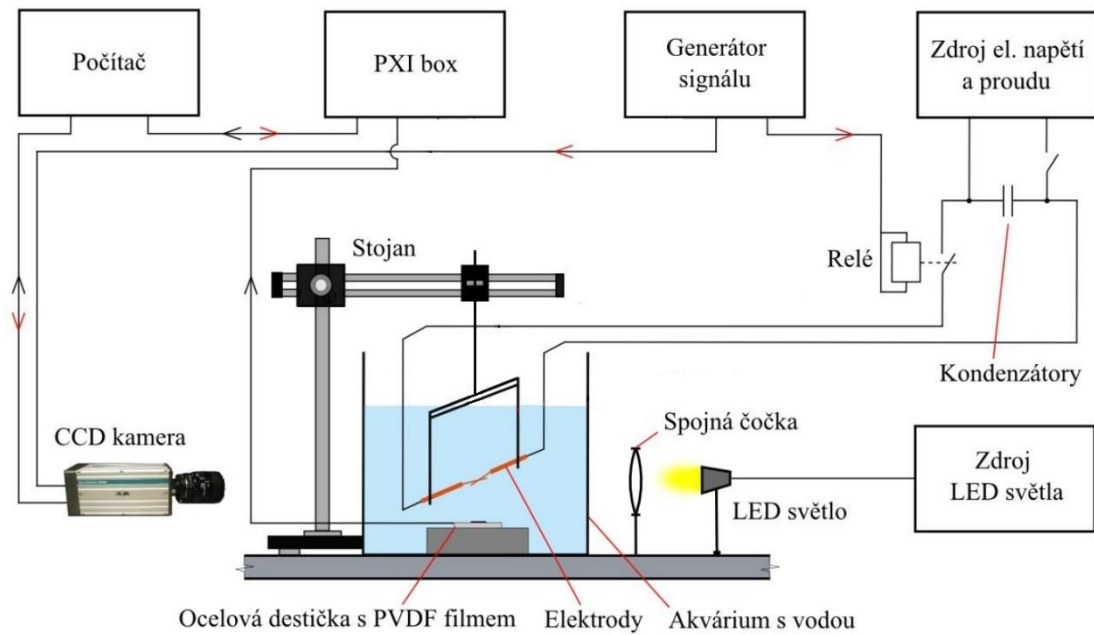
Generování kavitačních bublin bylo prováděno ve skleněné nádrži o rozměrech 30 x 50 x 25 cm, která byla naplněna cca 20 litry vody z vodovodního řádu. Ve vodě byla ponořena konstrukce pro uchycení elektrod a následné generování bublin. Ta byla složena z hliníkového profilu a bočnic z PMMA, ve kterých byly připraveny díry pro zasazení měděných elektrod o průměru v rozmezí 2,6–3,4 mm. Elektrody byly zaaretovány šrouby a na jejich konce byly připájeny očištěné vyrovnané měděné dráty o průměru 0,2 mm, které se dávaly do dotyku tak, aby byl přechodový odpor co nejvyšší, jak uvádí kapitola 2.6.3 a podrobněji popisuje Hujer (2013). Elektrody byly připojeny k soustavě dvou paralelně zapojených kondenzátorů o kapacitě každého 4700 μF s jmenovitým napětím 63 V. Kondenzátory byly nabíjeny ze zdroje stejnosměrného elektrického napětí a proudu GW INSTEK PST-3202 s nastavitelnou hodnotou napětí 0–64 V. Energie z kondenzátorů do místa dotyku drátů pak byla uvolňována řízeně sepnutím spínacího relé pomocí signálu z generátoru signálu Tektronix AFG 3102 o následujících parametrech: výstupní trigger jednoho pulzu o velikosti 5 V s délkou trvání 0,5 ms.

Měření účinku kolabující kavitační bubliny bylo prováděno pomocí zkalibrovaného PVDF senzoru vyrobeného fotolitografickou metodou s velikostí činné plochy 12 x 30 mm přilepeného na ocelové destičce. Ocelová destička se senzorem byla položena na kovovou kostku a korkovou podložku pod hladinou vody v nádrži. Kovová kostka slouží pro zvětšení vzdálenosti pevné stěny od spodní stěny nádrže, která by jinak mohla nežádoucím způsobem působit jako sekundární pevná stěna, korková podložka zajišťuje odstranění vodivého spojení mezi ocelovou destičkou a kostkou. Důležitým faktorem pro následné správné měření bylo uzemnění prvků experimentální sestavy tak, aby nedošlo k ovlivnění senzoru elektromagnetickým vlněním. Nakonec byla zvolena forma uzemnění ocelové destičky a jedné elektrody PVDF senzoru připo-

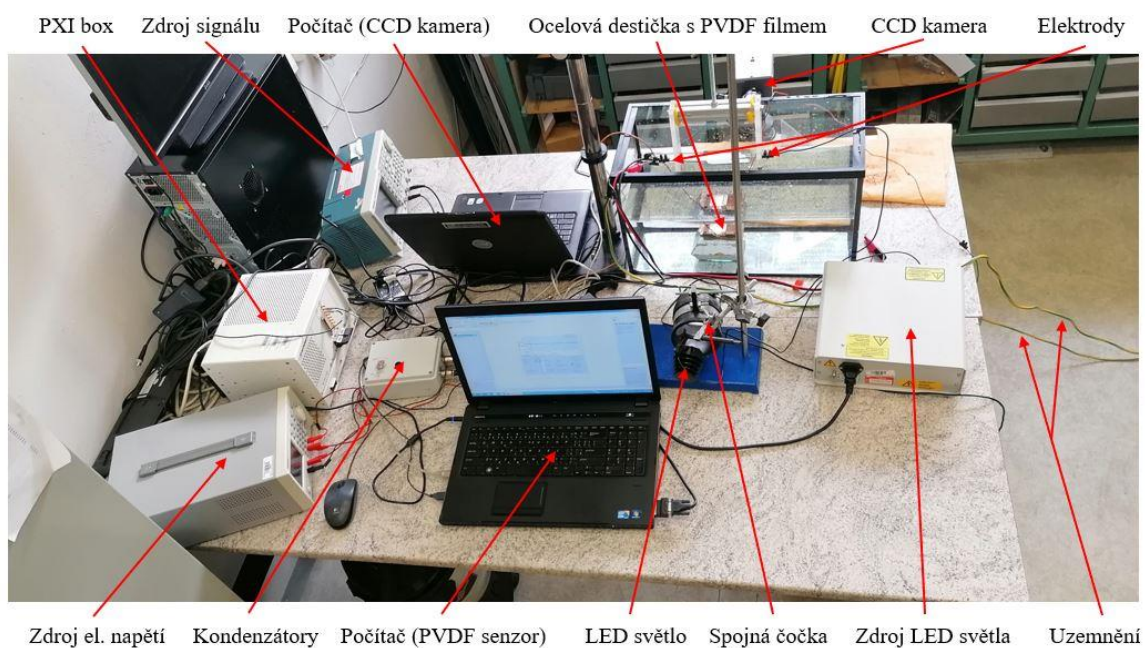
jením ke dvěma různým zemnicím vodičům v laboratoři. Elektrody PVDF senzoru byly spojeny s koaxiálním kabelem (horní elektroda s vnějším vodivým opletením, dolní elektroda s vnitřním vodičem), který byl připojen k PXI boxu a dále k počítači, jak je popsáno v kapitole 3.4.1. Nastavení programu NI SignalExpress 2013 bylo následující: vzorkovací frekvence 60 MHz, délka záznamu 600 000 vzorků, rozsah elektrického napětí 30 V a vstupní trigger reagující na nárůst absolutní hodnoty elektrického napětí přes 2 V. Referenční hodnota zaznamenaných dat před spuštěním triggeru byla 10 %.

Poslední členem experimentální sestavy bylo snímací zařízení jako optická metoda pro záznam kolapsu bubliny, zjištění její velikosti a vzdálenosti jejího středu od pevné stěny. Pro tyto účely byla použita vysokorychlostní kamera Redlake MotionPro X3 s CCD čipem s rozlišením 1280 x 1024 pixelů. CCD čip umožňuje při snížení rozlišení zvýšit počet snímků za sekundu až na 64 000. Pro účely experimentu bylo využito nastavení rychlosti snímání kamery na 10 000 snímků za sekundu, což bylo adekvátní vzhledem k délce trvání kolapsu kavitační bubliny v řádech jednotek milisekund. Odpovídající velikost snímků 400 x 104 pixelů umožnila zachycení pevné stěny i celého vertikálního obrazu bubliny při maximálním poloměru. Na kameru byl nasazen externí objektiv Nikon AF Micro-Nikkor 60 mm f/2.8D pro soustředění světla na CCD čip pomocí úpravy ohniskové vzdálenosti. Hodnotu expozice při dané rychlosti snímání bylo možné nastavit v rozmezí 1–97 μ s. Vzhledem k velmi tmavému obrazu bylo nutné proti kameře nastavit podpůrné osvětlení. Pro to bylo využito bílé LED světlo o světelném toku 1 000 lm rozptýlované přes spojnou čočku. Ovládání vysokorychlostní kamery bylo prováděno z počítače přes software Motion Studio. V něm byla nastavena hodnota expozice, počet snímků za sekundu, velikost snímků a jejich počet, který byl nastaven na 199, což bylo dostatečné pro zachycení průběhu celého děje kolapsu bubliny. Aby bylo snímání synchronizováno s generováním bubliny, bylo nahrávání kamery zahájeno spuštěním výstupního triggeru z generátoru signálu Tektronix AFG 3102 o následujících parametrech: 200 pulzů, frekvence 10 kHz, amplituda 3,5 V. Za účelem zjištění reálné velikosti vygenerované bubliny byl před samotným snímáním vytvořen jeden snímek pravítka vloženého do roviny elektrod, aby mohlo po analýze snímku být vytvořeno měřítko převodu z pixelů snímku na milimetry reálného obrazu.

Takto vytvořená experimentální sestava byla připravena pro samotný experiment. Obrázek 19 zobrazuje ilustrační schéma pro bližší pochopení průběhu experimentu. Je na něm možné vidět všechna použitá zařízení a vodiče pro přenos dat/signálů mezi nimi. Obrázek 20 ukazuje kompletní experimentální sestavu, na které bylo provedeno měření.



Obrázek 19 Schéma experimentální sestavy pro měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzoru (Hujer, 2013, s. 31, upraveno)

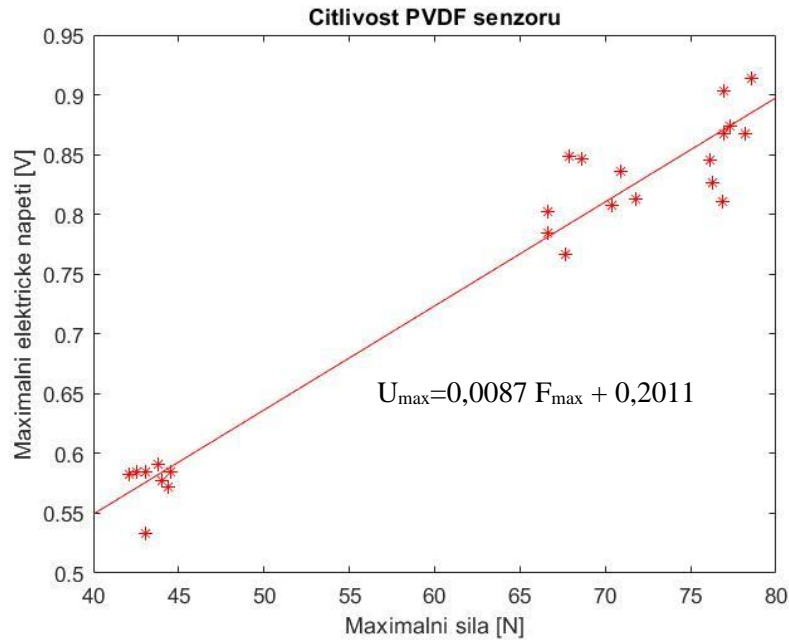


Obrázek 20 Experimentální sestava v laboratoři KEZ (Matěj Burda, 2021)

5 Experiment

5.1 Kalibrace PVDF senzorů

Kalibrace PVDF senzorů byla prováděna metodou pádu kuličky popsanou v kapitole 3.4.1. Signál vyvolaný dopadem kuličky na PVDF senzor byl převeden přes osciloskopický modul PXI boxu, sběrnici PCI a kartu NI ExpressCard 8360 do počítače, kde byl v programu NI SignalExpress 2013 zpracován. Nastavení programu NI SignalExpress 2013 pro kalibraci PVDF senzoru v rámci experimentu bylo následující: vzorkovací frekvence 1 MHz, délka záznamu 15 000 vzorků, rozsah elektrického napětí 20 V a vstupní trigger reagující na nárůst absolutní hodnoty elektrického napětí přesahující 100 mV. Referenční hodnota zaznamenaných dat před spuštěním triggeru byla 10 %. Následně byly na základě programu v softwaru MATLAB vytvořeného Dudlem (2021) všechny hody kuličkami vyhodnoceny ve výslednou kalibrační závislost pro daný senzor. I přes ochranu PVDF filmu pomocí krycích pásek docházelo při použití těžších kuliček k poškození filmu ve formě deformačních důlků. Z tohoto důvodu nebyly používány kuličky těžší než 6 gramů. Použity byly tři druhy kalibračních kuliček, a sice o hmotnostech 0,256 g (průměr kuličky 3,91 mm), 0,441 g (průměr kuličky 4,66 mm) a 0,509 g (průměr kuličky 4,89 mm). Kalibrační hody se špatným odrazem kuličky od senzoru nebyly v rámci měření zaznamenávány. Na výsledky kalibrace měl vliv počet kalibračních hodů, který bylo nutné u některých senzorů vzhledem k velkému rozsahu naměřených hodnot zvětšit, aby byla výsledná kalibrační závislost přesnější pro následné měření. Obrázek 21 zobrazuje lineární kalibrační závislost konkrétního PVDF senzoru vyrobeného fotalitografickou metodou, který byl použit v rámci experimentu. Hodnoty maximální síly 40–45 N odpovídají hodům kuličkou o hmotnosti 0,256 g, 65–74 N hodům kuličkou o hmotnosti 0,441 g a oblast maximální síly vyšší než 74 N odpovídá hodům nejtěžší kuličkou, tj. 0,509 g.



Obrázek 21 Kalibrační závislost PVDF senzoru (Matěj Burda, 2021)

5.2 Průběh experimentu

Během experimentu bylo nutné logicky seřadit všechny dílčí kroky tak, aby byly změřeny najednou všechny parametry. Nejdříve byly dány do kontaktu elektrody pro generování bubliny, zapnuto LED světlo a nastaveny parametry záznamu na vysokorychlostní kameře. Poté byly zapnuty výstupy z generátoru signálu pro sepnutí relé a záznam kamerou čekající na spuštění triggerem. Ze zdroje elektrického napětí byly nabity kondenzátory sepnutím obvodu páčkovým přepínačem. Následně mohl být spuštěn záznam nastaveného programu NI SignalExpress 2013 čekající na skokovou změnu elektrického napětí. Závěrečným krokem průběhu experimentu bylo spuštění triggeru z generátoru signálu, které zajistilo souběžné sepnutí nahrávání kamery a vygenerování bubliny. Kolaps bubliny vyvolal skokovou změnu elektrického napětí zaznamenaného PVDF senzorem, která spustila záznam v programu NI SignalExpress 2013.

Během experimentu se pracovalo se třemi druhy nastavení pro generování bublin. Ze zdroje elektrického napětí byly kondenzátory nabíjeny napětím o velikostech 30 V, 40 V nebo 50 V. V závislosti na tomto nastavení byly generovány různé velikosti bublin za účelem toho, aby bylo možné porovnat výsledky experimentu s prací Hujera

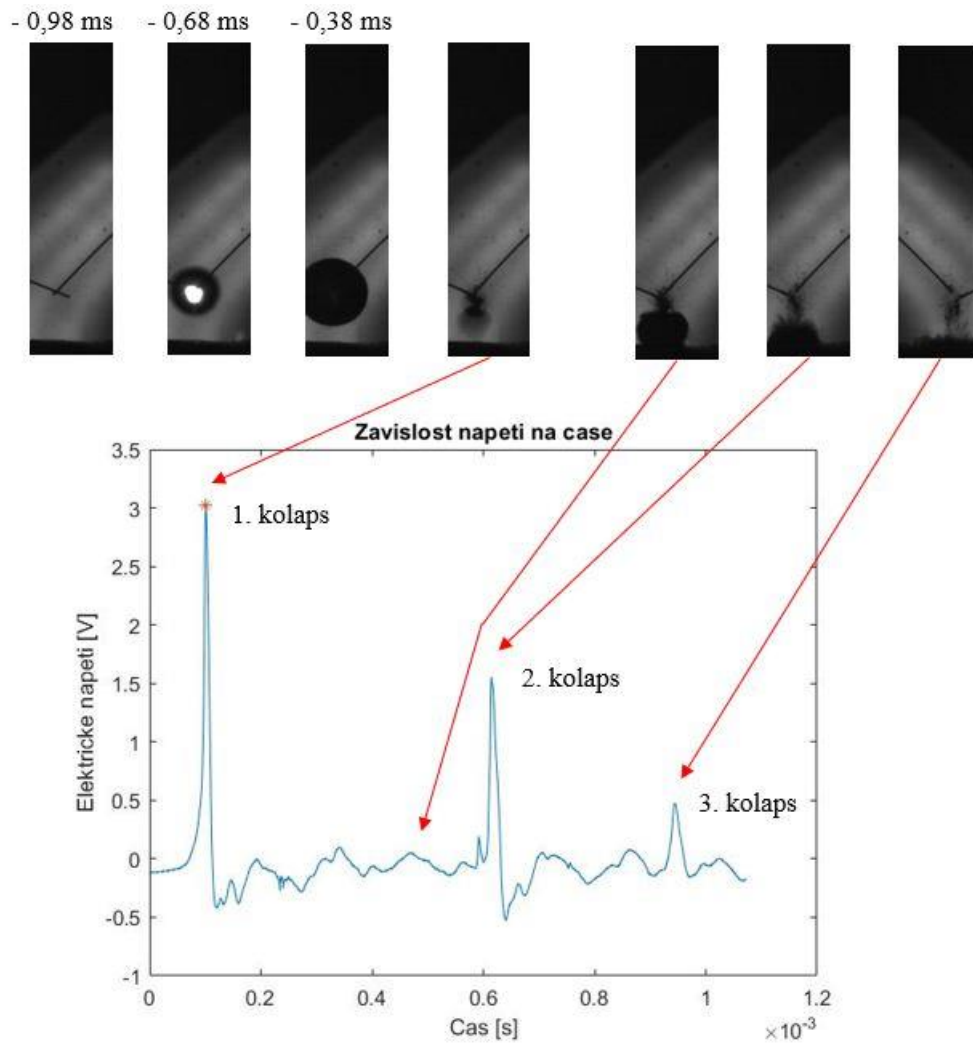
(2013). Nutné je ovšem podotknout, že porovnání samotných maximálních velikostí (poloměrů) bublin není vzhledem k několika faktorům možné. Maximální velikost bublin významně závisí na vodivosti dané kapaliny. Hujer používal destilovanou vodu, ve které dosahují bubliny menších velikostí než během měření ve vodě z vodovodního řadu v rámci této diplomové práce. Během dalšího výzkumu na katedře KEZ se ukázalo, že velikosti bublin ve slané vodě je ještě větší. Pro jednu velikost elektrického napětí i přes neměnnost parametrů nelze získávat stejné velikosti bublin. To je dáno měnící se vodivostí kapaliny vlivem oxidace elektrod, „odpalování“ drátů při generování bublin a elektrolyzou vody při působení elektrického proudu. Během experimentu se ukázalo, že generování bublin elektrickým napětím 30 V bylo nestálé, v několika případech nebyla dodaná energie dostatečná na „přepálení“ elektrody, a tak vznikaly další bubliny. Dalším zpozorovaným jevem bylo to, že bubliny generované stejným elektrickým napětím dosahují rozdílu velikostí jejich poloměrů až několik mm. Z těchto důvodů se v rámci dalšího experimentu pracovalo jako s hlavním parametrem pro analýzu výsledků s rozmezím poloměrů bublin, nikoliv přímo s řídicím elektrickým napětím za předpokladu, že energie generující bublinu je při shodné velikosti bubliny stejně velká. Tabulka 2 zobrazuje velikosti bublin, které byly při dané hodnotě elektrického napětí vygenerovány.

Tabulka 2 Rozmezí velikostí bublin v závislosti na velikosti elektrického napětí

Napětí (V)	Rozmezí poloměrů bublin (mm)
30	1,17 ÷ 2,23
40	2,85 ÷ 3,88
50	4,14 ÷ 6,28

Pro tři zmíněné hodnoty elektrického napětí byly vyhodnoceny velikosti impaktních sil. A to ve vztahu k bezrozměrnému parametru γ . Vzdálenost dotýkajících se elektrod od pevné stěny byla mezi jednotlivými měřeními měněna posouváním konstrukce ve stojanu a tím se měnil parametr γ tak, aby bylo možné, pokud možno co nejlépe po-

krýt oblasti měření od hodnoty $\gamma =$ cca 4 až po téměř $\gamma = 0$, jak je uvedeno v kapitole 2.4. Obrázek 22 ukazuje životní cyklus bubliny a s ním spjatý signál zaznamenaný PVDF senzorem při aplikovaném elektrickém napětí 40 V, poloměrem bubliny 3,11 mm a $\gamma = 1,53$. První tři snímky byly zaznamenány ještě před naměřením signálu z PVDF senzoru.

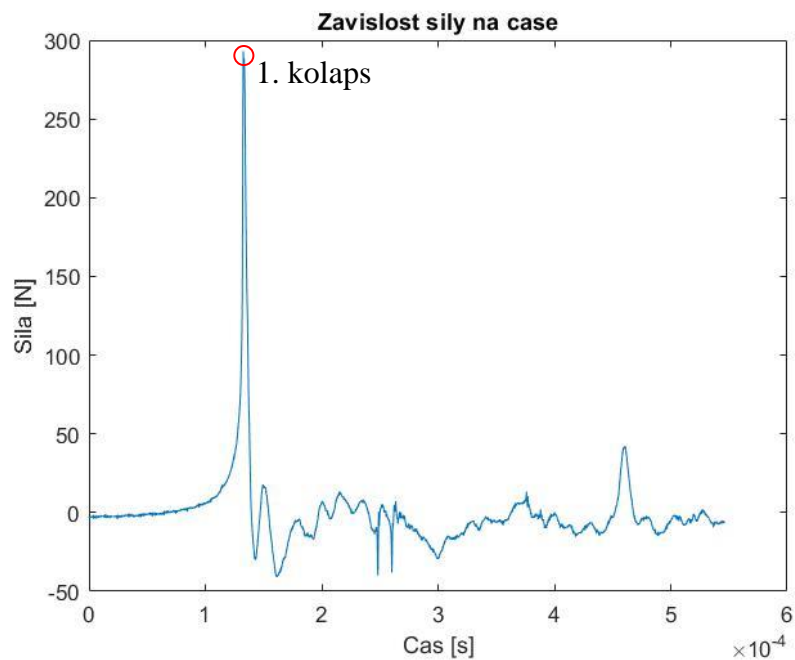


Obrázek 22 Porovnání vybraných snímků životního cyklu bubliny se signálem z PVDF senzoru (Matěj Burda, 2021)

5.3 Analýza chování bublin v blízkosti pevné stěny

V návaznosti na poznatky uvedené v kapitole 2.4 byla provedena analýza chování bublin v blízkosti pevné stěny stavějící na výsledcích experimentu.

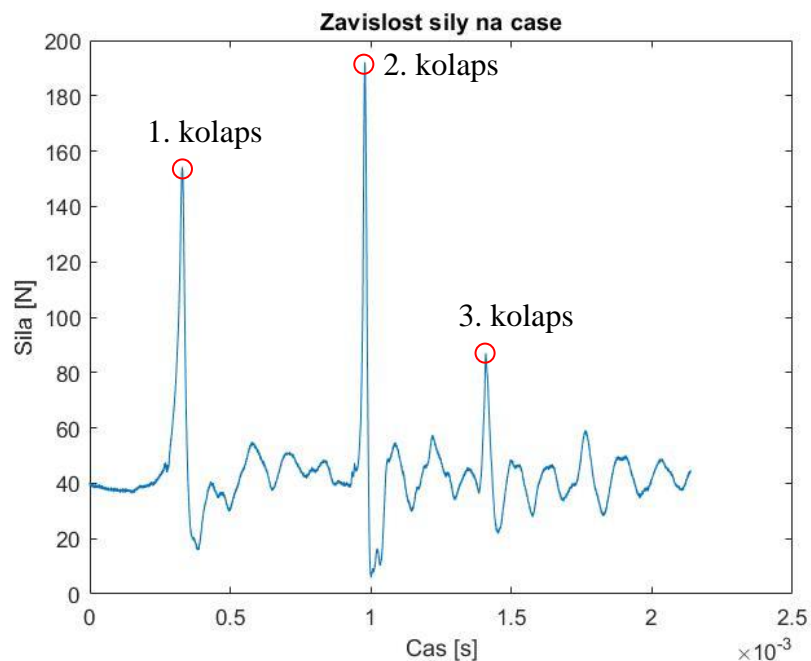
Pro hodnotu $\gamma > 2,1$ bylo možné pozorovat, že největší část energie kolapsu bubliny působila na pevnou stěnu během prvního kolapsu bubliny a další dílčí kolapsy již měly výrazně menší nebo zanedbatelný silový účinek. Druhý kolaps bylo možné pozorovat jen ve výjimečných případech při přibližování se hodnotě $\gamma = 2,1$. Bublina při této relativní vzdálenosti od stěny na ni přímo nepůsobí a změřená síla je způsobená tlakovou vlnou vzniklou při kolapsu bubliny. Ta průstupem kapalinou směrem k pevné stěně ztrácí část své energie a výsledná maximální síla od prvního kolapsu dosahuje menší hodnoty. Na obrázku Obrázek 23 je možné vidět ukázkou průběhu síly kolapsu bubliny na pevnou stěnu pro $\gamma = 2,82$. Zobrazená síla v záporných hodnotách není reálná, jedná se pouze o vliv přepočtu záporné hodnoty elektrického napětí na sílu.



Obrázek 23 Průběh síly od kolapsu bubliny o poloměru 3,00 mm pro $\gamma = 2,82$ (Matěj Burda, 2021)

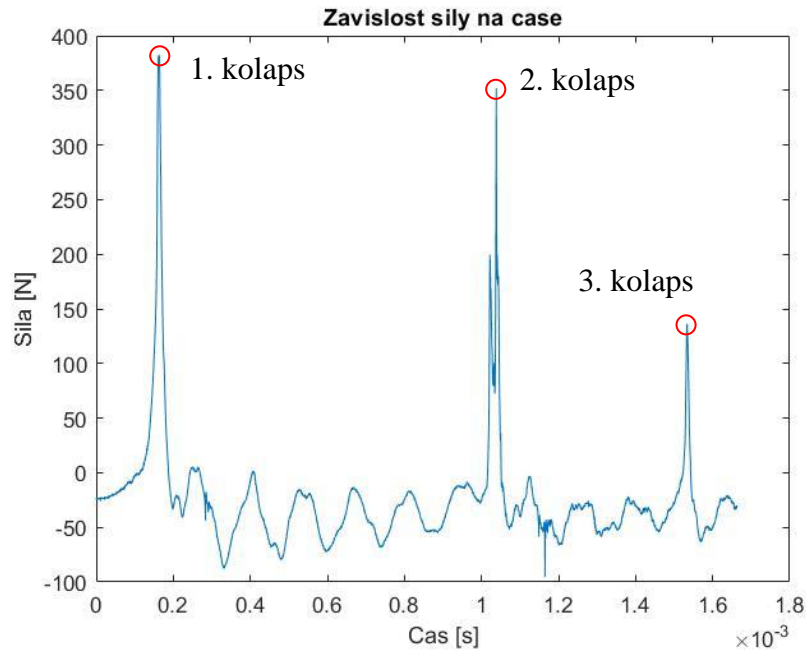
Při zmenšování hodnoty parametru γ do intervalu 2,1–1,2 lze pozorovat nárůst síly působící na pevnou stěnu. Zatímco první kolaps bubliny ještě probíhá mimo pevnou stěnu, další kolapsy probíhají přímo na stěně za působení jet effectu a dalších tlakových vln. I proto je v řadě případů síla vyvolaná druhým kolapsem bubliny větší než při ko-

lapsu prvním. Ukázkou vypočtené síly pro γ z tohoto intervalu lze vidět na obrázku Obrázek 24.



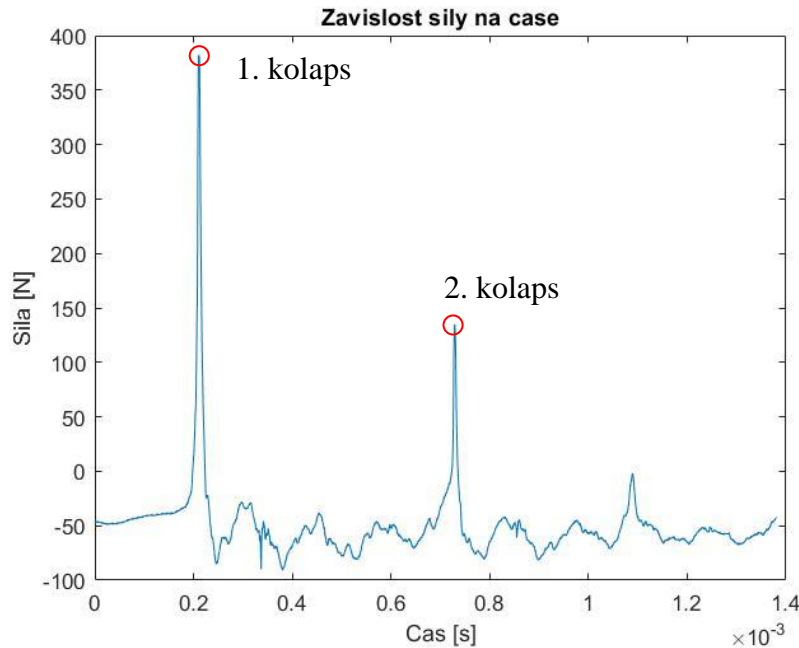
Obrázek 24 Průběh síly od kolapsu bubliny o poloměru 4,86 mm pro $\gamma = 1,51$ (Matěj Burda, 2021)

Přibližováním bubliny k pevné stěně na hodnotu distančního parametru v rozmezí $0,8 \leq \gamma \leq 1,2$ dochází ke dvěma kolapsům bubliny, při kterých se uvolňuje většina její energie. Velikost maximální síly od prvního a druhého kolapsu se vyrovnává. Zatímco v některých předchozích případech byla síla od druhého kolapsu větší, nyní k tomuto jevu při tomto nastavení dochází jen v některých případech. Ve většině případů je zřetelná také síla od třetího kolapsu, která je způsobena buď dalšími tlakovými vlnami nebo doprovodným splash effectem vzhledem k tomu, že třetí kolaps probíhá bezprostředně na pevné stěně. Chování bubliny zobrazuje Obrázek 25.



Obrázek 25 Průběh síly od kolapsu bubliny o poloměru 5,03 mm pro $\gamma = 1,1$ (Matěj Burda, 2021)

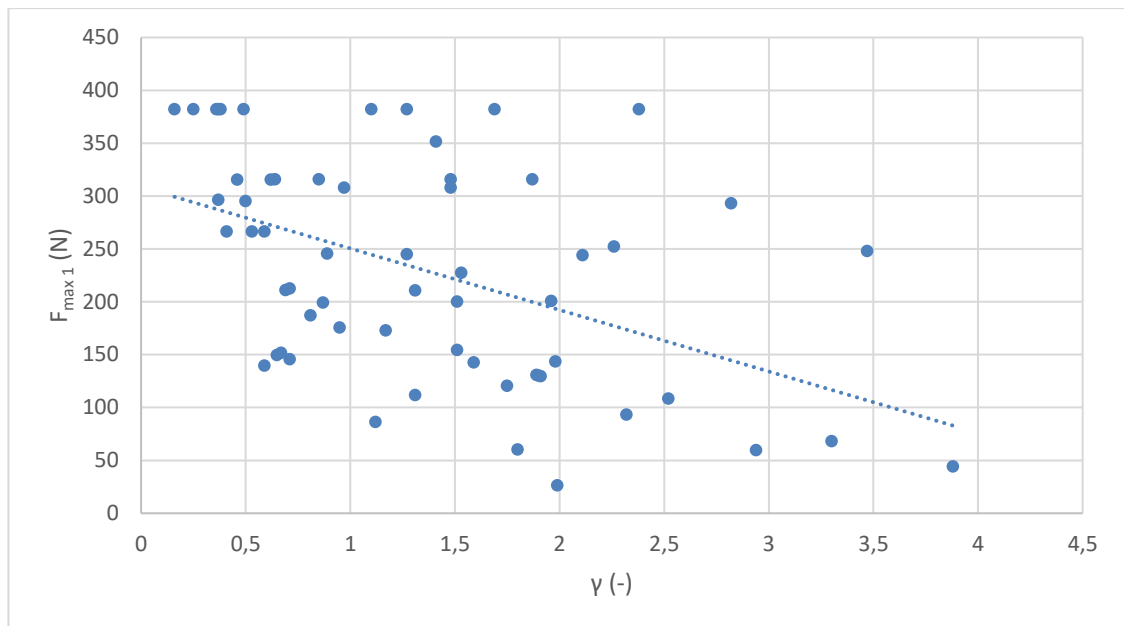
Bubliny nejbliže pevné stěny, jejichž maximální poloměr je výrazně nižší než vzdálenost jejich středu od stěny, v našem případě uvažované pro $\gamma \leq 0,6 \sim 0,7$, dosahují nejsilnějších kolapsů. Jejich maximální síla působící na pevnou stěnu je největší z výše zmíněných příkladů. První kolaps míří nezpomalen okolní kapalinou přímo do pevné stěny a je při něm uvolněna většina energie (Obrázek 26). Další kolapsy přímo na pevné stěně působí výrazně menší silou.



Obrázek 26 Průběh síly od kolapsu bubliny o poloměru 3,51 mm pro $\gamma = 0,38$ (Matěj Burda, 2021)

5.4 Vyhodnocení experimentu

Z provedených měření kolapsů kavitačních bublin pomocí PVDF senzoru byl převodem získaného signálu elektrického napětí zjištěn průběh síly působící na senzor, z něhož bylo možné určit maximální hodnoty síly, které odpovídají kolapsům bubliny. Soubor těchto hodnot pak byl vztažen do širších souvislostí, z nichž bylo možné odvodit obecné závěry. Základním prvkem výsledků experimentu bylo ověření faktu, že se zvětšující se vzdáleností bubliny od pevné stěny, tedy zvětšujícím se parametrem γ při stálé velikosti bubliny, se hodnota síly působící na stěnu od kolabující bubliny snižuje. Tuto skutečnost zobrazuje Graf 1, který porovnává maximální síly od prvního kolapsu bublin v závislosti na γ . Pro tuto závislost byly zahrnuty právě jen první kolapsy, protože při dalších kolapsech již může dojít k posunu středu bubliny blíže či dále od pevné stěny, a tak již nemusí být výsledky silového působení vypovídající.

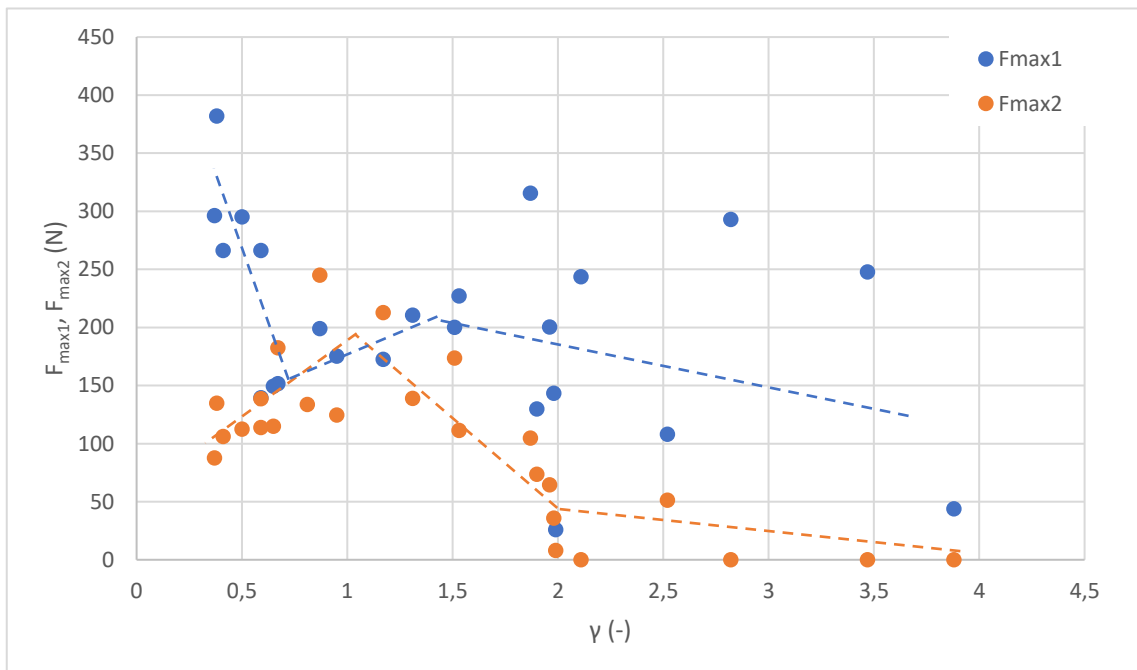


Graf 1 Lineární závislost snižování maximální působící síly na pevnou stěnu se zvětšujícím se parametrem γ

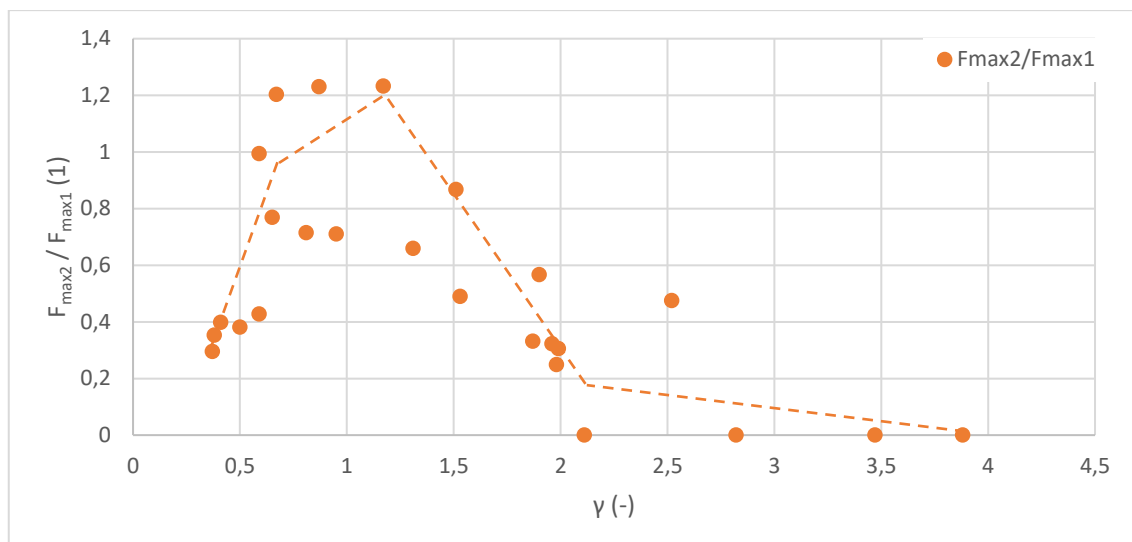
Pro vyhodnocení maximálních sil a závislostí mezi velikostmi sil od dílčích kolapsů byly v rámci experimentálního měření uvažovány dvě různá rozmezí velikostí poloměrů bublin, která byla následně analyzována. A sice: 2,85–4,14 mm, odpovídající elektrickým napětím 30 a 40 V, ojediněle i 50 V, a 4,61–6,28 mm, což byly velikosti bublin generovaných napětím 50 V. Oba tyto rozsahy rámcově odpovídají těm, které ve své práci definoval Hujer (2013) a použil pro ně označení „bublinka 4,1 mm“, resp. „bublinka 6,0 mm“. Celkový rozsah distančního parametru γ se v rámci všech měření pohyboval mezi 0,16 a 3,88.

V závislosti na naměřených datech pro bubliny o maximálních poloměrech 2,85–4,14 mm byly sestaveny grafy maximálních sil působících na pevnou stěnu od prvních a druhých kolapsů a poměrů sil mezi druhým a prvním kolapsem určujícím rozložení disipované energie během života kavitační bubliny. Graf 2 zobrazuje, jaké byly hodnoty síly účinku kolapsu kavitačních bublin v závislosti na distančním parametru γ . Níže zobrazený Graf 3 vyjadřuje poměr maximální síly od druhého vůči prvnímu kolapsu v závislosti na γ . Hodnoty v obou grafech jsou proloženy lomenou čarou pro získání bližší představy o trendu hodnot. Pro interval $\gamma > 2,1$ dosahují hodnoty síly od prvního

kolapsu (modře) 40–290 N a druhý kolaps (oranžově) byl zaznamenán pouze v jediném případě, a to o velikosti 50 N. V porovnání s Hujerem (2013) lze pozorovat shodu na téměř zanedbatelných silách od druhých kolapsů. Při zaměření na velikosti sil od prvních kolapsů se jeho měření pohybují v rozmezí 100–200 N. Při snižování γ mezi hodnotu 2,1 až 1,2 dochází k růstu síly od druhých kolapsů na hodnotu kolem 100–175 N, tento trend potvrzuje také Hujer. Blíže k pevné stěně pro $\gamma \leq 1,2$ jsou síly od druhých kolapsů nejvyšší (125–245 N) a v porovnání s prvními kolapsy dosahují v některých případech vyšší hodnoty. Zlom v trendu nastává kolem hodnoty $\gamma = 0,7$, při jejímž snižování první kolapsy začínají dosahovat větších sil kolem 320–380 N a druhé kolapsy naopak klesají až k hodnotám kolem 80–140 N. Podobně zaznamenal hodnoty také Hujer, který pro $\gamma \leq 0,6 \sim 0,7$ pozoroval první kolaps větší než druhý s hodnotami při extrémním přiblížení stěně až 800 N a velikosti druhého kolapsu v rozmezí 100–350 N.



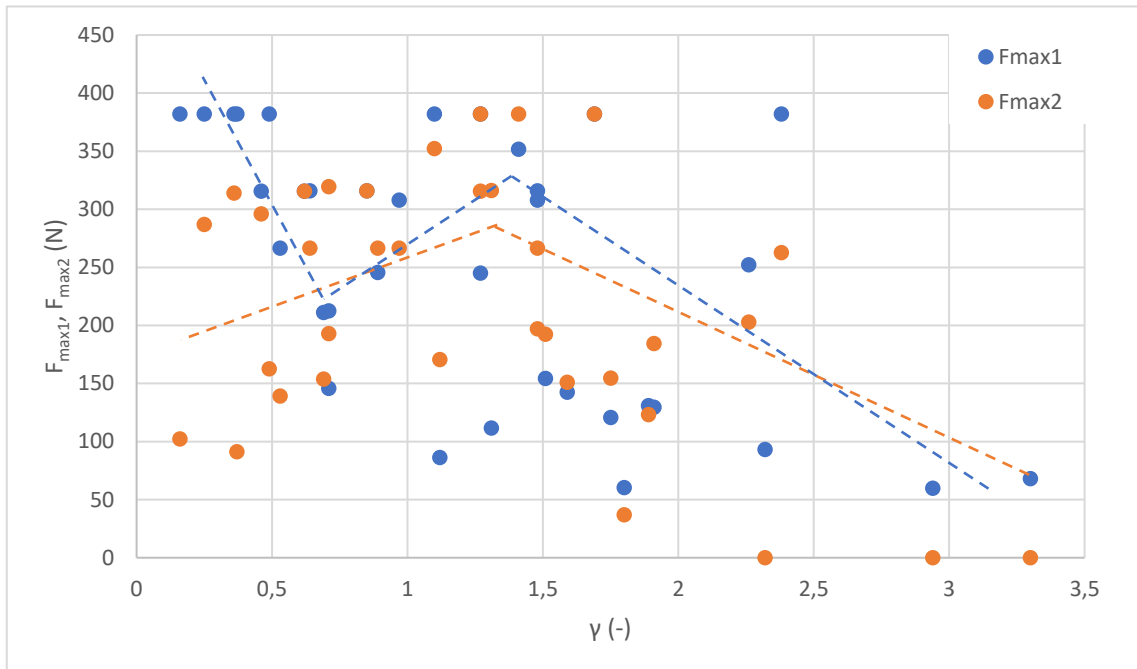
Graf 2 Síly působící na pevnou stěnu od prvních a druhých kolapsů bublin o poloměrech 2,85–4,14 mm



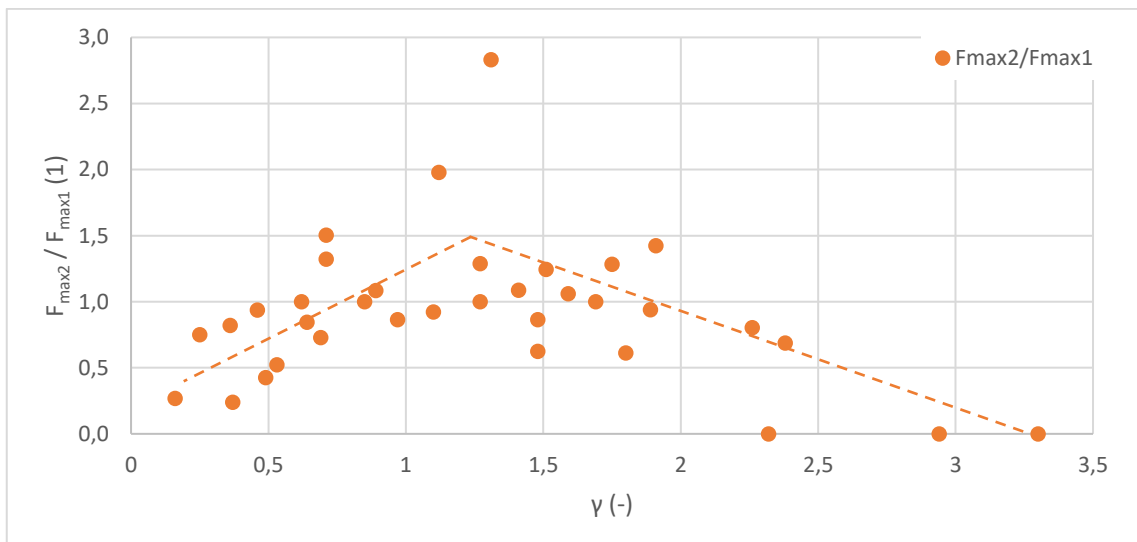
Graf 3 Poměr sil od druhých a prvních kolapsů bublin působících na pevnou stěnu o poloměrech 2,85–4,14 mm

Při bližším pohledu na výsledky experimentu pro bubliny v rozmezí poloměrů 4,61–6,28 mm je možné ještě lépe pozorovat trendy zmíněné v předchozím odstavci platící pro menší bubliny. Graf 4 pod tímto odstavcem ukazuje maximální síly působící na pevnou stěnu od prvních a druhých kolapsů a na dalším grafu (Graf 5) lze sledovat poměr sil mezi druhým a prvním kolapsem pro daný interval velikostí bublin v závislosti na distančním parametru. Stejně jako v předchozích grafech jsou zjištěné hodnoty proloženy lomenou čarou. Při největší vzdálenosti bubliny od stěny nejsou druhé a další kolapsy od bubliny pozorovány a síla prvních kolapsů se postupně zvyšuje z 50 N. Postupně dochází k vyrovnávání sil od prvních a druhých kolapsů. Při hodnotě γ mezi 1,5 až 2,0 se síly od většiny kolapsů pohybují mezi 120–200 N, zatímco při dalším snižování γ jejich hodnota roste. Právě pod hodnotou $\gamma = 1,5$ je možné pozorovat nejvyšší rozdíl poměru kolapsů při dominujícím druhém kolapsu s maximální silou kolem 380 N. K obdobným závěrům dospěl také Hujer (2013), který při $\gamma > 2,1$ naměřil síly prvního kolapsu převážně v oblasti kolem 200 N, během dalšího snižování na $1,2 \leq \gamma \leq 2,1$ dosahovaly hodnoty druhého kolapsu vyšších hodnot než první, a to v rozmezí 150–400 N. V oblasti $\gamma < 1,2$ se již postupně síly od druhého kolapsu postupně snižovaly až na hodnoty kolem 100 N, nicméně až do hodnoty cca $\gamma = 0,7$ byly stále ve většině případů větší než od prvních kolapsů. Ty dominovaly až při dalším při-

bližování bubliny pevné stěně, když se dostaly na maximální hodnoty síly kolem 380 N. V této oblasti pozoroval Hujer mnohem výraznější nárůst zaznamenané síly, která se pohybovala v rozmezí 1000–1500 N.



Graf 4 Síly působící na pevnou stěnu od prvních a druhých kolapsů bublin o poloměrech 4,61–6,28 mm



Graf 5 Poměr sil od druhých a prvních kolapsů bublin působících na pevnou stěnu o poloměrech 4,61–6,28 mm

Wang a Chen (2007) ve svém experimentu generovali bubliny také metodou přechodového odporu s maximálními poloměry 10,4 mm. To znamenalo také výrazně vyšší výsledné síly. Jejich bublina ovšem přesahovala velikost činné plochy PVDF senzoru, takže nebylo možné vyhodnotit celkovou velikost působících sil. V největší vzdálenosti od stěny ($\gamma > 2,1$) se potvrdil nízký impakt druhého kolapsu, když se postupně snižoval z cca 380 N pro $\gamma = 2,3$ až na 100 N pro $\gamma = 3,5$ a vyšší. V intervalu $1,2 \leq \gamma \leq 2,1$ pozorovali vyrovnaní sil od prvních a druhých kolapsů na hodnotě 600–1000 N. Velikost sil od druhých kolapsů se při dalším přibližování pevné stěně zmenšovala až na hodnotu 200 N při $\gamma = 0,3$. Na druhou stranu poměr vůči síle od prvních kolapsů se výrazně snížil, když tyto síly dosahovaly pro $\gamma < 0,6$ hodnot téměř 2000 N. V zásadě je tedy možné najít řadu výsledkových průsečíků s prací Wanga a Chena. Ať už se jedná například o rozložení poměrů sil od druhých a prvních kolapsů v oblasti kolem $\gamma = 1,5$ nebo hodnoty síly od druhých kolapsů při nejnižší vzdálenosti bubliny od pevné stěny, kdy byla většina energie bubliny využita již při prvním kolapsu.

Výsledky měření pomocí PVDF senzorů vyrobených fotolitografickou metodou ukazují, že zaznamenání účinku kolapsů kavitačních bublin je proveditelné a je možné dosahovat výsledků dobře porovnatelných s ostatními výzkumy (Wang a Chen, 2007, nebo Hujer, 2013). Na druhou stranu bylo v rámci experimentu nutné nezanedbat vlivy, které nežádoucím způsobem ovlivňovaly měření. Velkou roli hrálo ovlivnění senzorů nesprávným přilepením k ocelové destičce, při kterém zůstaly pod senzory vzduchové bubliny výrazně ovlivňující měření a výsledný signál senzorů. Toto bylo zjištěno během prvních měření s danými senzory, takové senzory nebyly pro další měření používány a byly vyrobeny nové. Během měření také senzory nebyly navzdory předpokladům schopné přenášet napětí větší než cca 3,5 V. Z tohoto důvodu nebylo možné provádět měření v bezprostřední blízkosti stěny s většími výslednými silami prvních kolapsů. Tento fakt zůstal nevysvětlen a existuje domněnka, že by mohl být způsoben nedostatečnou kapacitou metalizace nebo omezením v obvodech osciloskopu, které při nadměrném zatížení nedokáží dostatečně rychle přenastavovat mezi napěťovými úrovněmi.

6 Závěr

V rámci diplomové práce bylo provedeno první měření účinku kavitační bubliny pomocí PVDF senzorů vyrobených fotolitografickou metodou. Účinek kavitační bubliny v blízkosti pevné stěny nebyl dosud danými senzory měřen, a proto byla vhodnost použití těchto senzorů analyzována. V úvodních kapitolách byla vysvětlena problematika kavitace ve vztahu k dynamice a kolapsu kavitačních bublin a jejich chování v blízkosti pevné stěny, dále byly popsány možnosti měření účinku kolabujících kavitačních bublin a možnosti jejich generování. Další část práce byla věnována detailnímu popisu principu fungování PVDF senzorů a jejich výroby fotolitografickou metodou, vysvětleny byly důvody kalibrace senzorů a možnosti jejího provedení.

Experimentální část se zabývala měřením účinku kolapsu kavitační bubliny pomocí PVDF senzorů, které byly připraveny ve velikosti vhodné pro experimentální měření. Sensory byly přichyceny na ocelové destičce simulující pevnou stěnu a byly zkalibrovány metodou pádu kuličky. Po sestavení experimentální trati mohlo začít měření. Osamocené bubliny byly generovány metodou přechodového odporu a jejich životní cyklus byl zachycen vysokorychlostní CCD kamerou, signál z PVDF senzorů byl analyzován a byly zjištěny maximální síly od prvních a druhých kolapsů v blízkosti pevné stěny v závislosti na vzdálenosti bubliny od stěny. Výsledky měření byly porovnány s dalšími výzkumy, které se zabývaly obdobnou tematikou, ovšem za použití průmyslově vyrobených PVDF senzorů. Z výsledků vyplynulo, že PVDF senzory vyrobené fotolitografickou metodou je možné použít pro měření účinku kavitačních bublin. Hodnoty sil kolapsů jsou porovnatelné s dalšími výzkumy a při nastavení vhodných podmínek experimentu lze zajistit opakovatelnost měření. Jako stěžejní se v rámci experimentu ukázalo správné uchycení PVDF senzorů na ocelové destičce. Při lepení senzorů mohlo docházet k setrvání vzduchových bublinek pod PVDF senzory, což mělo výrazný vliv na zaznamenaném elektrickém napětí od senzoru při kolapsu bubliny v daném místě senzoru. Obdobný vliv měla také aplikace krycích kaptonových a polypropylenových pásek.

Další výzkumy v oblasti měření kolapsu bublin pomocí PVDF senzorů by mohly přispět k ověření poznatků o chování kavitačních bublin v blízkosti pevných stěn pomocí této metody – přímého měření účinku od kolapsu na pevné stěně. Optimalizace lepení a použití krycích vrstev by napomohla k bezproblémovému provedení těchto měření. V rámci této práce nebyly řešeny energetické souvislosti kolapsů bublin a parametrů obvodu pro generování bublin, které jsou dalším obsáhlým tématem, jež by použití těchto unikátních PVDF senzorů mohlo pomoci ověřit. Výzkum PVDF senzorů vyrobených fotolitografickou metodou zatím také postrádá ověření velikosti nábojové konstanty v různých místech senzorů. Pro objektivní pohled na měření účinků kolapsů bublin použitou metodou by bylo vhodné dále zařadit větší spektrum metod pro generování bublin s ohledem na velikost bublin.

Seznam použité literatury

BAUER, François, 1995. Properties of ferroelectric polymers under high pressure and shock loading. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. ISSN 0168-583X.

BRDIČKA, Miroslav, SAMEK, Ladislav a TARABA, Oldřich, 1981. *Kavitace, Diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL. 332 s.

DUDL, Martin, 2021. *Kalibrace fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru*. Liberec. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

FRANC, Jean-Pierre a MICHEL, Jean-Marie, 2004. *Fundamentals of cavitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 321 s. ISBN 1-4020-2233-6.

HATTORI, Shuji, HIROSE, Takuya a SUGIYAMA, Kenichi, 2010. Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads. *Wear*. 269 (7-8), 507-514. ISSN 0043-1648.

HUJER, Jan, 2013. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

HUJER, Jan, 2019. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů*. Liberec. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

HTET, Linn, 2021. *Calibration of piezoelectric film sensors for the cavitation aggressiveness measurement*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

KOUKOLÍK, Václav, 2013. *Využití piezoelektrického jevu v praxi*. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.

Measurement Specialties, 1999. *Piezo Film Sensors Technical Manual*. Norristown: Measurement Specialties. 89 s.

MÜLLER, Miloš, 2008. *Dynamic behaviour of cavitation bubbles generated by laser*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 110 s. ISBN 978-80-7372-241-8.

OKADA, Tsunenori, IWAI, Yoshiro R. a AWAZU, Kaoru, 1989. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion part 1: A method for measurement of collapse pressures. *Wear*. 133, 219-232. ISSN 0043-1648.

SARKAR, Prasanta, 2019. *Simulation of cavitation erosion by a coupled CFD-FEM approach*. Grenoble. Disertační práce. Communauté Université Grenoble Alpes. Fakulta inženýrství a managementu.

TONG, R. P. a kolektiv, 1999. The role of ‘splashing’ in the collapse of a laser-generated cavity near a rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 380, 339-361. ISSN 1469-7645.

TZANAKIS, Iakovos a kolektiv, 2014. Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble. *Ultrasonics Sonochemistry*. 21 (2), 866–878. ISSN 1350-4177.

WANG, Yi-Chun a CHEN, Yu-Wen, 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. ISSN 0894-1777.

Zdroje obrázků

Slurryflo, 2021. *What is valve cavitation* [online]. 28.11.2021 [cit. 28.11.2021]. Dostupné z: <https://www.slurryflo.com/cavitation>.

DUDL, Martin, 2021. *Kalibrace fotolitograficky vyrobeného PVDF senzoru*. Liberec. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

HUJER, Jan, 2013. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.

HUJER, Jan a MÜLLER, Miloš, 2017. Calibration of PVDF Film Transducers for the Cavitation Impact Measurement. *The European Physical Journal Conferences*. 180(2), ISSN 2100-014X.

PETERS, Andreas, 2019. *Numerical Modelling and Prediction of Cavitation Erosion Using Euler-Euler and Multi-Scale Euler-Lagrange Methods*. Duisburg. Disertační práce. Univerzita Duisburg–Essen. Fakulta inženýrských věd.

SHAH, Iash G. a kolektiv, 2018. Air Release and Cavitation Modeling with a Lumped Parameter Approach Based on the Rayleigh–Plesset Equation: The Case of an External Gear Pump. *Energies*. 11 (12), ISSN 1996-1073.

Tired Tires, 2021. *Technology* [online]. 10.2.2014 [cit. 28.11.2021]. Dostupné z: dev.nsta.org/evwebs/2014102/news/default.html.

YANG, S.-H. a kolektiv, 2011. Cinematographic Analysis of Counter Jet Formation in a Single Cavitation Bubble Collapse Flow. *Journal of Mechanics*. 27 (2), 253-266. ISSN 1811-8216.

Seznam příloh

Příloha 1 – Tabulka výsledků kalibrace konkrétního PVDF senzoru

Příloha 2 – Tabulka hodnot měření bublin generovaných elektrickým napětím 50 V pro jeden ze senzorů

Příloha 1 – Tabulka výsledků kalibrace konkrétního PVDF senzoru

m (kg)	t₁ (μs)	t₂ (μs)	τ (μs)	U_{max} (V)	U_{stř} (V)	h1 (m)	h2 (m)	F_{max} (N)	F_{stř} (N)
0,000441	2890	2924	0,000034	0,83640	0,49051	0,400	0,124	71	42
0,000441	2735	2769	0,000034	0,81237	0,46830	0,400	0,119	72	41
0,000441	2891	2927	0,000036	0,84669	0,48398	0,400	0,123	69	39
0,000441	2893	2929	0,000036	0,84841	0,48837	0,400	0,119	68	39
0,000441	2878	2914	0,000036	0,78491	0,45831	0,400	0,114	67	39
0,000441	2738	2773	0,000035	0,80722	0,46310	0,400	0,124	70	40
0,000441	2885	2921	0,000036	0,76604	0,44327	0,400	0,121	68	39
0,000441	2890	2927	0,000037	0,80207	0,45628	0,400	0,115	67	38
0,000256	2230	2263	0,000033	0,53265	0,30449	0,400	0,113	43	25
0,000256	2892	2926	0,000034	0,59100	0,32243	0,400	0,114	44	24
0,000256	2891	2926	0,000035	0,58242	0,32270	0,400	0,118	42	23
0,000256	2888	2921	0,000033	0,57727	0,32285	0,400	0,114	44	25
0,000256	2891	2925	0,000034	0,58413	0,32357	0,400	0,111	43	24
0,000256	2735	2766	0,000031	0,57212	0,33555	0,400	0,106	44	26
0,000256	2483	2516	0,000033	0,58413	0,32259	0,400	0,113	45	25
0,000256	2891	2925	0,000034	0,58413	0,32816	0,400	0,114	43	24
0,000509	1319	1356	0,000037	0,90332	0,51461	0,400	0,117	77	44
0,000509	1721	1757	0,000036	0,91362	0,52495	0,400	0,120	79	45
0,000509	1315	1351	0,000036	0,87415	0,51127	0,400	0,121	77	45

0,000509	1574	1610	0,000036	0,82610	0,48832	0,400	0,118	76	45
0,000509	920	956	0,000036	0,81065	0,47387	0,400	0,115	77	45
0,000509	1325	1361	0,000036	0,86728	0,50231	0,400	0,123	78	45
0,000509	1318	1355	0,000037	0,84498	0,48655	0,400	0,118	76	44
0,000509	1831	1867	0,000036	0,86728	0,50824	0,400	0,118	77	45

Příloha 2 – Tabulka hodnot měření bublin generovaných elektrickým napětím 50 V pro jeden ze senzorů

Číslo měření	U (V)	R _{max} (mm)	γ (1)	U _{max1} (V)	F _{max1} (N)	U _{max2} (V)	F _{max2} (N)	F _{max2} / F _{max1} (1)
1	50	5,31	0,71	2,049	212	2,980	319	1,504
2	50	5,03	1,41	3,260	352	3,524	382	1,086
3	50	5,17	1,69	3,524	382	3,524	382	1,000
4	50	5,10	2,26	2,395	252	1,966	203	0,804
5	50	5,03	1,1	3,524	382	3,264	352	0,922
6	50	5,31	1,27	3,524	382	3,524	382	1,000
7	50	6,28	0,25	3,524	382	2,697	287	0,751
8	50	5,45	2,38	3,524	382	2,484	262	0,687
9	40	3,07	3,88	0,585	44	0,000	0	0,000
10	40	3,00	2,82	2,750	293	0,000	0	0,000
11	40	2,97	3,47	2,357	248	0,000	0	0,000
12	40	2,93	1,99	0,428	26	0,271	8	0,305
13	40	3,79	0,67	1,521	152	1,789	183	1,203
14	40	2,85	0,59	1,415	140	1,408	139	0,994
15	40	3,07	1,17	1,704	173	2,054	213	1,233
16	40	3,29	0,87	1,934	199	2,333	245	1,231
17	40	3,51	0,38	3,524	382	1,376	135	0,353
18	50	5,34	0,37	3,524	382	0,995	91	0,239
19	50	5,41	0,49	3,524	382	1,616	163	0,426

20	50	5,78	0,16	3,524	382	1,089	102	0,267
21	50	5,71	0,36	3,524	382	2,930	314	0,821